

Научно-технический и производственный сборник

БЭС

Безопасность
энергетических
сооружений

Научно-исследовательский институт

НИИЭС

энергетических сооружений

Вып. 11
2003

**Российское открытое акционерное общество энергетики и электрификации
«Единая энергетическая система России»
(ОАО РАО «ЕЭС России»)**

**Открытое акционерное общество
«Научно-исследовательский институт энергетических сооружений»
(ОАО «НИИЭС»)**

Академия проблем водохозяйственных наук

БЕЗОПАСНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
СБОРНИК**

Выпуск 11

**ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
И ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
И НАСЕЛЕНИЯ ОТ ПАВОДКОВ**

**Москва
2003**

УДК 621.311

Председатель редакционного совета
к.т.н. С.О. Бритвин

Безопасность энергетических сооружений. // Научно-технический и производственный сборник. Вып.11. ОАО «НИИЭС». М.:2003. 480 с. (цв .вкл. — 16 с.)

Выход в свет настоящего выпуска сборника „Безопасность энергетических сооружений» в значительной степени инициирован тяжелыми последствиями катастрофических паводков, имевших место в 2002 г. в ряде районов России (Северный Кавказ, Ставрополь, Краснодарский край, Якутия) и Западной Европе. Приведены сведения о параметрах и последствиях этих паводков, а также исторические данные о крупнейших наводнениях, произошедших в прошлом.

Существенное место уделено методам прогноза гидродинамических характеристик естественных и техногенных паводков. Изложены новейшие подходы к численному моделированию параметров паводковых волн, в том числе с использованием ГИС-технологий.

Сведения об имевших место наводнениях, вызванных ледовыми заторами, и методах расчета ледовых явлений на реках представляют определенную ценность в разработке мероприятий по борьбе с отрицательными сторонами таких явлений. В ряде статей приводятся данные о различных конструктивных и эксплуатационных мероприятиях, обеспечивающих снижение опасности паводков.

Часть материалов сборника посвящена состоянию элементов напорного фронта речных гидроузлов, влияющего на предотвращение прорывов напорного фронта, вызывающих разрушительные искусственные паводки, и некоторым методам определения сохранности этих элементов при гидродинамических воздействиях. Существенное значение имеют материалы сборника, посвященные оценке ущербов от воздействия паводков и страхованию риска убытков от наводнений.

Выпуск завершается сведениями о состоявшихся в 2002 г. международных форумах, на которых представлены материалы, посвященные паводкам.

ОАО «НИИЭС», 125362, Москва, а/я 393,

Телефон: 493 51 32

E-mail: niiesoao@mtu-net.ru

ISBN 5-902144-03-5

Строительный проезд, д. 7а

Факс: (095) 363 56 51

© ОАО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений», 2003

НАВОДНЕНИЯ И ЗАЩИТА ОТ НИХ

(Вместо предисловия)

Наводнения — затопление водой значительной местности, используемой для проживания и хозяйственной деятельности, в результате подъема уровня воды в реке, озере или море, вызванного различными причинами (таяние снегов и льдов, дожди и ледовые заторы, ветровые нагоны, цунами, прорывы подпорных сооружений). Наводнения являются одним из наиболее грозных природных или техногенных явлений, приводящих к большим экономическим потерям и человеческим жертвам.

В качестве наиболее грозного явления в истории человечества наводнение описано в предании о всемирном потопе, содержащемся в одном из древнейших памятников человеческой культуры — книге «Бытие». «В шестисотый год жизни Ноевой, во второй месяц, в семнадцатый день месяца в сей день разверзлись все источники великой бездны и окна небесные отворились; и лился на землю дождь сорок дней и сорок ночей... И усилилась вода на земле чрезвычайно, так что покрылись высокие горы, какие есть под небом. На пятнадцать локтей поднялась над ними вода ... и накрылись горы».

Как уже отмечалось, наводнения имеют различное происхождение и соответственно разный характер. Вследствие таяния снегов и ледников при оттепелях, обильных дождей, попусков из водохранилищ происходят паводки — сравнительно кратковременные и периодические поднятия уровней воды в реках. Вызванный продолжительным притоком воды вследствие таяния

снегов и ледников, обильными сезонными дождями (например, в муссонные периоды) ежегодно повторяющийся в один и тот же сезон года относительно длительный и значительный подъем воды называется половодьем.

Наиболее существенные затопления и ужасающие потери для человеческого общества имеют наводнения, вызванные ветровыми нагонами и цунами, характерные главным образом для юго-восточной Азии. Однако и ряд крупнейших городов западной Европы (Лондон, Санкт-Петербург и др.) требуют серьезной защиты от паводков, связанных с ветровыми нагонами. Известны случаи катастрофических дождевых паводков, таких, например, как страшное наводнение в 1966 г. во Флоренции на р. Арно.

Европу нельзя отнести к части света, характеризующейся наиболее мощными наводнениями, охватывающими большие пространства суши. Однако исключением в этом отношении является 2002 г., когда катастрофическими паводками были охвачены часть западной Европы и юга России. Кроме того в России в это время имели место сильные ледовые заторы на реках, текущих в северном направлении (прежде всего на р. Лене). Урон, нанесенный этими паводками, заставил обратить более пристальное внимание на предсказания возникновения паводков, определение их характеристик, методы защиты хозяйственных объектов и населения от паводков.

Представляемый вашему вниманию выпуск сборника «Безопасность энергетических сооружений» является попыткой дать информацию и обобщить знания о паводках и методах защиты от них. При этом основное внимание уделяется паводкам на реках. Выпуск сборника не претендует на полноту освещения рассматриваемого вопроса, дающую возможность полного инженерного и экономического решения задачи. В нем помещены материалы известных специалистов по различным вопросам гидрологической и гидравлической безопасности.

Одним из важнейших вопросов защиты от паводков является достаточно точный прогноз времени и параметров паводков. Проблема прогноза наводнений так же стара, как история всемирного потопа: прародитель Ной, как известно, спасся благодаря точному и своевременному предсказанию. Следует отметить, что по сравнению с другими странами в России наводнения по вине паводков являются событиями более редкими, чем половодья, и прогноз наиболее крупных наводнений на равнинных российских реках относительно прост. Вместе с тем в связи с рядом об-

стоятельств методики гидрологических прогнозов в последние годы требуют существенных изменений. К этим обстоятельствам относятся происходящее изменение климата на Земле, антропогенное воздействие на окружающую среду, новые экономические подходы к экологическим оценкам и т.д.. При расширении возможностей прогнозов за счет использования спутников следует обратить особое внимание на отрицательное влияние на качество прогнозов резкого сокращения полезной сети гидрометеорологических наблюдений.

В число параметров прогноза паводков входят такие величины, как время распространения волны паводка, скорость и глубины воды на различных участках, затопленных водой, и другие гидродинамические и гидрологические характеристики. В настоящее время благодаря возможностям численного моделирования с использованием современных ЭВМ решение задач о распространении волны паводка представляется достаточно реальным и точным. Некоторые из них представлены в настоящем сборнике.

Для нашей страны особое значение имеет предотвращение и борьба с паводками, вызванными ледовыми заторами и шуговыми зажорами. Течение крупных рек с юга на север приводит к забивке русл ледовым материалом, поднятию уровня воды, затоплению используемых территорий, динамическому разрушению льдинами различных объектов. О повторяемости и тяжести ледовых явлений на российских реках свидетельствует большое количество материалов по данной проблеме, приведенных в настоящем сборнике.

Наводнения могут явиться катастрофой: вымокают посевы, заливаются и разрушаются постройки, заносятся песком плодородные земли, нарушается сообщение, гибнут люди и т.д. Однако такое суждение не всегда справедливо. С древности известна зависимость плодородности Нильской долины от выноса ила в паводки на поймы, высокие сборы трав и огородных растений на затопленных землях и т.д. Вместе с тем все чаще возникает задача защиты используемых земель от их затопления. Обычно защита территории от затопления ведется с использованием гидротехнических сооружений и производства мелиоративных работ. Весьма эффективно снижение пиковых расходов воды за счет аккумуляции части стока в водохранилищах, «ловушках» и т.д. Другим способом снижения расхода является отвод воды на неиспользуемые территории. Распространенным способом защиты территорий является ограждение их дамбами.

Наряду с повышением надежности защиты от паводков указанные способы защиты могут привести к снижению общей эффективности защиты: появляется возможность прорыва плотин и дамб, приводящего к искусственному паводку, превышающему естественный. При ограждении русла дамбами повышается уровень воды в нем. Поэтому при выборе мероприятий по защите территорий следует учесть все последствия осуществления соответствующих мероприятий.

При изучении последствий прохождения паводков следует рассмотреть все явления, сопровождающие этот процесс, с тем чтобы минимизировать экономические и социальные последствия паводка. Для этого, в частности, следует установить связи повреждаемости объектов с гидравлическими характеристиками паводков, влияние пропуска паводков на сами гидротехнические сооружения и т.д., разработать методики оценки экономических потерь вследствие паводков, правила страхования риска убытков от наводнений.

Несомненно, что на основании имеющихся материалов следует предложить Правительству проект Федерального Закона о защите от наводнений.

Редактор выпуска *Прудовский А.М.*,
доктор техн. наук (ОАО «НИИЭС»)

НАВОДНЕНИЯ В БАССЕЙНАХ РЕК СЕВЕРНОГО КАВКАЗА В 2002 ГОДУ*

*Тарасов Н.М., кандидат эконом. наук,
Антонов В.Н., Давыдов С.А., инженеры (МПР России)*

Катастрофические наводнения в бассейнах рек Северного Кавказа в 2002 г., захватившие горные, равнинные и устьевые части рек этого региона, прошли в три волны:

наводнение в январе в устье р. Кубани;

наводнения в июне на всех реках Северного Кавказа;

наводнение в августе на черноморском побережье.

Продолжением этого ряда стихийных бедствий явилась чрезвычайная ситуация в Северной Осетии, возникшая в связи со сходом ледника в Кармадонском ущелье (гляциальный сель).

Наводнения столь разрушительного масштаба отмечаются в этом регионе впервые.

Зимнее наводнение в устье р. Кубани

Наводнение произошло в январе в результате резкого повышения температуры воздуха, выпадения осадков в виде дождя и интенсивного таяния снега, что вызвало катастрофический подъем уровней воды, на реках Закубанского массива. За 20 дней на них пришелся сток воды, близкий к среднемноголетнему годовому (0,85 млрд. м³). На реках наблюдался ледоход. С 8 по 10 января при расходах воды в р. Кубань у г. Темрюк от 520 до 564 м³/с нагон ветром с моря забил рукава р. Кубани льдом, а снижение температуры до -28°С сковало устье льдом, создав мощные ледовые заторы. Уровень воды в реке начал катастрофически подниматься, переливы через дамбы обвалования создали прораны и вода затопила прилегающие территории. По обоим берегам р. Кубани в системе обвалования образовалось 17 проранов шириной от 15 до 50 м и глубиной от 1,5 до 2,5 м, небольшие переливы наблюдались более чем в 70 местах. Подтоплены населенные пункты и сельхозугодья. Общий ущерб от чрезвычайной ситуации оценивается суммой 2 млрд. руб. (в текущих ценах).

Наводнения в июне на реках Северо-Кавказского региона

Причиной их явилось наложение интенсивных ливневых осадков (от 1,5 до 3-х месячных норм в течении 2 – 3 дней) на нестывшие в связи с холодной весной запасы снега в горных районах. Подъем уровней воды наблюдался, начиная с притоков, берущих начало в горных и высокогорных районах. В горных районах пик

*По материалам МПР России и территориальных органов МПР России.

паводка наблюдался во второй половине дня 20.06. В ночь с 20 на 21 июня пик паводка начал смещаться на предгорные районы. К 8 часам 21.06. приток по р. Кубани и р. Большой Зеленчук к створу Невинномысского гидроузла увеличился до 1260 м³/с, к 11 часам достиг 2200 м³/с, а вечером расход увеличился до 3000 – 3500 м³/с, значительно превысив пропускную способность гидроузла и вызвав ряд разрушений на гидротехнических сооружениях.

С 22 июня волна паводка сместилась на равнинную территорию, затопила первую и вторую надпойменные террасы с находящимися на них десятками населенных пунктов, разрушила мосты, дороги и другие коммуникации.

По мере распластывания паводка на равнинной части бассейна за счет аккумуляции на разливах максимальные расходы воды снижались. Максимальный приток к Краснодарскому водохранилищу составил 2070 м³/с и был близок к расходу 1%-й обеспеченности. Предварительно из Краснодарского водохранилища был увеличен сброс воды, что позволило создать дополнительный резерв емкости в нем, принять весь паводковый сток, не увеличивая сброс воды в нижний бьеф сверх 1300 м³/с, и предотвратить катастрофу в низовьях р. Кубани. Краснодарское водохранилище выполнило свою положительную роль в регулировании катастрофического паводка, предотвратив затопление не менее 600 тыс. га земель с проживающим на них населением численностью 350 тыс. человек.

Аналогичная ситуация развивалась в бассейнах рек Терека и Кумы.

Только по Ставропольскому краю подтоплено и разрушено более 15 тыс. жилых домов, 21 км водоводов, 3 водозабора, нарушена работа объектов ЖКХ, производственных объектов, прервано железнодорожное сообщение, автомобильное движение, полностью или частично разрушено более 20 км берегоукреплений, водоограждающих дамб и валов. Погибло около 50 человек, пострадали около 80 тыс. человек.

Характерны разрушения, полученные на Невинномысском гидроузле. Из-за недостаточной пропускной способности водосбросных сооружений, рассчитанных на пропуск 0,1% обеспеченности паводка, произошел перелив воды через плотину. По левому берегу р. Кубани, в обход гидроузла, рекой было промыто новое русло с расходом около 1000 м³/с. Была размыта земляная часть плотины, повреждено гидромеханическое и электротехническое оборудование гидроузла, в результате чего фактически утеряна возможность какого-либо управления ситуацией.

Разрушения и ущербы от этого наводнения огромны. Наиболее крупные — в Карачаево-Черкессии, в Краснодарском крае,

в Республике Дагестан. В целом по региону ущерб оценивается в размере более 17,0 млрд. руб., повреждено 88,0 тыс. домостроений, числится пострадавшими 570 тыс. человек, погибшими 130 человек.

Наводнение в августе на Черноморском побережье Кавказа

В районе г. Новороссийска 8 – 9 августа прошли сильные ливни, грозы, образование в море смерчей. Смерчи вынесли сотни тысяч кубометров воды, сбросив их на город и прилегающие территории, образовав кроме наводнения селевые потоки. Количество выпавших осадков составило годовую норму. Это привело к катастрофическому наводнению с огромными материальными потерями и человеческими жертвами.

Подтоплены города и станицы. Пострадали гидротехнические сооружения водохранилищ: частично разрушены водохранилища на р. Дюрсо (емкость 4,3 млн. м³), Владимирское (1 млн. м³), Глебовское (1,3 млн. м³).

Ущерб социальной и производственной инфраструктуре на черноморском побережье оценивается суммой 0,4 млрд. руб., имеются погибшие.

Чрезвычайная ситуация в Кармадонском ущелье

Причиной катастрофического схода гляциального селя, произошедшего 20 сентября, явилось обрушение висячего ледника из-под вершины Джимарай-хох на ледник Колка, что послужило толчком схода значительной части ледников Колка и Майли и дальнейшего движения объединенных ледовых масс вниз по руслу р. Геналдон. Сдвиг связан с тем, что в результате ливневого стока на поверхности ледника возникали подпруды и скопления воды и их прорыв под ледовые массы, что и обусловило развитие высокоскоростного гляциального слоя под ледником и движение основного тела ледника. Он достиг скального каньона «Кармадонские ворота» в районе верхнего туннеля. Через узкий каньон прошла грязекаменная часть двигающейся массы, в то время как ледовая часть остановилась. Ниже по р. Геналдон до слияния с р. Гизельдон грязекаменной массой охвачена вся пойма реки с разрушением всего, что попало в зону ее воздействия.

В верхней части остановившегося льда в долине р. Геналдон образовалось несколько подпрудных озер. В такой ситуации все пришло к относительному равновесию.

Ущерб, нанесенные в Кармадонском ущелье, следующие: погибло 18 человек, пропавшими без вести считаются 118 че-

ловек, разрушена автотрасса на участке длиной 30 км, в том числе 3 туннеля длиной 270 м, ЛЭП, скважины для подачи термальных вод, водозаборы и т.д..

Описанные природные явления выявили повсеместные нарушения норм использования прилегающих к рекам территорий без соответствующих защитных сооружений, недостаточное количество защитных сооружений, плохое их техническое состояние и практически отсутствие эксплуатации.

Учитывая недостаточность защиты от наводнений в регионе и повреждения существующих защитных сооружений, по поручению Правительства Российской Федерации одновременно с неотложными восстановительными работами разработан комплексный план действий по восстановлению гидротехнических сооружений и обеспечению нормального функционирования водохозяйственного комплекса в Южном федеральном округе. Мероприятия по плану действий на 2003 г. оцениваются суммой 2,4 млрд. руб. Они включают:

создание гидрологических постов;

восстановление руслорегулирующих сооружений, защитных дамб и валов;

ремонт берегоукрепительных сооружений;

восстановление водоохранных лесонасаждений;

ремонт ГТС на водохранилищах и водохозяйственных сооружениях;

восстановление других гидротехнических сооружений.

На масштабы катастрофических последствий этих наводнений повлияли и некоторые особенности рек Северного Кавказа, отличающихся:

большими скоростями нарастания уровней в связи с большими уклонами бортов долин и уклонами рек (по данным гидропоста Хетагурова на р. Кубань-Коста уровень в его створе поднялся за 4 часа на 2,4 м);

плотной застройкой пойм (стеснены горным рельефом), большим количеством упрощенных защитных дамб, в большинстве в виде обвалований, выполненных без проектов;

повышенными по сравнению с другими регионами сносами в русло мусора, завалами деревьев, грунта, засорением русла и т. п.;

наличием большого количества крупных и мелких мелиоративных систем, развитым мелиоративным сельским хозяйством;

трудно прогнозируемыми гидрологическими параметрами, малым количеством постов наблюдения, недостаточностью работ по прогнозированию, предупредительных работ, контроля состояния защитных ГТС.

В связи с относительно редкой повторяемостью катастрофических наводнений проблема не получила должного внимания: слабо разработана теория, несовершенна конструктивная часть и эксплуатация гидротехнических сооружений, мероприятия по водосбору плохо взаимно увязаны и не комплексно завершены. Все эти обстоятельства послужили причиной огромных материальных ущербов.

В качестве предварительного вывода по результатам анализа наводнений 2002 г. на Северном Кавказе следует отметить:

необходимость повышения внимания к наводнениям на всех уровнях управления экономикой региона;

необходимость бассейновой (региональной) увязки всех мероприятий, направленных на снижение ущербов от наводнений, создание единой общегосударственной системы борьбы с наводнениями;

несовершенство законодательства Российской Федерации в части предупреждения негативных последствий наводнений;

недостаточность мероприятий на водосборных площадях, отсутствие стратегически увязанных планов управления ситуацией при наводнениях;

необходимость конкретного изучения вопросов возникновения и развития наводнений в регионе, составление численных гидравлических моделей бассейнов рек, результатом которых должно стать обоснованное прогнозирование, а изучение результатов и разработка гидравлических моделей должны быть поставлены в число первоочередных мероприятий.

НАВОДНЕНИЯ В СТРАНАХ ЕВРОПЫ В 2002 ГОДУ

*Орешкин О.Ф., кандидат техн. наук (МГУ пищевых производств),
Прудовский А.М., доктор техн. наук (ОАО «НИИЭС»)*

В начале августа 2002 г. в результате прохождения циклона по западной и центральной Европе выпали обильные осадки, значительно превышающие обычные нормы. Осадки выпали в основном в виде дождя, однако в некоторых местах наблюдалось выпадение крупного града и, что совершенно неожиданно для летнего периода времени, в виде обильного снега (Испания).

Небывалые проливные дожди во многих странах вызвали паводки. Реки вышли из берегов, некоторые плотины не выдержали напора воды. В Великобритании было затоплено практически все северо-восточное побережье.

Ураганные ливни обрушились на центральные районы Италии. Наводнением уничтожены тысячи гектаров виноградников. В Риме были затоплены подвалы многих домов, несколько станций метро и две больницы. Движение транспорта было затруднено из-за поваленных деревьев. Вышедшие из берегов реки подняли уровень воды Адриатического моря в прибрежной части: так, например, в Венеции уровень воды поднялся на 1 м.

В Австрии р. Камп вышла из берегов, потоком воды было снесено несколько мостов и размыты дороги. Средства массовой информации отмечали, что, по данным многолетних наблюдений, подобной катастрофы не было 100 лет.

В Чехии более всех пострадала южная часть Богемии. Здесь властям пришлось эвакуировать 2 тыс. человек. Несколько человек пропало без вести, 5 погибло. Затоплена часть Чешских Будейовиц. В Праге начался подъем уровня воды в р. Влтаве.

В середине августа проливные дожди обрушились на центральную часть Европы. Эти дожди явились причиной второй волны паводков и наводнений. Особенно большой подъем уровня воды отмечался в реках Австрии, Словакии, Чехии, Хорватии, Германии, Венгрии, Румынии и других стран, т. е. в бассейнах рек Дуная и Эльбы (Германия, Чехия) (рис. на цветной вкладке). Именно на этих реках часто наблюдаются летние паводки, и при разливах рек этих бассейнов наступают наиболее катастрофические последствия с огромным материальным ущербом.

14 августа в Австрии в течение суток выпала месячная норма осадков. Ливни, местами с градом, парализовали движение на автострадах, железных дорогах, по Дунаю было прекращено судоходство. Были затоплены многие населенные пункты и кварталы крупных городов, нанесен ущерб сельскому хозяйству. Зальцбург был объявлен зоной бедствия. Затоплены города между Веной и австро-словацкой границей. Разлившийся Дунай подмыл 30-метровый мост, обрушение его конструкций могло создать крупный затор в русле реки и стать причиной дополнительного наводнения для окрестностей города. Австрийским властям с помощью специальной техники пришлось демонтировать мост.

К 15 августа паводок пошел на убыль. Первые итоги убытков от наводнения: около 10 тыс. домов по всей Австрии стали непригодными для жилья. Ущерб оценивается в 1 млрд. евро. Общее количество жертв наводнения в Австрии составил 7 человек. Гидротехнические защитные сооружения справились с натиском стихии. В Вене проблемы возникли только в тех местах, где отводной

канал, проходящий в непосредственной близости от центральной части города, примыкает к основному руслу Дуная. Там были отмечены затопления подвальных помещений и отдельных участков территорий некоторых промышленных предприятий.

Сильные дожди вызвали наводнение в некоторых районах Бельгии. Размыты дороги, связывающие Бельгию и Францию.

Уровень воды в Дунае, который протекает по территории Словакии, в том числе и через столицу республики — Братиславу, 15 августа достиг 9,8 м. Прогноз гидрометеослужбы не исключал превышения критической отметки 10,5 м. В Братиславе было объявлено чрезвычайное положение, проведены соответствующие мероприятия в связи с возможным наводнением: укреплены набережные, разработан план эвакуации населения из районов, которым грозит наводнение, предусматривалась возможность отключения электричества, газа и водопровода. Однако Братислава все же была подтоплена: затоплен район Братиславы — Петржалка. Дунай вышел из берегов в западной Словакии близ Братиславы. Затоплен населенный пункт Девин. В этом населенном пункте под водой оказались более 50 домов. Критическая ситуация сложилась и в населенном пункте Девинска-Нова-Весь. По некоторым оценкам специалистов такого паводка на Дунае в этом районе не было пять веков. Ущерб от наводнения составил 800 млн. евро. Сведения о человеческих жертвах отсутствуют.

16 августа наводнение началось и в Венгрии. Тревога была объявлена на протяжении 990-километрового течения Дуная и Тисы. Паводок по Дунаю в Венгрии смещался вниз. Особенно тревожная ситуация сложилась в области Дьер-Шопрон на северо-западе в низкой части Венгрии, находящейся в бассейне притоков Дуная. Там наводнение угрожало затоплением памятников старины, музеев, крупных курортных зон. В регионах затопления происходила эвакуация населения. Под водой оказались автострады, было прекращено движение на многих железных дорогах.

В Будапеште к этому времени пик паводка еще не наступил, и уровень воды продолжал неудержимо повышаться. Рано утром 18 августа он составил 8,28 м. Эксперты полагали, что уровень воды не превысит критической отметки 10 м, защитные сооружения выдержат напор воды и историческая часть города затоплена не будет. Однако в городе проводились работы по укреплению защитных дамб, было эвакуировано 2 тысячи жителей города. Во второй половине дня уровень воды достиг отметки 8,47 м, побив «рекорд» 1965 г. — тогда уровень в Дунае достигал отметки 8,45 м.

Масштабное наводнение угрожало равнинному Пешту, где грязевые потоки уже уничтожили несколько кафе и затопили подземные переходы. К утру 19 августа вода поднялась еще на 10 см. Течение реки было необычайно сильным. В городе полностью была затоплена нижняя набережная, поток хлынул на равнинную часть Будапешта. Дунай подступил к зданию парламента. Рекордно высокий уровень воды продолжал медленно расти в течение всего дня и остановился на отметке 9 м — абсолютный рекорд за сто лет. По заверениям венгерских властей защитные дамбы Будапешта могут выдержать напор воды при повышении уровня до 10 м. Эти заверения оправдались: защитные сооружения выдержали и город не подвергся сокрушительному затоплению.

После Будапешта «большая вода» хлынула в южную Венгрию, восток Хорватии и Сербию. Здесь защитные дамбы не рассчитаны на такой паводок, но здесь почти и нет крупных городов, так что ущерб от разлива относительно невелик. Остановить потоп могли бы водохранилища, но в центральной Европе ГЭС на равнинах не строили. Первой плотиной на пути «большой воды» был гидроузел Железные ворота на границе Сербии и Румынии, где Дунай течет по узкой долине в Восточно-Сербских горах. Паводковая волна в этом месте значительно ослабла. Румыния предварительно провела сброс на двух дунайских ГЭС, что также ослабило паводок. Однако полностью избежать последствий натиска водяного вала не удалось: наводнение затронуло около трети территории страны. Был нанесен ущерб, составляющий 8 млн. долларов, погибло 2 человека.

Другие страны, расположенные в нижнем течении Дуная — Болгария, Молдова, Украина — практически не пострадали от разлива Дуная. В Одесской области было отмечено некоторое повышение уровня. В отдельных местах из-за обильного дождя и сильных порывов ветра были размыты автострады, железные дороги, нарушены линии электропередач.

Страны, находящиеся в бассейне реки Эльбы — Чехия и Германия — сильно пострадали от наводнений. В середине августа, еще не оправившись от наводнений, которые были в начале месяца, из-за проливных дождей и подъема уровня воды в реках Влтава, Лаба (чешская часть р. Эльбы) и Эльбы, Чехия и Германия подверглись новому, более значительному чем предыдущие, наводнению.

14 августа уровень воды в районе Праги в столичной части р. Влтавы поднялся до отметки, которой не наблюдали последние 100 лет. Дамбы, возведенные для защиты от наводнения в Праге,

не выдержали напора воды. Вода хлынула в здания министерств, посольств, были отключены газ, электричество и другие средства жизнеобеспечения. Водой было затоплено одиннадцать станций метро. Расход воды р. Влтавы в районе Праги составил 2200 м³/с при среднегодовой норме 143 м³/с. В округе Праги Катлин глубина воды на улицах достигала 2 м. Были затоплены некоторые исторические памятники и здания чешской столицы, подвальные помещения Дворца чешской филармонии, Национального театра.

Вода продолжала прибывать. Спасательные службы извлекали людей из подтопленных домов. Сорвавшиеся с якорей суда угрожали разрушением мостов. Эти суда были взорваны и затоплены. В ночь на пятницу 16 августа уровень воды снизился на несколько десятков сантиметров. Ранее эвакуированные из центральных районов Праги люди начали возвращаться в свои дома. Всего в чешской столице было эвакуировано 70 тысяч человек, в целом по стране — 200 тысяч.

К тому времени на севере Чехии ситуация осложнялась. Уровень воды в р. Лабе в черте города Усти-над-Лабой достиг 8,5 м и продолжал повышаться. С якоря сорвалось 12 барж, которые представляли в сложившейся ситуации угрозу. Местные власти Устецкого края Чехии обратились к армии с просьбой предоставить танки, чтобы с их помощью удержать баржи на месте. В тот же день, 16 августа, уровень подъема воды в Лабе достиг своего максимального значения 12,5 м и пошел на спад.

Несмотря на то что уровень воды начал снижаться, положение в Чехии оставалось тяжелым: большая часть эвакуированных людей не могла возвратиться домой. Системы жизнеобеспечения все еще не работали, некоторым домам грозило обрушение. Отступавшая вода оставляла после себя толстый слой грязи и множество повреждений. К этому времени стало ясно, что многие исторические и культурные памятники Праги и других древнечешских городов серьезно пострадали, потребуют реставрации и надолго станут недоступными для туристов. В результате наводнения в Чехии погибло 11 человек, пропало без вести 40 человек. Материальный ущерб оценивается в 3 миллиарда евро. После ухода воды жители Праги оказались перед новой бедой — им может угрожать эпидемия. Кроме того, опасаясь разрушений, городские власти закрыли некоторые районы столицы. В Праге обрушились несколько домов — их фундаменты и несущие конструкции были размыты водой. В г. Нератовице наводнение привело к утечке ядовитого хлора с местного химического завода. Спасателям пришлось спешно ликвидировать аварию и перерабатывать хлор в безопасные веще-

ства. К счастью, удалось не допустить затопления самых старых и красивых исторических кварталов Праги. Выстоял и шедевр архитектуры XIV века — Карлов мост.

В августе 2002 г. паводок на р. Эльбе был дважды — в начале месяца и в середине. В субботу 10 августа из-за прохождения мощного циклона и проливных дождей уровень воды в р. Эльбе поднялся на 5,5 м. Была угроза затопления Дрездена и территорий промышленных предприятий. Однако дальнейшего повышения уровня воды в р. Эльбе не произошло, и такая угроза миновала. Самые сильные наводнения были отмечены в Баварии, Баден-Вюнтемберге и Нижней Саксонии.

Еще не были окончательно ликвидированы последствия этого паводка, как в середине августа прошли проливные дожди со значительно большим выпадением осадков, охвативших большую территорию бассейна р. Эльбы, что привело к катастрофическому наводнению. 15 августа в Германии водой были покрыты огромные территории. В Дрездене затоплены всемирно известные памятники культуры — Дрезденская картинная галерея, Оружейная палата, оперный театр, соборы и дворцы, отключено электричество, не работали телефоны. Германские военнослужащие провели экстренную эвакуацию пациентов из больниц в другие города страны, где не было наводнения.

Самая опасная ситуация сложилась в саксонском городке Торгау. Почти все его жители, около 19 тысяч человек, покинули свои дома. Уровень воды в реке поднимался со скоростью 2 — 3 см/ч и постепенно приближался к 10-метровой отметке.

В центре химической промышленности г. Биттерфельд 4-метровая дамба не выдержала, и вода залила треть города и его окрестности, где расположены 350 объектов химической промышленности. Последняя самая большая дамба защитила центр города. Началась полная эвакуация города с 16-тысячным населением. Экологической катастрофы не наступило, но канцлер Германии Шрёдер назвал это национальной катастрофой.

В городе Риза паводок разрушил двухколейный железнодорожный мост. Прекратилось железнодорожное сообщение Берлин-Лейпциг-Дрезден. В Дрезден можно было попасть только самолетом.

К 19 августа положение в Дрездене и других городах ниже по течению р. Эльбы усугубилось. Огромные массы воды из р. Влтавы докатились до р. Эльбы. В зоне затопления оказался Магдебург. Близ города Виттенберг было зафиксировано семь прорывов защитных дамб. Вода практически полностью затопила один из го-

родских районов. В этом округе из 38 населенных пунктов эвакуированы около 40 тысяч жителей. После прорыва дамбы близ Дессау сотни людей возводили заградительные сооружения из мешков с песком. В городе Биттерфильде затопления крупного комплекса химических предприятий не произошло.

По всей Саксонии уровень р. Эльбы находился в пределах от 9,5 м до 10 м. В соседней Баварии, находящейся в бассейне р. Дуная, обстановка начала нормализоваться: уровень воды снизился до нормального и его повышения далее не произошло. Воды р. Дуная в Баварии нанесли значительный ущерб городам Пассау и Регенсбург.

В Германии в результате наводнения погибло 19 человек и предполагалось увеличение количества погибших, так как 20 человек числились без вести пропавшими. После спада воды образовались озера. Для отвода воды в реки создавались каналы.

По словам канцлера Шредера наводнение нанесло Германии ущерб на многие миллиарды долларов, правительство выделит пострадавшим пакет помощи в размере 385 миллионов евро.

Однако после августовских событий стихия не успокоилась: наводнения в западной и центральной Европе повторялись. 2 сентября из-за обильных осадков наводнению подверглись Австрия и Швейцария. 10 сентября на юго-востоке Франции в районе Бушдю-Рон в бассейне р. Роны ливневые дожди шли непрерывно в течение 36 ч. В результате реки вышли из берегов и затопили многие населенные пункты. Полностью разрушена деревня Арамон из-за несвоевременного оповещения о надвигающемся наводнении.

Погибло 20 человек, 12 человек пропало без вести. Анализ последствий наводнений привел французов к выводу: необходимо более тщательно изучать грунтовые воды, так как их уровень влияет на последствия затоплений, необходимо создание 1 км заградительной дамбы.

Описанные катастрофические явления вызывают дискуссию в печати в двух направлениях: являются ли паводковые явления и катастрофические наводнения в небывалых масштабах, вызванные обильными осадками в западной, центральной и других частях Европы и мира, результатом глобального потепления, или это редко повторяющиеся естественные явления; какие следует принять меры для ограничения последствий наводнений. Первое — насколько интересно, настолько и бесплодно. Второе даст реальный результат — сократит количество человеческих жертв и размеры ущерба. Именно на этом вопросе должна сосредоточиться современная наука.

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕКИ РЕЙНА С УЧЕТОМ ПАВОДКОВ

Кроммер Р., доктор техн. наук (Университет Карлсруэ, Германия)

Как в России о Волге говорят «матушка», так в Германии существует выражение «батюшка-Рейн». О нем сложено множество песен, баллад, стихов, в том числе знаменитая легенда о коварной красавице-нимфе Лореляй, которая, сидя на прибрежном утесе, своим волшебным пением усыпляла бдительность моряков, отчего суда разбивались на порогах и тонули в бурных водах Рейна. По легенде, утес находился у крутой извилины реки, вблизи города Бахарах. Здесь до регулирования Рейна действительно часто происходили крушения. Так что легенда не беспочвенна, она отражает крутой нрав Рейна.

Рейн берет начало в Швейцарских Альпах и течет с юга на север по территориям 8 стран. Длина реки 1320 км, площадь водосбора 185 тыс. км². По берегам Рейна проживают более 50 млн человек, что свидетельствует об исключительной важности этой водной артерии для прибрежных стран и о высокой антропогенной нагрузке в бассейне. Основные притоки: Ааре, Майн, Мозель, Некар, Рур. Рейн принято делить на альпийский (до Боденского озера), горный (до Базеля), верхний (до Бингена), средний (до Бонна) и нижний (до устья в Голландии).

Рейн вдохновлял не только поэтов, но и художников. Так, художник Бирман в 1840 г. создал прекрасное полотно, запечатлевшее величественную реку. Специалисты-гидротехники смогли по ней уже значительно позже судить о том, как тогда выглядел Рейн: русло со множеством стариц, рукавов и островов.

На рубеже XVIII в. в Германии наблюдался резкий подъем во всех областях экономики. Интенсивно развивавшемуся сельскому хозяйству требовались новые площади, все больше людей селились на берегах. Бурно развивалось и судоходство по Рейну. Всему этому мешали частые и опустошительные наводнения. До устройства на берегах противопаводковых дамб по меньшей мере раз в год прибрежные города, поселки и сельхозугодья оказывались под водой. Доходило до курьезов. В средние века из-за частых наводнений и размыва русла город Брайзах на юге Германии периодически оказывался то на одном, то на другом берегу, что приводило даже к пограничным конфликтам. Для уменьшения ущерба от наводнений, улучшения условий судо-

ходства и снижения заболеваемости малярией в 1806 г. был предложен грандиозный для того времени проект — регулирование русла Рейна на участке от Базеля до Бингена.

Претворил его в жизнь выдающийся инженер-гидротехник Иоханн-Готтфрид Тулла, использовавший невиданную по тем временам технологию выемки грунта — это делала сама река, направляемая в специально устроенные траншеи. Чтобы спрямить русло, излучины соединялись прорезями, которые потоком размывались до проектной ширины. Сегодня этот метод называют методом пионерной траншеи. В итоге, в 1824 — 1848 гг. верхний Рейн спрямили дамбами обвалования. Иными словами, река стала каналом трапециевидного сечения шириной 220 м и глубиной 2,5 — 2,8 м. Осуществилась вековая мечта крестьян — их земли больше не заливало в паводки, не пропадали урожаи, не погибал скот. Перестало страдать население и от малярийного комара. Не меньше крестьян радовались и судовладельцы — исчезли опасные пороги и стремнины. За это свершение еще при жизни Тулла во многих городах Германии ему поставили памятники. Последствий регулирования Рейна тогда еще никто не предвидел.

Рейн — важнейший источник возобновляемой и экологически чистой энергии для многих стран. Верховья Рейна — колыбель гидроэнергетики в Европе. Здесь в 1880 г. построена ГЭС Рейнфельден — одна из старейших в мире, действующая и поныне. На Рейне возведен каскад гидроузлов из 21 ГЭС. Из них 11 — в германо-швейцарской, а 10 — в германо-французской концессиях. Все гидроузлы низконапорного типа, рабочий напор на турбинах 11 — 16 м (рис.1).

Общая мощность германо-французских гидроузлов 1400 МВт (примерно как у Чебоксарской ГЭС). Годовая выработка электроэнергии составляет 8,6 млрд кВт·ч (70% подается в Германию). На более старых ГЭС используются вертикальные турбины Каплана (поворотнлопастные), а на построенных в 1960 — 1970-х годах — горизонтальные (капсульные агрегаты), которые из-за малых рабочих оборотов не повреждают попавшую сюда рыбу (рис. 2).

Энергетическая сеть Германии входит в Единую энергетическую сеть ЕС. Управляют ею из центральной диспетчерской, находящейся в местечке Кюмоос. Диспетчерская может работать в автоматическом режиме и позволяет оперативно регулировать напряжение и частоту в сети, переключать и разгружать перенапряженные сети, быстро выявлять аварийные ситуации и оперативно их устранять (последнее особенно важно, ибо позволяет

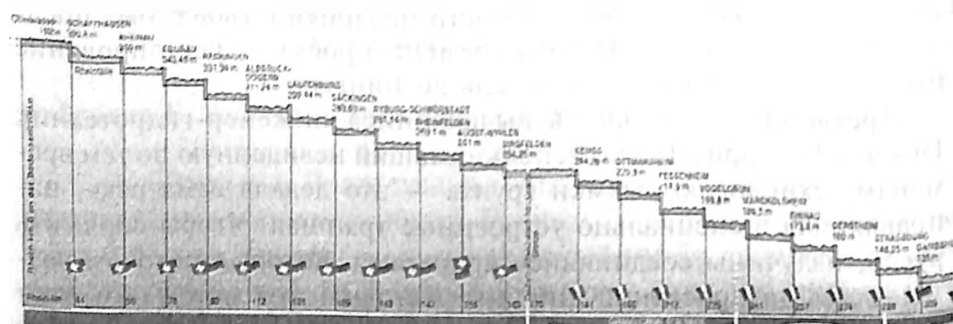
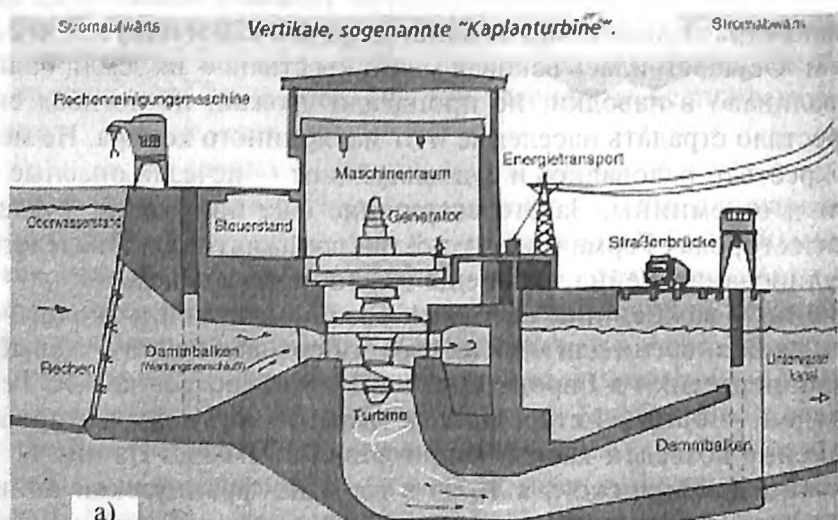
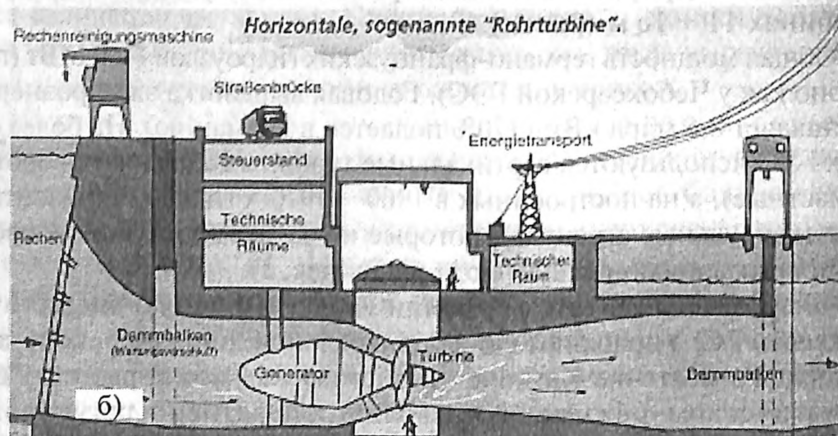


Рис. 1. Каскад Рейнских гидроузлов [1].



a)



b)

Рис. 2 Типы турбинного оборудования ГЭС Рейнского каскада [1]:
а — вертикальный гидроагрегат турбиной Каплана,
б — горизонтальный гидроагрегат

снизить число аварий с тяжелыми экологическими последствиями). Диспетчерская оснащена компьютерной техникой и современными средствами наблюдения, автоматизации и телемеханики. Так, связь со всеми электростанциями при аварии или отказе обеспечивается по телефонному кабелю, через спутник и Интернет.

В связи с высокой плотностью населения и предприятий с 1930-х годов резко ухудшились качество воды в Рейне и экологическая ситуация в целом. Это во многом усугублялось авариями на многочисленных химических предприятиях, расположенных в прибрежных зонах. Поэтому в 1950 г. по инициативе Германии и Голландии была создана Международная комиссия по защите Рейна, в которую вошли представители всех государств, расположенных у Рейна. Ее резолюции были направлены в основном на обеспечение экологической безопасности в бассейне и прекращение сбросов промышленных стоков в Рейн и оказались услышанными правительствами.

В 1960 – 1970-х годах предприятия начинают создавать системы промышленного водопользования замкнутого типа и устройства для очистки промышленных стоков. Используются при этом главным образом безотходные технологии. Одна из них — обжиг твердых остатков (продуктов очистки стоков) и их дальнейшая утилизация, например в цементной промышленности. Горючие газы, выделяемые при очистке стоков, служат для выработки электроэнергии.

Все это быстро сказалось на качестве воды в Рейне. К 1985 г. соли тяжелых металлов практически перестали поступать в реку. С 1990 г. не попадают в воду и такие опасные для всего живого вещества, как хром, никель, медь, диоксины, дихлофос и т. п. Конечно, комиссии пришлось преодолевать и серьезные трудности. Связаны они были в основном с различием стандартов отдельных стран по качеству воды. Скажем, в Германии требования к чистоте воды были строже, чем во Франции, откуда в Рейн поступала менее очищенная вода. Ныне эти различия практически устранены.

Для ведения непрерывного экологического мониторинга в бассейне создана сеть экологического оповещения, оснащенная по последнему слову техники для тщательного контроля качества воды (рис. на цветной вкладке). В Германии мониторинг осуществляется не только в бассейне Рейна, но и на всей территории страны, которая, в соответствии с водным законодательством, разделена на зоны ведения наблюдений. Это позволяет уже на ранних стадиях определить источники загрязнения воды, быстро их локализовать и устранить. Мониторинг водных источников и их водосборов проводится в тесном взаимодействии с водной

полицией, которая обладает исключительными правами контроля предприятий, использующих воду из природных источников.

С точки зрения судоходства Рейн — самая загруженная река мира (более 40 млн. т грузов в год). В среднем течении (у Страсбурга) проходят до 120 судов в день. Для обеспечения судоходства все гидроузлы оборудованы судоходными шлюзами, способными пропускать одновременно до 4 барж общей грузоподъемностью 8,8 тыс. т (шлюзование занимает не более 20 мин.).

В 1987 г. комиссия приняла программу дальнейшего улучшения состояния реки. Основная ее цель — постепенное восстановление пойменных земель, а также флоры и фауны в том многообразии, которое было здесь до сооружения противопаводковых дамб. Особое значение придается восстановлению стада рейнского лосося, снискавшего заслуженную славу из-за отменных вкусовых качеств (еще римские императоры отправляли за ним на Рейн гонцов). Для этого на всем протяжении реки построили новые и модернизировали существовавшие рыбопропускные сооружения. На двух ГЭС Рейнского каскада возвели самые большие в Европе рыбоходы лестничного типа. Результаты не замедлили сказаться — лосось вернулся в реку не к 2000 г., как предполагали ихтиологи, а уже в 1995 г.

Одним из негативных последствий регулирования русла стало уменьшение площади поймы на участке от Базеля до Карлсруэ почти на 60%. По этой причине осложнилась паводковая ситуация ниже по течению. Особенно остро это ощущается в устьях притоков, так как пики паводков на Рейне и притоках почти совпадают по времени (рис. на цветной вкладке). Отсюда возникает своеобразный суммарный эффект наложения паводковых волн боковых притоков на паводковую волну самого Рейна. В итоге пики паводков резко возрастают. Поэтому в многоводные годы отмечается затопление крупных городов в нижнем течении (Кёльн, Бонн, Кобленц и др.). Программа возрождения Рейна поможет противостоять и этому: реке возвращают пойму. Комиссия предлагает в ближайшие десятилетия восстановить весь ранее зарегулированный участок Рейна в тех очертаниях, которые река имела до 1816 г., с поэтапной разборкой всех возведенных дамб. Эта идея находит все большую поддержку среди специалистов (в первую очередь, экологов). Возникли даже общественные движения, собирающие средства для выкупа территорий в зоне бывшей поймы, чтобы после возрождения вернуть их природной системе Рейна.

Экологически безопасная и безотходная технология используется и при утилизации плавника и мусора, поступающих в половодье

в большом количестве к решеткам водоводов турбин. На всех гидроузлах перед решетками водоприемников установлены автоматические или полуавтоматические очистные устройства, подающие собранный мусор и плавник в специальные контейнеры. Из них плавник поступает на технологические комплексы по переработке растительных отходов в компост, который здесь же расфасовывается и реализуется населению или фирмам, занимающимся озеленением.

Еще одна проблема, возникшая после спрямления русла и строительства каскада гидроузлов, — интенсивная донная эрозия в низовьях реки (ниже последней ГЭС). Вызвано это тем, что в водохранилищах вода отстаивается, отчего размывающая способность потока за каскадом повышается. В результате дно опускается, и понижается не только уровень в самом русле, но и уровень грунтовых вод, что ведет к гибели пойменных лесов, обеднению биоразнообразия. После длительных гидрологических исследований, в том числе и учеными нашего университета, проблему удалось решить. Перед участком размыва подается гравийно-песчаная смесь, которая, откладываясь на дне, образует русловую отмостку, препятствующую эрозии. Этот способ применяется на Рейне уже более 20 лет и способствует сохранению растительного и животного мира в пойме.

Итак, за короткий срок (15 – 20 лет) экологическое состояние реки кардинально улучшилось. Ныне в нее не сбрасывают вредные для экосистемы вещества. При очистке промышленных и коммунальных стоков используют замкнутые циклы и безотходные технологии. Действенность этих мер в рамках концепции устойчивого развития подтверждают растущие богатство и разнообразие биоты в самой реке, ее пойме и, похоже, во всем бассейне. В реку вернулись особо чувствительные к чистоте воды рейнский лосось, сельдь, форель и другие благородные виды рыб. В поймах прижились почти исчезнувшие здесь тростниковый кабан, пятнистая цапля и многие другие редкие виды как животных, так и растений.

Хотелось бы надеяться, что накопленный богатый опыт комплексного использования р. Рейн при сочетании технических и технологических ноу-хау с требованиями по охране окружающей среды окажется полезным и для природопользования в зоне больших и малых рек России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Waller A., Wiest C. Der Rhein - Erbe und Zukunft. 1997.
2. Der Rhein auf dem Weg zu vielseitigem Leben. IKSR. 1994.
3. Salmon 2000, International Commission for the Protection of the Rhine. 1994.
4. Internetseiten der IKSR; www.iksr.org/iksr.

ПАВОДКИ, ИХ ПРИЧИНЫ И НЕОБХОДИМОСТЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

*Гусев А.В., кандидат физ.-мат. наук,
Малинецкий Г.Г., доктор физ.-мат. наук (Институт прикладной
математики им. М.В. Келдыша РАН),
Семенченко Б.А. кандидат геогр. наук (МГУ им. М.В. Ломоносова)*

*Опыт — самый лучший учитель, только
плата за обучение слишком велика.*

Томас Карлейль.

В настоящее время Россия входит в ту фазу системного кризиса, в которой негативные тенденции последних пятнадцати лет в экономической, социальной и техногенной сферах не только существенно усугубляют последствия «традиционных» катастроф (таких, например, как паводки, наводнения, сели и т.д.), но начинают приводить и к новым типам аварий и катастроф, причиной которых могут являться сбои в высокотехнологичных производствах или даже умышленное использование современных технологий для разрушения объектов (в том числе гидротехнических), влекущее за собой крайне тяжкие последствия.

Решение таких проблем должно быть системным, опирающимся на одиннадцатилетний опыт работы МЧС России, ликвидировавшего последствия аварий, катастроф, стихийных бедствий. Отдельные аспекты этого системного подхода нашли отражение в книгах [1, 2, 3, 4]. Ряд работ посвящён анализу этого круга проблем с позиций нелинейной динамики и междисциплинарных исследований [5, 6, 7].

Попробуем сформулировать два основополагающих направления действий, адекватных новой ситуации и тем проблемам, с которыми сталкивается сейчас как Россия, так и всё человечество в целом.

Прогноз и предупреждение кризисных явлений. Если ещё несколько лет назад можно было говорить об управлении рисками, как о комплексе мер, позволяющих от ликвидации и смягчения последствий произошедших бедствий и катастроф перейти к прогнозу и предупреждению катастроф будущих, то сегодня этого недостаточно. Знаковые катастрофы последних лет показали, что рядовые «технические» решения могут повлечь длинную цепь причин и следствий, приводящую к трагическим последствиям и ог-

ромным потерям. Поэтому приходится анализировать возможные неблагоприятные события (в том числе аварии и катастрофы) в более широком системном контексте, а именно как возможный «спусковой механизм» для кризисов различного типа.

Научный мониторинг. Система сбора и анализа информации, ныне существующая в нашей стране, неадекватна задачам управления стратегическими рисками, прогнозированием и предупреждением кризисных явлений. Более того, объём и содержание информации, необходимой для серьёзной научной поддержки принимаемых решений, быстро меняется и, что особенно негативно, год от года эта информация становится всё скуднее. Существенно уменьшилось количество метеорологических спутников, гидрологических станций, увеличился также временной интервал поступления информации от ещё действующих.

Характерный пример — трагедия в Кармадонском ущелье. Самое обидное, что человеческих жертв можно было бы избежать, используя прежние, не такие уж и дорогостоящие ресурсы. Достаточно было оперативно получать информацию со спутника наблюдения. На спутниковых фотографиях, снятых более чем за сутки до схода ледника, видна большая поперечная трещина, послужившая причиной схода. Еще было время спасти людей, но в нынешних условиях слишком дорого получать информацию сразу, теперь действует режим накопления и сброса данных один раз в неделю. О какой же оперативности тут можно вести речь? И неужели можно положить на одну чашу весов около сотни человеческих жизней, а на другую копеечную экономию средств? Заметим, что США практически сразу после наводнений в Европе и трагедии в Кармадоне запустили несколько спутников для мониторинга движения льдов, исследования океанских течений. Мало кто обратил внимание на то, что самые мощные американские компьютеры (типа «Blue Pacific», «Blue Mountain») используются не только для игры в шахматы и расчёта ядерных процессов, но и, прежде всего, для обработки информации, поступающей со спутников практически в реальном времени (конечно, для разных целей). Внезапный и мощный сель, паводок, наводнение могут нанести больший ущерб, чем ядерный взрыв. И от таких явлений ни одна противоракетная оборона не защитит.

Единственным выходом из сложившейся ситуации является воссоздание и упрочение системы научного мониторинга, а также оперативность реагирования на критические ситуации, привлече-

ние ряда ведущих коллективов для обработки и анализа имеющейся информации, обеспечение необходимых информационных потоков и оперативное использование в полной мере как уже имеющихся источников и методик, так и создание новых.

Очевидно, что необходимо развивать принципиально новые, междисциплинарные методы. К ним относятся синергетика и нелинейная динамика. Важно подчеркнуть, что риски, угрозы, катастрофы перестали быть отраслевыми. Они переросли в междисциплинарные, поэтому и анализировать их надо, используя соответствующие подходы. От нелинейной динамики, системного анализа, компьютерного моделирования требуется глубокое исследование механизмов катастроф, новые методы прогноза и мониторинга, выработка сценариев как проектных, так и гипотетических аварий. Использование методов нелинейной динамики [5] позволило выявить общие закономерности при математическом моделировании таких разнообразных процессов, как землетрясения, лавины, биржевые крахи, наводнения, утечка конфиденциальной информации и т.п. Другими словами, существует единый подход по множеству различных рисков.

Для последних нескольких лет характерно буйство водной стихии — паводки, наводнения, сопровождавшиеся многочисленными жертвами и разрушениями. И это прослеживается по всему миру: Кубань, Приморье, Германия, Австрия, Бельгия, Китай, и т. д. Очевидно, что причина не одна, и очевидно также, что во многом необходимо учитывать наряду с природными и антропогенный фактор.

Человечество не всегда способно проанализировать все возможные последствия своего вмешательства в природные ландшафты Земли. Осушая болота, вырубая леса (нарушая естественный дренаж), обычно думают о сиюминутных выгодах, не рассматривая природу как единый сбалансированный живой организм.

Остановимся на паводках и качественном увеличении антропогенного влияния на их параметры. Паводком, как известно, называется интенсивный подъем уровня воды в реках и водоемах. Если этот подъем превышает критический уровень, то вода выходит из берегов на сушу и начинается наводнение.

Наводнения, начиная со Всемирного потопа, известны, как самые массовые стихийные бедствия. Поскольку паводки определяют критерии риска наступления наводнений, их изучению посвящено большое количество теоретических и экспериментальных исследований в области гидрометеорологии.

В классической литературе рассматриваются в основном три группы паводков:

1. Паводки, вызванные метеорологическими факторами, такими как ливневые осадки в бассейнах рек, быстрое таяние снега и льда на склонах водосбора. Это паводки дождевого, снегового и смешанного снего-дождевого происхождения.

2. Паводки, вызванные или усиленные русловыми условиями либо другими местными факторами. К этой группе относятся: паводки, вызванные или усиленные заторами во время весеннего или осеннего ледохода; паводки, вызванные или усиленные подпорами от мостов, гидротехническими сооружениями или завалами в руслах рек; паводки, вызванные или усиленные прорывами плотин и береговых дамб.

3. Селевые паводки, вызванные совместными действиями метеорологических факторов и геоморфологических особенностей рельефа водосбора и русл рек: накоплением наносов на склонах и в руслах рек и их размывом или смывом.

Русловые условия и иные местные факторы, а также хозяйственная деятельность человека зачастую многократно усиливают пики паводков, вызываемых метеорологическими факторами. Иными словами, ту мину, которую подложил под себя Человек своей неразумной хозяйственной деятельностью, может подорвать относительно интенсивный ливень или снегопад. Последнее обстоятельство заставляет выделить в рамках изложенной выше классификации, две категории паводков:

антропогенные паводки, вызванные преднамеренным, либо случайным разрушением гидротехнических сооружений (плотин, дамб, оросительных систем и др.);

естественно-антропогенные паводки, возникающие вследствие поступления ливневых или талых вод и последующего частичного либо полного разрушения гидротехнических систем, в сочетании с нарушением режима эксплуатации, отсутствием, либо недостаточностью выполнения регламентных и профилактических работ на этих сооружениях.

В последнем варианте последствия паводка и наводнения бывают наиболее тяжелыми. Это обусловлено, с одной стороны, внезапностью явления, а, с другой, «эффектом домино», т.е. последовательным, цепным разрушением гидротехнических и ирригационных сооружений вниз по течению и достижением катастрофических масштабов наводнения. Подобное наблюдалось в 2002 г. на реке Кубань в Краснодарском крае.

При отсутствии единой межотраслевой системы научного мониторинга, управления риском, программы повышения системной устойчивости техносферы уровень технологического риска всё более возрастает. Последний в настоящее время в России по ряду позиций во много раз превышает уровень развитых стран мира. Сейчас в России в опасном состоянии находятся крупные мосты, эстакады, дамбы, плотины, водохранилища которых сдерживают кубические километры воды. Многие небольшие водохранилища заброшены и не контролируются, превращаются в бомбу замедленного действия из-за упомянутого выше «эффекта домино».

Отсутствие единой системы мониторинга делает напрасными усилия учёных по разработке новых методов прогнозирования катастроф. Да, есть новые эффективные методы нелинейной динамики, есть мощные компьютеры, но что от них толку, если данные, которые надо было обработать две недели назад, поступят, когда уже грянул гром. Ведь существующие методы должны увязать массу факторов, которые, к сожалению, относятся к разным ведомствам. Катастрофу проще предупредить, чем затем ликвидировать ее последствия.

Опасность многократно усиливается в связи с нарастанием возможности осуществления актов терроризма. Появились реальные угрозы катастроф национального уровня, подобных Чернобылю. Также нельзя не учитывать использования новых технологий далеко не по их прямому назначению. В XXI век мы входим с угрозой техногенной аварийности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Владимиров В.А., Воробьёв Ю.Л., Малинецкий Г.Г. и др. Управление риском. Риск, устойчивое развитие, синергетика. М.: Наука. 2000.
2. Катастрофы и общество. М.: Контакт-Культура. 2000.
3. Глобальные проблемы как источник чрезвычайных ситуаций. М.: УРСС. 1998.
4. Семенченко Б.А. Физическая метеорология. М.: Аспект Пресс. 2002.
5. Воробьёв Ю.Л., Малинецкий Г.Г., Махутов Н.А. Управление рисками и устойчивое развитие. Человеческое измерение //Общественные науки и современность. 2000. №4.
6. Малинецкий Г.Г., Курдюмов С.П. Нелинейная динамика и проблемы прогноза //Вестник РАН. 2001. Т71. №3.
7. Малинецкий Г.Г., Гусев А.В., Митин Н.А. и др. Кризисы современной России и система научного мониторинга. Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. 2002. №56.

ВЫБОР МАКСИМАЛЬНОГО РАСХОДА ПАВОДКА ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ СРОКЕ СЛУЖБЫ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ

Лятхер В.М., доктор технич. наук (ОАО «НИИЭС»)

В IX веке, во времена Маннинга и Гангилье, опытные гидротехники, проектировавшие и строившие плотины, руководствовались простым правилом выбора расчетного расхода паводка - наблюдаемый в пределах жизни одного поколения максимальный расход удваивался. Примерно через сто лет этому простому правилу было дано убедительное статистическое подтверждение [1]. Предлагаемая статья развивает тему выбора расчетного расхода паводка с учетом длительности эксплуатации гидротехнического сооружения. «Отцы-основатели» гидротехнической практики при назначении расходов для расчета временных сооружений поступали так же просто, как и с расчетным расходом для всего периода эксплуатации - временное сооружение рассчитывалось на максимальный наблюдаемый расход (период наблюдений обычно не превышал 100 лет). Оказывается, и эта рекомендация не лишена статистического основания.

Рассмотрим последовательность максимальных расходов паводков, расположенных в возрастающем порядке Q_i ($i = 1, 2, \dots, n$). Если n достаточно велико, то вероятность p_i того, что расход паводка Q в любой год будет больше расхода Q_i , равна

$$p_i \approx 1 - (i/n + 1).$$

Согласно СНИП СН-435-72 для сооружений 1-го класса капитальности $p_i = 10^{-4}$. Это означает, что с вероятностью $p = 50\%$ за 10 тыс. лет паводковый расход не превысит расход $Q_i = Q$ ($p_i = 10^{-4}$). Вероятность p можно увеличить, например, до 95%, вводя гарантийную поправку к расчётному расходу, т.е. увеличивая его до некоторого значения Q_M , называемого максимальным расчетным расходом. Действующие нормативы можно интерпретировать и иначе, если ввести понятие о расчётном сроке службы сооружения. Таким сроком службы для сооружений, разрушение которых вызовет национальную катастрофу, должен быть период не менее трёх поколений наиболее продолжительных человеческих жизней, т.е. примерно $T_p = 300$ лет. Зная поверочный расход Q_M , можно определить абсолютную вероятность его превышения за 300 лет и эту вероятность считать мерой допустимого риска для условий, когда сооружение должно работать, например, не 300, а 30 лет.

События, состоящие в превышении расчётных расходов, образуют ансамбль редких событий, для которых почти наверное справедливо распределение Пуассона, согласно которому вероятность осуществления m событий за время τ равна

$$p^{(m)} = (\tau/\tau_0)^m / m! \exp - \tau/\tau_0, \quad (1)$$

где τ_0 — средний интервал между событиями. В частности, вероятность того, что за время τ не произойдёт ни одного события ($m = 0$), оценивается величиной

$$p_0 = \exp - \tau/\tau_0.$$

Таким образом, вероятность превышения расчётного паводка Q_M со средним интервалом между этими расходами $\tau_M = 1/p_M$ ($\tau_M > 10^4$ лет) за период T_p оценивается величиной

$$p_p = 1 - \exp - T_p/\tau_M. \quad (2)$$

Величину p_p примем в качестве меры риска при назначении расходов, отвечающих различным периодам эксплуатации сооружения.

Из формулы (2) видно, что при сохранении p_p и сохранении вида распределения вероятностей (1), но при изменении расчётного срока эксплуатации сооружения T_i должно выполняться условие

$$T_i/\tau_i = T_p/\tau_M \quad (3)$$

или

$$p_i = 1/\tau_M T_p/T_i = p_M T_p/T_i \quad (4)$$

Связь между обеспеченностью $p_i = 1/\tau_i$ и величиной максимального расхода Q_i , как было показано Э.Гумбелем [1], обычно выражается одним из трёх типов экстремальных распределений. Для малых обеспеченностей $p_i < 0,1$ эти формулы имеют следующий вид:

Распределение 1-го типа:

$$p_i \approx \exp - \alpha (Q_i - Q_0), \quad (5)$$

где $Q_0 = \langle Q \rangle - 0,577/\alpha$, $\langle Q \rangle$ — средний максимальный расход паводков, $\alpha \langle Q \rangle = 1,282/C_v$, C_v — коэффициент вариации максимальных расходов.

Распределение 2-го типа:

$$p_i = (Q_i/\langle Q \rangle)^{-\beta} \Gamma^{-\beta} (1 - 1/\beta), \quad (6)$$

где Γ — гамма-функция, параметр β связан с коэффициентом вариации C_v

$$C_v = [\Gamma(1 - 2/\beta) / \Gamma^2(1 - 1/\beta) - 1]^{1/2}. \quad (7)$$

Конкретные результаты получим, задаваясь соотношением периодов T_p/T_i , средним интервалом τ_M между расчетными расходами, регламентированными СНИП, коэффициентами вариации C_v для статистических рядов максимальных расходов.

Рассмотрим пример, полагая справедливым распределение 1-го типа.

Из (5) находим:

$$-\ln p_i = 1,282/C_v (Q_i/\langle Q \rangle - 1 + 0,577 C_v / 1,282) = 1,282 (Q_i/\langle Q \rangle) / C_v - 1,282/C_v + 0,577. \quad (8)$$

При $p_i = p_M$ имеем:

$$-\ln p_M = 1,282 (Q_M/\langle Q \rangle) / C_v - 1,282/C_v + 0,577. \quad (9)$$

Подставив (4) в (8), получим:

$$-\ln p_M - \ln T_p/T_i = 1,282 (Q_i/\langle Q \rangle) / C_v - 1,282/C_v + 0,577. \quad (10)$$

Из (10) и (9) найдем:

$$\ln T_p/T_i = 1,282 (-Q_i/\langle Q \rangle + Q_M/\langle Q \rangle) / C_v = 1,282 (Q_M/\langle Q \rangle) (1 - Q_i/Q_M) / C_v. \quad (11)$$

Из (11) и (9) следует:

$$\ln T_p/T_i = (1,282/C_v - 0,577 - \ln p_M) (1 - Q_i/Q_M),$$

$$Q_i/Q_M = 1 - [\ln(T_p/T_i) / (1,282/C_v - 0,577 - \ln p_M)]. \quad (12)$$

Полагая $p_M = 10^{-4}$, можно вычислить Q_i/Q_M в зависимости от T_p/T_i и C_v . В табл.1 приведены результаты расчётов, соответствующие периодам эксплуатации $T_i = 5, 10$ и 20 лет.

Таблица 1

Относительная величина расчётного расхода наводка Q_i/Q_M в зависимости от расчётного периода T_i эксплуатации сооружения при различных C_v

C_v	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
T_i , лет						
5	0,727	0,654	0,619	0,599	0,586	0,577
10	0,775	0,714	0,685	0,669	0,658	0,650
20	0,820	0,771	0,748	0,735	0,727	0,719

Результаты, приведённые в табл.1, показывают, что учёт реального срока эксплуатации сооружения может значительно снизить расчётный максимальный расход. Качественно аналогичные результаты получаются при использовании экстремального распределения 2-го типа (6), для которого расчётная формула получается особенно простой:

$$Q_i/Q_M = (T_i/T_p)^{1/\beta}. \quad (13)$$

Соотношения между C_v и β определены формулой (7) и табл. 2.

Таблица 2

Соотношение между параметрами β и C_v по (7)

β	2,5	3	4	5	6	8
C_v	1,035	0,683	0,419	0,350	0,235	0,202

Расчёты по (13) и табл.2 дают относительно более сильную зависимость $Q_i/Q_M = f(T_i/T_p)$, чем это наблюдается по табл.1.

Фактическая зависимость $Q_i/Q_M = f(T_i/T_p)$ может быть уточнена по эмпирическим данным о распределении максимумов расходов для конкретного района.

Приведенные результаты справедливы в случае, если последовательность паводковых расходов является статистически стационарной, а соседние паводки независимы. Оба эти допущения сомнительны. Во-первых, климат Земли не остается постоянным, но меняется, прежде всего, под влиянием изменений состояния Солнца. В частности, среднегодовая температура атмосферы Земли, режим ветров и перенос влаги оказываются тесно коррелированными с длиной солнечного цикла, изменяющегося в достаточно широких пределах [2, 3]. Кроме того, заметное влияние на величину максимального расхода могут оказать изменения ландшафтов под влиянием деятельности человека. Влияние этих изменений, проявляющееся, прежде всего, в распределении паводкового стока во времени, можно несколько уменьшить, заменив в проведенном рассмотрении максимальный расход паводковым стоком. Вопрос об изменении продолжительности паводка под влиянием ландшафтных изменений более ясен, хотя и требует специального исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. М.: Мир. 1965.
2. Lassen K., Friis-Chistensen E. Variability of the solar cycle length during the past five centuries and apparent association with terrestrial climate. //Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 1995. vol.57. №8.
3. Лятхер В.М. Экологический комплекс Каспийского и Аральского морей. М.: Изд-во Спутник. 2002.



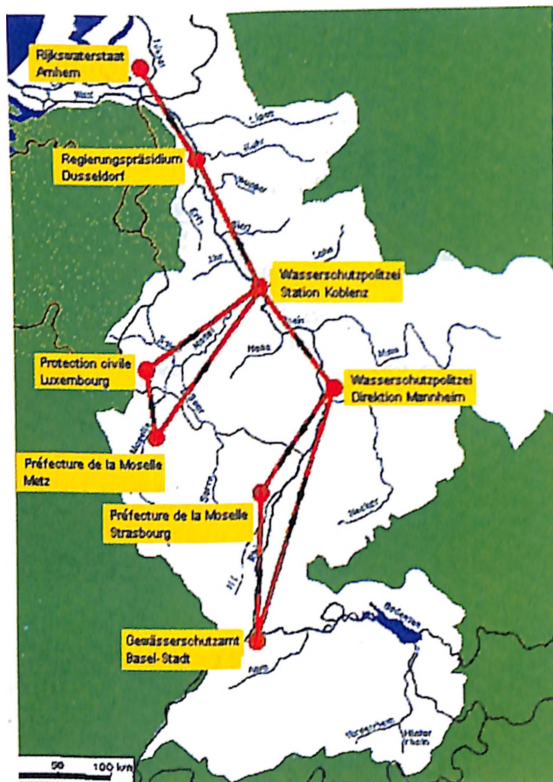
Затопление района города.



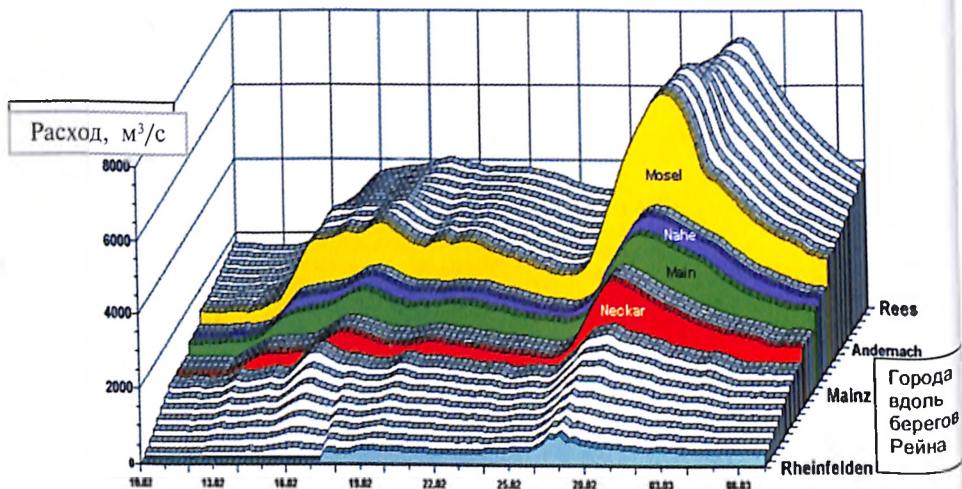
Защита территории укладкой мешков с песком (вид после спада паводка).

Паводок на р. Влтаве в районе Чешске Будеевицы, Чешская республика
(фото В.П. Середавкина).

(к статье Орешкина О.Ф., Прудовского А.М.)

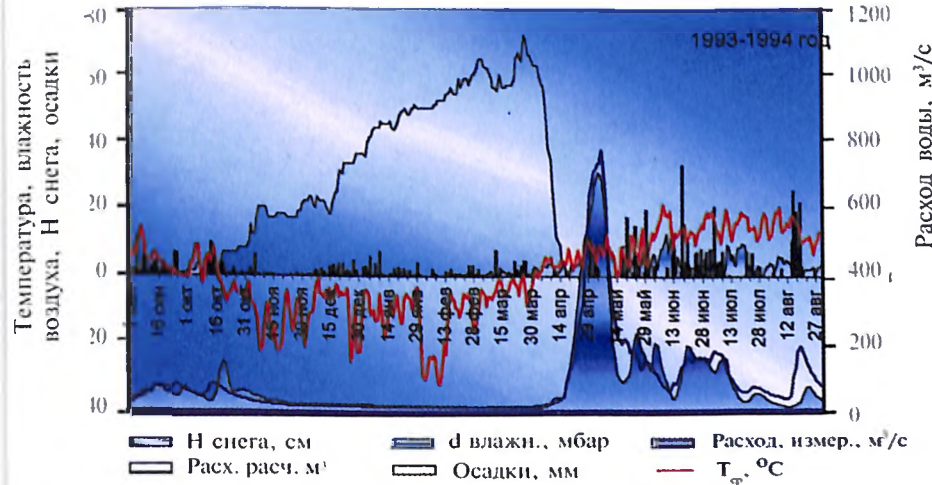
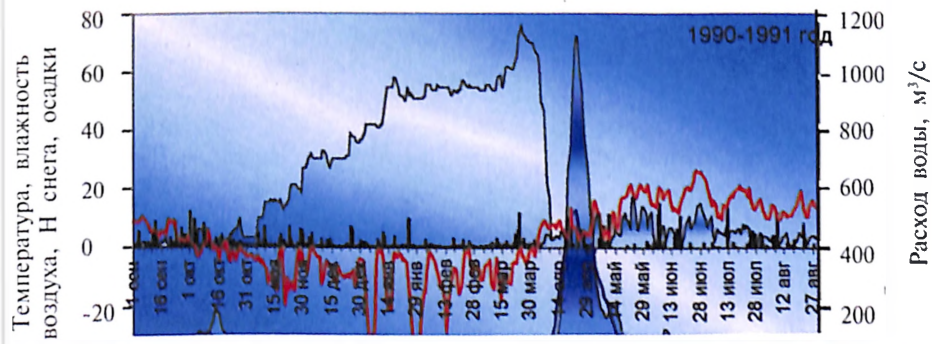


Мониторинговая сеть в бассейне реки Рейна [2].



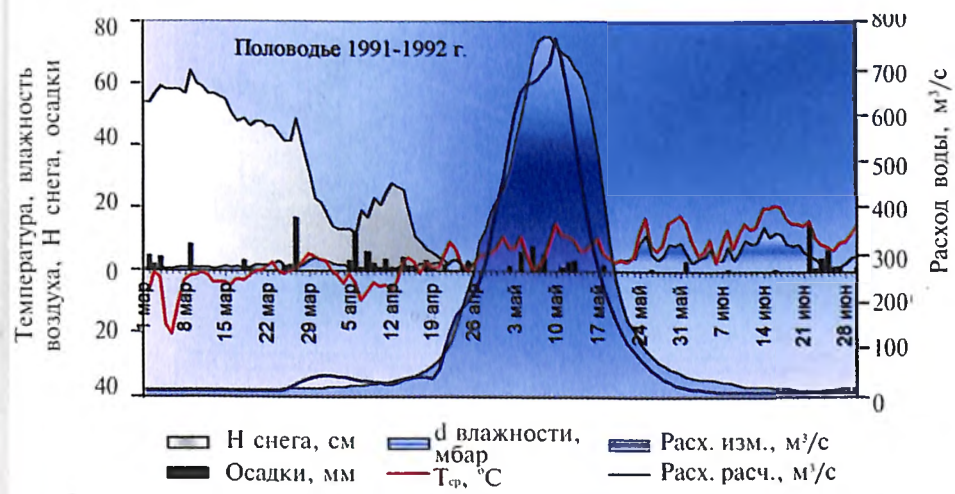
Пример эффекта наложения волн паводков рек-притоков Мозель, Наэ, Майн и Некар на паводковую волну реки Рейна [4].

(к статье Кромера Р.)



■ Н снега, см ■ d влажн., мбар ■ Расход. измер., м³/с
 □ Расх. расч. м³ □ Осадки, мм — T_ф, °C

Колебания гидрометеорологических элементов смоделированных и фактических гидрографов стока реки Лузы (створ Объячево) за 1990-91 и 1993-94 гг.

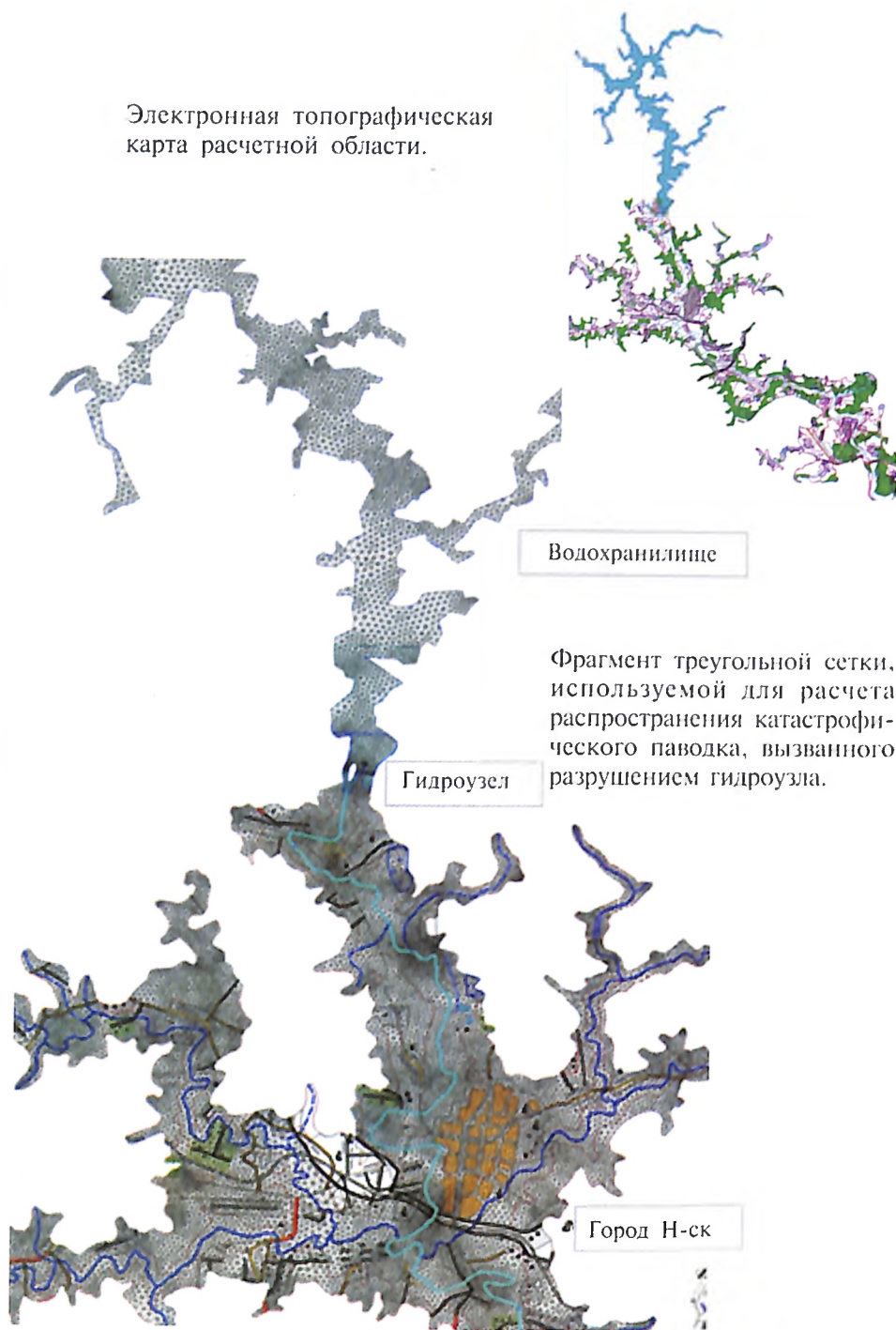


□ Н снега, см ■ d влажности, мбар ■ Расх. изм., м³/с
 ■ Осадки, мм — T_ф, °C — Расх. расч., м³/с

Колебания гидрометеорологических элементов смоделированных и фактических гидрографов стока р. Лузы (створ Объячево).

(к статье Горина С.Л.)

Электронная топографическая
карта расчетной области.



(к статье Беликова В.В., Милитеева А.Н., Прудовского А.М., Родионова В.Б.)

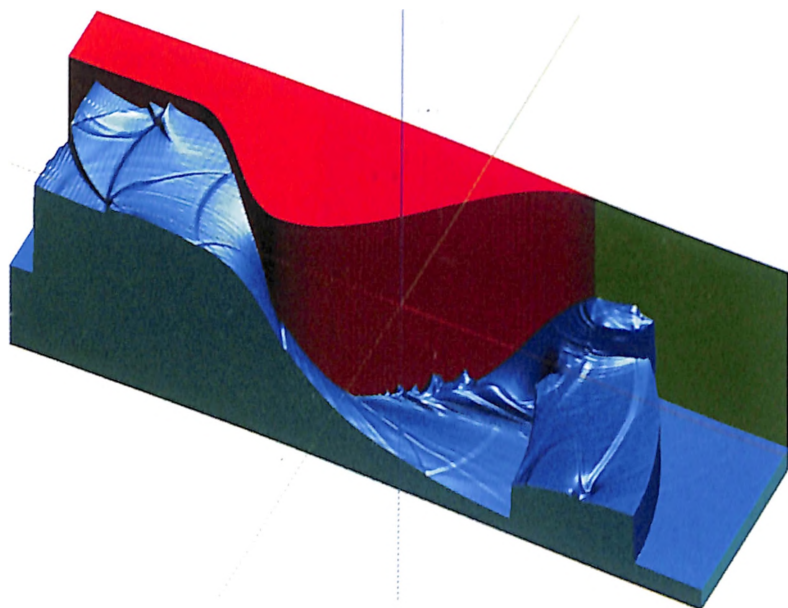


Векторное поле скоростей течения и горизонтали водной поверхности в районе мостового перехода через 2 ч после начала паводка.

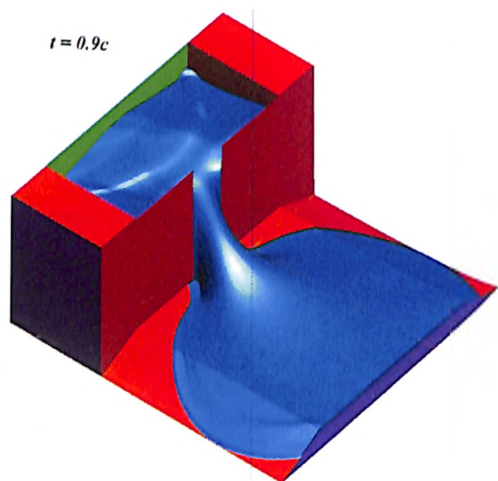
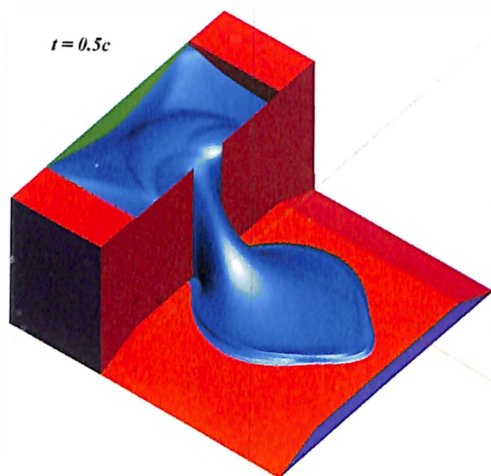
Максимальные значения модуля скорости и уровней водной поверхности в районе города за все время паводка.



(к статье Беликова В.В., Милитсева А.Н., Прудовского А.М., Родионова В.Б.)



Трансформация бора в сужении русла, $t = 450$ мс:
численный эксперимент по данным [1].

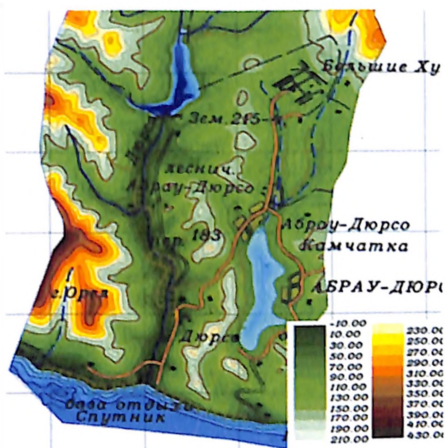


Моделирование истечения воды из прорана: расчёт для сопоставления
с экспериментом [2].

(к статье Прокофьева В.А.)



Электронная топографическая карта района наводнения (шаг координатной сетки 2 км).



Рельеф земной поверхности в районе наводнения. Шаг координатной сетки 2 км.



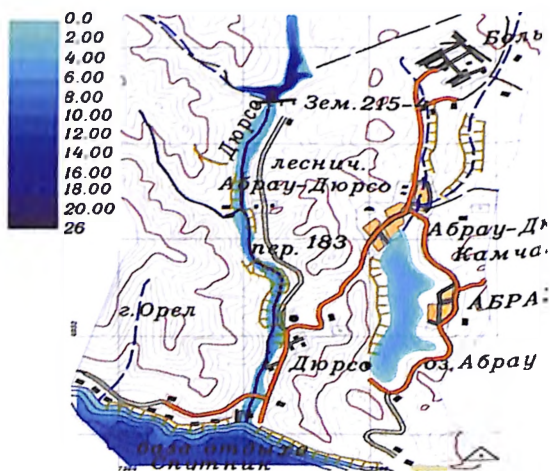
Вид полуразрушенной грунтовой плотины со стороны нижнего бьефа,
(к статье Беликова В.В.)



Разрушенные дома в селении Дюрсо (на переднем плане) после прохождения паводка (1,3 км от устья).



Сетка треугольных элементов в расчетной области (фрагмент).

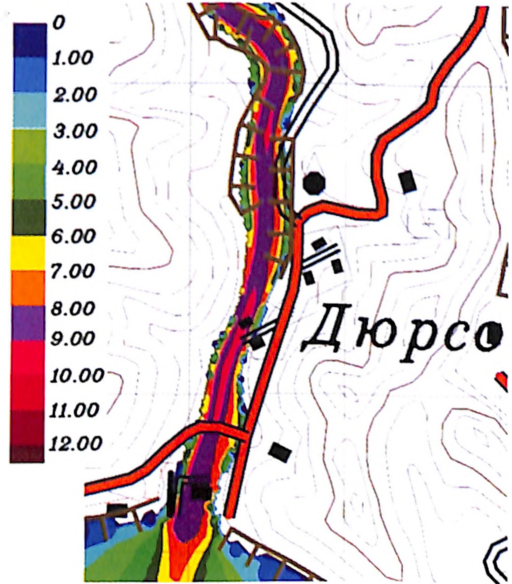


Максимальные глубины затопления при полном разрушении плотины.

(к статье Беликова В.В.)

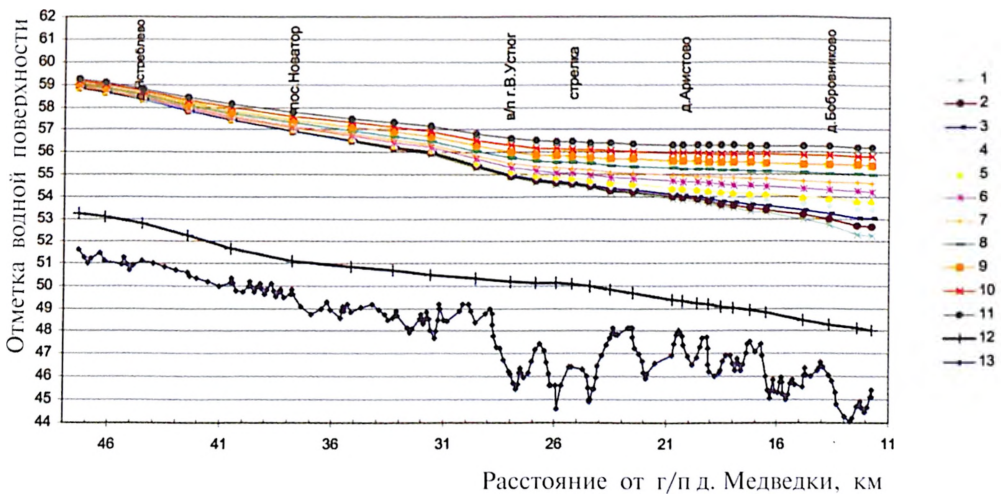


Карта возможных ущербов в баллах при частичном разрушении плотины (размыта от гребня на 3 м), фрагмент.



Карта возможных ущербов в баллах при полном разрушении плотины.

(к статье Беликова В.В.)



Кривые свободной поверхности рек Мал.Сев.Двины и Сухоны при разных значениях заторного повышения уровней (через 0,4 м) в районе Бобровниковских перекатов (1 – 10); 11 – меженный урез; 12 – продольный профиль дна (расход воды Сухоны 3500 м³/с, Юга – 1000 м³/с).

(к статье Крыленко И.Н.)



Старинная дамба для защиты от наводнений бывшего г. Олекминска на р. Лене. В настоящее время город расположен в 15 км выше по течению.



Головная часть бетонной стенки причала повреждается ледоходом на р. Лене.
(к статье Зайцева А.А.)



Разрушение стены, построенной на насыпном грунте.



Внешний вид дома по адресу: *Prettin, Hohestraße, 24.*
(к статье Нигметова Г.М., Бабусенко М.С.)



а)



б)



в)

Проран плотины пруда-накопителя
Вишневецкое: а— вид со стороны
верхнего бьефа; б — вид слева; в —
вид со стороны нижнего бьефа.



а)

Проран плотины водохрани-
лища Топелевское: а— вид со
стороны верхнего бьефа; б —
стороны нижнего бьефа.

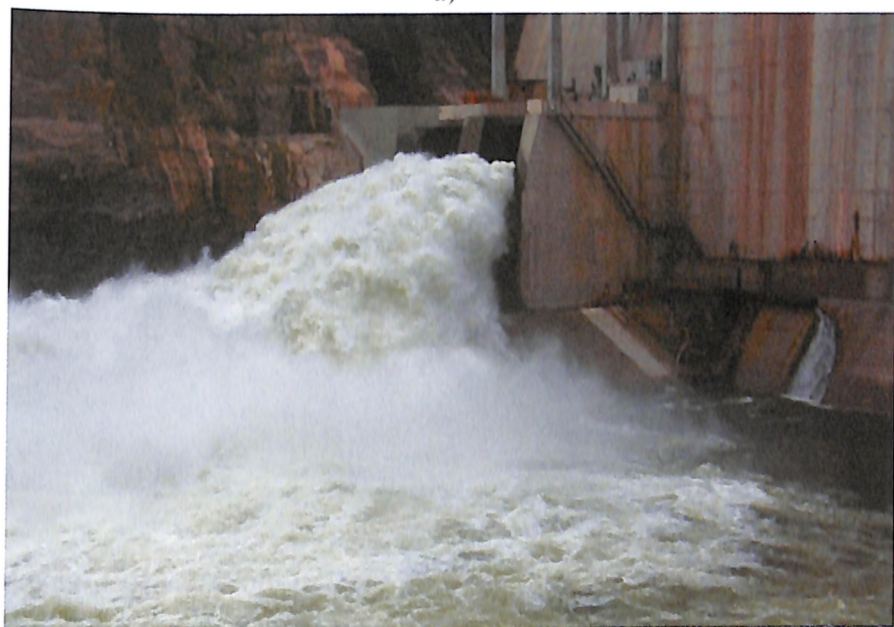


б)

(к статье Осипенко Б.В., Гавриленко В.И.)



а)



б)

Водосбросные сооружения гидроузла Капанда (Ангола):

а — поверхностный плотинный водосброс;

б — пропуск потока через глубокий водосброс.

(к статье Куприянова В.П., Юрченко А.Н.)



а)



б)



в)

Характерные дефекты металлической облицовки
затворной камеры глубинного водосброса:

а — заводской сварной шов;

б — каверна механического происхождения;

в — незачищенный угловой сварной шов между облицовкой стен и дна



а)



б)



в)

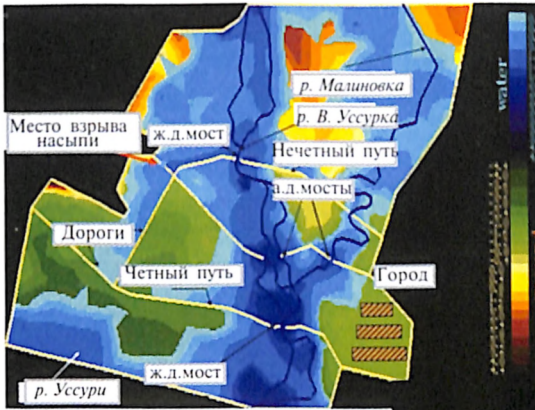
Характерные дефекты бетонной поверхности плотинного водосброса:

а — отклонение водосливной поверхности от проектного контура;

б — наплывы бетона;

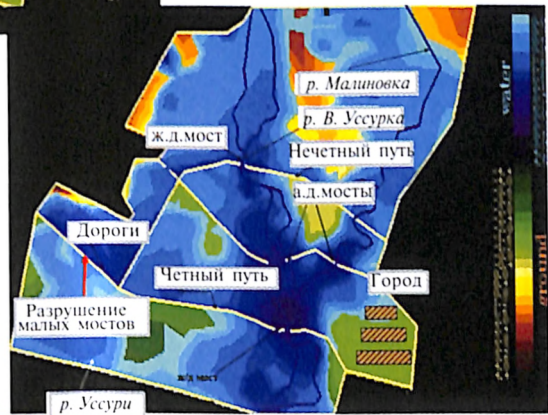
в — выпор бетона в месте примыкания водослива к разделительному бычку

(к статье Куприянова В.П., Юрченко А.Н.)



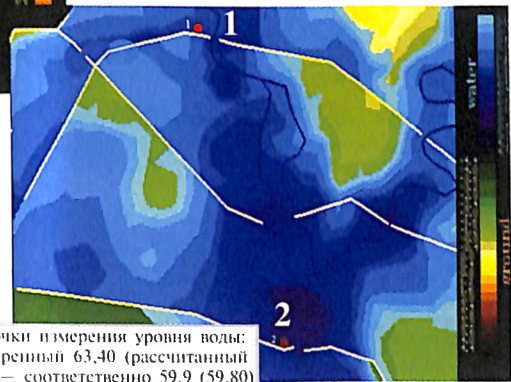
Глубины затоплений через 48 часов после начала наводнения.

Глубины затоплений через 60 часов после начала наводнения.

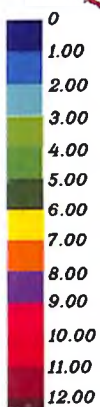
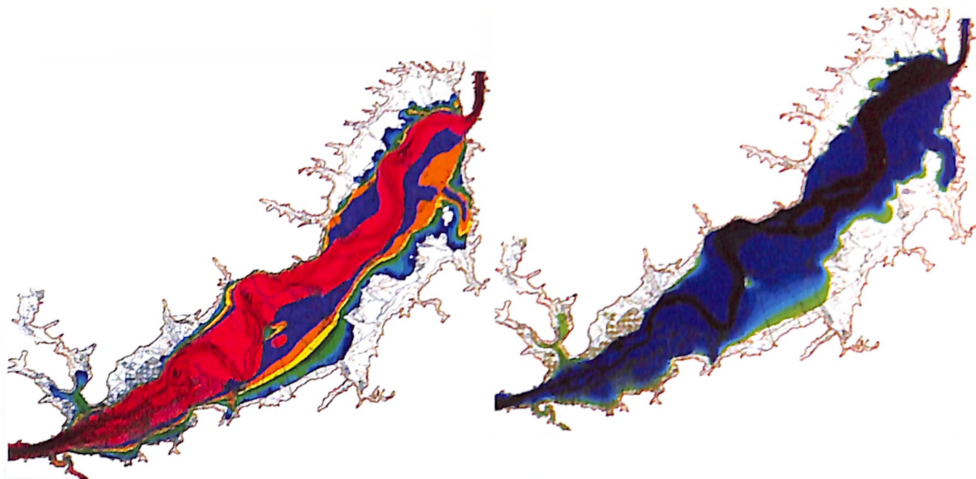


Уровни водной поверхности на пике наводнения.

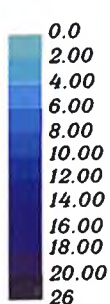
Максимальные глубины на пойме в районе мостовых переходов.



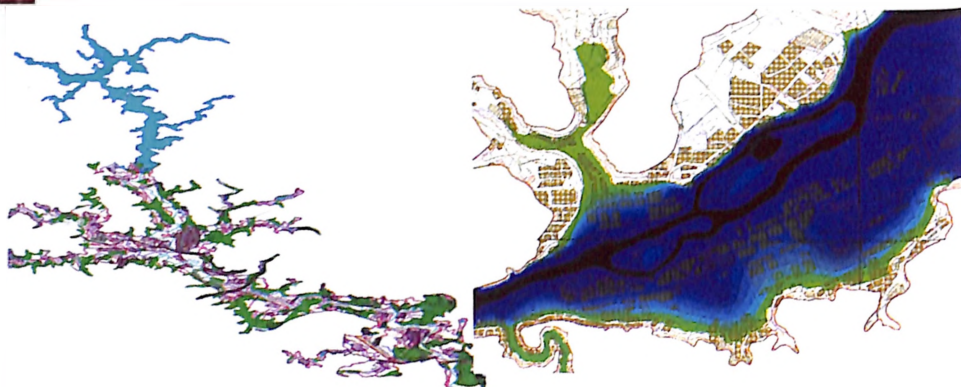
1, 2 — точки измерения уровня воды:
1 — измеренный 63,40 (расчитанный 63,34); 2 — соответственно 59,9 (59,80)



Карта возможных ущербов в баллах для всей затопляемой котловины.



Максимальные глубины затопления котловины (в метрах).



Карта возможных ущербов в баллах в районе города.

Максимальные глубины затопления (в метрах) в районе города.

(к статье Беликова В.В., Милитеева А.Н., Прудовского А.М., Родионова В.Б., Кочеткова В.В.)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ТАЛОГО И ДОЖДЕВОГО СТОКА ДЛЯ РАСЧЁТОВ И ПРОГНОЗОВ ГИДРОГРАФА СТОКА РЕК БАССЕЙНА СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ

Горин С. Л., инженер (МГУ им. М. В. Ломоносова)

После катастрофического наводнения 1998 г. в районе г. Великий Устюг возникла необходимость проведения специальных научных исследований, касающихся различных аспектов ледотермических и русловых процессов в районе слияния Сухоны, Юга, а также Малой Северной Двины, способных влиять на масштабы затопления и подтопления городской территории.

Частью комплексного изучения рек бассейна Северной Двины стал расчёт и прогнозирование боковой приточности и суточного стока для отдельных частей бассейна Северной Двины. В связи с тем, что на большинстве малых и средних рек изучаемого бассейна отсутствуют стационарные гидрометрические посты, эта задача решается путем математического моделирования. Для этого была выбрана модель формирования талого и дождевого стока Гидрометеоцентра СССР, разработанная В.А. Бельчиковым и В.И. Корнем (1989; 1991) и хорошо себя зарекомендовавшая для рек лесной зоны. Эта модель, достаточно подробно описывающая основные стокообразующие процессы, имеет своим неоспоримым преимуществом минимально необходимое количество входной информации. Достоинство модели заключается в том, что при ее разработке авторами использовались расчетные соотношения, полученные путем упрощений уравнений гидро- и термодинамики, описывающих процессы, происходящие в снеге и почве в зимне-весенний период. Вследствие этого большинство параметров имеет определенный физический смысл и их можно либо измерить, либо задать по литературным данным. Эта модель была опробована для расчёта и прогноза суточного стока р. Лузы. Оптимизированные параметры проверены на контрольной выборке, проведён анализ полученных результатов. Оценено влияние отдельных параметров модели на получаемые результаты, предложены пути улучшения качества работы модели для рассматриваемого водосбора.

Краткая характеристика изучаемого водосбора

Река Луза — главный приток р. Юг, образующий при слиянии с р. Сухоней у г. Великий Устюг Малую Северную Двину. Площадь водосбора реки составляет 18,3 тыс. км², а длина 574 км (для

створа Объячево — 6700 км²). Основными притоками Лузы являются Лопью, Поруб, Лехта, Лала (правые) и Ула (левый). В данной работе рассматривается часть бассейна р. Лузы с замыкающим створом у села Объячево. Средняя высота изучаемого водосбора — 152 м, лесистость — 97%, заболоченность — 1%. Гидрологические особенности реки связаны с ее расположением в северо-восточной части Восточно-Европейской равнины в бассейне Белого моря. Водосборная территория представляет собой лесистую равнину, слабо защищенную от западных и северо-западных ветров. Для нее характерно избыточное увлажнение и относительное однообразие природных условий. По характеру питания Луза принадлежит к смешанному типу, преобладает снеговое питание, доля которого в среднем составляет около 50% от объема годового стока, а по характеру водного режима — к рекам восточно-европейского типа. Для водного режима реки свойственно хорошо выраженное весеннее половодье с быстрым подъемом и спадом уровней. Наибольшая годовая амплитуда уровней реки в устье составляет около 6,5 м. Средний годовой расход воды реки 69,9 м³/с, что соответствует годовому слою стока 329 мм и модулю стока 10,4 л/(с · км²).

*Особенности формирования половодья на изучаемом водосборе
(1984 — 1996 гг.)*

Очень важным для формирования весеннего стока является предзимний период. Для Лузы характерно наличие осенних паводков, вызванных как жидкими осадками, так и стаиванием первого снега при возвратах тепла. Устойчивый снежный покров образуется до середины ноября, хотя эта дата колеблется от самой ранней (20.10.88.) до самой поздней (28.11.96.). Осадков за предзимний период (имеется в виду тридцатидневный период до установления снежного покрова) выпадает около 50 мм, однако наблюдалось экстремально низкое значение — 7 мм в 1987 г. Как уже отмечалось выше, водный режим реки в этот период характеризуется наличием паводков, однако при малом количестве осадков и высокой средней температуре воздуха (как это было в 1992 и 1995 гг.) сток реки близок к зимнему меженному.

В течение зимнего периода расходы остаются низкими, достигая своих наименьших значений — около 13 м³/с — в январе — феврале. Зимние расходы являются одновременно и минимальными годовыми. Зимой нередко оттепели, однако они очень коротки и вызывают лишь уплотнение снега. Зимы обычно суро-

вые, минимальные температуры достигают 40°C ниже нуля. Снежный покров достигает своего максимального значения (60 – 70 см) к первой половине марта.

Во второй половине марта нередко случаи установления коротких периодов с положительной температурой. Обычно их два-три и длятся они от одного дня до недели. Эти оттепели вызывают заметное оседание снежного покрова. Переход температуры через 0°C происходит в конце марта — начале апреля и по времени колеблется в весьма широких пределах от 17 марта (1989 г.) до 23 апреля (1984 г.). Дата схода снежного покрова отмечается в середине апреля, и весь период снеготаяния занимает от 4 до 30 дней. Само половодье может начинаться как до, так и после схода снежного покрова (в основном это зависит от начала водоотдачи из тающего снега, которая, в свою очередь, определяется гидрофизическими характеристиками последнего), но пик половодья достигается в период от 30 апреля до 11 мая. Итак, дата перехода температуры через нуль колеблется в пределах 37 дней, схода снега — 21 дня, начала половодья — 21 дня и прохождения пика половодья — 11 дней. Дата окончания половодья носит довольно условный характер, так как для Лузы характерно осложнение спада половодья паводками, максимальные расходы при этом могут быть выше паводочных (1989 и 1996 гг.). Но если к паводкам на спаде приводит выпадение сколько-нибудь значительных осадков, то на подъёме половодья этого не происходит, что, скорее всего, объясняется большой разницей во влажностных характеристиках почв. После схода снега нередко случаи возврата холодов и даже установление снежного покрова. При сочетании определённых условий эти похолодания сильно отражаются на максимальных расходах половодья, заметно снижая их.

Объём стока за половодье составляет около половины годового значения. Сумма осадков за этот период близка к 40 мм, что составляет около трети от запасов воды в снеге, что ещё раз подтверждает существенное влияние этого фактора на сток половодья.

Исходная информация и параметры модели.

Уточнение параметров модели

Исходная информация. При расчете талого и дождевого стока непрерывно в течение всего года используются следующие гидрометеорологические данные: осадки (жидкие и твердые), температура и дефицит влажности воздуха, запас воды в снеге и высота снежного покрова (один из вариантов модели позволяет обходиться без этих данных, используя лишь максимальный запас воды в снегу

за зиму), расходы воды в замыкающем створе. Данные о расходах воды используются только при определении параметров модели. Кроме этого, при оценке параметров модели и рассчитываемых характеристик весеннего половодья, анализе данных наблюдений о запасе воды в снегу желательнее привлекать данные о влажности, глубине промерзания и оттаивания почвы, плотности снега и покрытости местности снегом. При расчете только дождевого стока в летний период данные о температуре воздуха и снежном покрове не используются. Для определения параметров модели и расчёта суточных расходов воды были использованы ряды гидрометеорологических характеристик за 1984 – 1996 гг.

Параметры модели. Поскольку в модели рекомендуется использовать осредненные по площади водосбора гидрометеорологические данные, то основные ограничения с точки зрения репрезентативности осредненных исходных данных связаны с размером водосбора. Оптимальный размер водосборов для лесной зоны 5 – 10 тыс. км². Площадь водосбора, его лесистость, максимальный и минимальный за многолетний период расходы для расчетного створа вводятся как константы для каждого исследуемого объекта. Расчетные соотношения модели включают в себя ряд коэффициентов, которые могут меняться для различных водосборов. Число параметров зависит от модификации модели.

Параметры модели имеют вполне определенный физический смысл. Часть из них может быть определена по данным измерений либо с учетом рекомендаций, приводимых в литературных источниках. Однако многие параметры практически невозможно измерить или вычислить прямым путем по фактическим данным. Для их определения используется метод оптимизации Розенброка с критерием качества:

$$K = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{TK_i - TN_i} \cdot \sum_{j=TN_i}^{TK_i} (Q_{\phi ij} - Q_{pij})^2, \quad (1)$$

где N — число параметров, включенных в оптимизацию; TN_i и TK_i — даты начала и конца оптимизации i -го года; n — число лет; Q_{ϕ} и Q_p — фактические и рассчитанные расходы воды в замыкающем створе.

Уточнение параметров модели. При расчёте водоотдачи снежного покрова была сделана попытка выявить влияние участвующих в этих расчётах параметров модели на характеристики половодий. Оказалось, что использование в модели рекомендуемых

автором значений характеристики начала таяния (количество суток в текущем году от начала расчета до даты весеннего перехода средней температуры воздуха через 0°C) дает заниженные значения максимальных весенних расходов с увеличением расчётной длительности половодий. Нами было принято значение этой характеристики, равное количеству суток от начала расчета до даты начала половодья, при котором рассчитанные расходы стали ближе к действительным.

Для расчета весенних запасов влаги в снегу автором модели рекомендуется использовать данные о высоте снежного покрова, полученные во время последней снегосъемки перед началом таяния. В связи с тем, что в имеющейся информации с метеопостов даты и наличие фактов снегосъемок не указаны, выполнение этого требования становится невозможным. Поэтому вместо рекомендуемого значения были использованы значения максимальной толщины снежного покрова в зимний период. Выяснилось также, что при рекомендуемом значении плотности снега, равном $0,2 \text{ г/см}^3$, максимальные половодные расходы были сильно занижены. Принятое нами значение плотности, равное $0,3 \text{ г/см}^3$, значительно улучшило точность расчетов. Вообще, для надежной оптимизации параметров желательнее иметь данные о влажности почвы и запасе воды в снегу для всего водосбора перед началом снеготаяния.

В качестве начальных значений параметров при оптимизации были приняты параметры, рекомендуемые В. И. Корнем как оптимальные для данного водосбора. Оптимизация параметров модели проводилась по двум направлениям: отдельно по каждому году и по группам годов с последующей проверкой результатов по данным расчетов для годов, данные по которым не использовались в оптимизации.

Оптимизация модели по отдельным годам дала наиболее удачные результаты при использовании данных за 1984 г. (оценка подобранных параметров проводилась по критериям качества рассчитанных гидрографов). Одно из главных достоинств модели — наличие физического смысла у всех параметров. Однако значительные отличия рассчитанных параметров от рекомендованных автором модели свидетельствуют о содержании в них некоторой доли эмпирической составляющей.

Второе направление работы заключалось в оптимизации параметров модели по калибровочным выборкам, составленным из нескольких годов. В соответствии с рекомендациями была выбрана группа годов со средними, минимальными и максимальными значениями характеристик (объем годового стока, продолжительность

половодья, коэффициент стока за половодье, отношение объема половодного стока к годовому). Средние значения этих характеристик наблюдались в 1985 г., минимальные — в 1995 г., а близкие к максимальным — в 1984 г.

Анализ результатов моделирования гидрографов стока р. Лузы

Практически для всех гидрографов стока р. Лузы получено хорошее соответствие рассчитанных и наблюдаемых расходов воды. Однако для большинства годов отмечается занижение рассчитанных расходов за половодье. Возможной причиной этого являются погрешности расчета влажности почвы, глубины ее промерзания, льдистости и площади образования запирающих слоев к моменту начала водоотдачи из снежного покрова.

При анализе рассчитанных (параметры подбирались по 1984 г.) и фактических гидрографов за 1990 и 1993 гг. (рис. на цветной вкладке) можно сделать несколько замечаний. При очень схожих весенних условиях формирования половодий (запас влаги в снегу, слой осадков за половодье и сумма положительных температур) максимальные их расходы различаются почти в 1,5 раза. Это можно объяснить двумя основными факторами. Во-первых, различиями предзимних условий: в 1990 г. средний предзимний расход был значительно больше, чем в 1993 г., что косвенно характеризует более высокую влажность почвы в этот период. Прямым следствием этого является более высокая льдистость грунтов перед началом половодья в 1990 г. В свою очередь, это приводит к уменьшению водопроницаемости весенней почвы и увеличению коэффициента стока за период половодья. Во-вторых, в 1990 г. таяние снежного покрова произошло за 10 дней, тогда как в 1993 — за 16. Следовательно, в первом случае времени на инфильтрацию талых вод в почву было меньше, влияние же временных (образующихся в начале водоотдачи на переохлажденную почву) запирающих слоёв больше.

Максимальные рассчитанные расходы половодий рассматриваемых годов оказались идентичными, что, скорее всего, связано с одинаковым моделированием осенних условий формирования влажностного профиля почв, что, как уже было отмечено, не соответствует действительности. Следовательно, погрешности расчета влажности почвы приводят к значительным ошибкам в прогнозировании максимального стока весенних половодий. В связи с ограниченностью информации о динамике уровня грунтовых вод в расчетных соотношениях модели влияние

грунтовых вод учитывается только в период половодья, для остального времени считается, что их связь с почвенной влагой в зоне аэрации мала. Этим могут быть вызваны ошибки в расчетах влажности почвы в предзимний период, недоучёт роли зимней миграции подземной влаги к фронту промерзания. Для большинства годов отмечается занижение рассчитанных расходов за половодье.

При сравнении фактических и рассчитанных гидрографов половодий 1987 и 1995 гг. установлено явное завышение последних. При этом для рассматриваемых годов характерны низкие значения коэффициентов стока половодий. Это связано с аномально большой продолжительностью периода между сходом снега и пиком половодий из-за возврата холодов после раннего стаивания снежного покрова (6 и 9 апреля, соответственно). В результате, потери талого стока на инфильтрацию в почву существенно возросли. Есть основания предполагать, что такой характер снеготаяния недоучтен в расчетных соотношениях модели.

Рассчитанные по выборке из трёх лет гидрографы стока весеннего половодья показали хорошее соответствие наблюдавшимся значениям стока. Анализ рассчитанных гидрографов (рис. на цветной вкладке) показал, что в данном случае половодья описаны значительно лучше, чем при оптимизации только по 1984 г., однако паводочный сток оказался снивелированным. Первое свидетельствует в пользу верности предположения о зависимости паводочного стока от средних многолетних значений характеристик и меньшей степени влияния на него их внутригодовых колебаний. Формирование паводочного стока, напротив, обусловлено кратковременными колебаниями определяющих его величин. Таким образом, второй вариант оптимизации более пригоден для моделирования паводочного стока. Для расчета паводочного стока необходима оптимизация либо по отдельным годам, либо по группам годов с одинаковыми условиями формирования паводков.

Заключение

Формирование стока на речном водосборе — сложнейшее природное явление, обусловленное большим количеством факторов, оценка и измерение которых чрезвычайно затруднены из-за пространственной и временной изменчивости. Существенную помощь в изучении природных процессов оказывает аппарат математического моделирования, который дает возможность решать широкий круг гидрологических задач, в том числе расчёт и прогнозирование суточного стока рек, максимальных расходов весеннего половодья.

Опыт использования описанной модели позволил сделать ряд рекомендаций по подготовке исходных данных и оптимизации параметров модели. В частности, для более достоверного расчета стока весенних половодий необходимо оптимизировать параметры по калибровочной выборке, составленной из лет со средним, минимальным и максимальным набором характеристик (объем годового стока, продолжительность половодья, коэффициент стока за половодье, отношение объема половодного стока к годовому), однако для описания паводочного стока этот способ неприемлем.

Расхождение фактических и рассчитанных гидрографов стока за половодье связано с особенностями снеготаяния, а также с погрешностями расчёта влажности почв.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Корень В.И.** Математические модели в прогнозах речного стока. Л.: Гидрометеоиздат. 1991.
2. **Корень В.И., Бельчиков В.А.** Методические указания по использованию методов краткосрочных прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды для речных систем на основе математических моделей. Л.: Гидрометеоиздат. 1989.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ И ПРОГНОЗ УРОВНЯ ВОДЫ В РЕКЕ ОКЕ В ПЕРИОД ПОЛОВОДЬЯ*

Акименко Т.А., кандидат геогр. наук, Алексеевский Н.И., доктор геогр. наук, Круглова Г.В., кандидат геогр. наук, Самохин М.А., инженер (МГУ имени М.В. Ломоносова)

Концентрация населения и материальных ценностей в долинах рек обуславливает возрастание риска экономических и экологических ущербов, необходимость обеспечения безопасности жизнедеятельности при прохождении в максимального стока. Весеннее повышение уровней воды или их подъем в паводок создает угрозу затопления освоенных пойменных территорий. Своевременное предупреждение и эвакуация населения, обоснование и создание защитных инженерных сооружений зависит от наличия гидрометрической информации, эффективности методов прогноза опасных уровней воды.

* Выполнено при финансовой поддержке ФУП «Университеты России» и гранты NWO 142.17.1003.

Уровни воды и их изменчивость

Уровень воды H — высота водной поверхности в руслах рек над некоторой плоскостью сравнения. В общем случае уровень воды:

$$H(x,t) = z(x,t) + h(x,t), \quad (1)$$

где z — отметка дна реки, h — глубина потока в створе x в момент времени t . При большом продольном осреднении отметки дна являются убывающей функцией расстояния от истока реки. На участках рек меньшей длины эта закономерность имеет характер тенденции. Отметки дна изменяются неравномерно вследствие особенностей продольного профиля русла. Локальные их изменения являются результатом изменения морфологии речных долин (чередование сужений и расширений), морфологии русла (чередование плесов и перекатов), наличия или отсутствия русловых форм, дноуглубления, русловыправления, изъятия песка и гравия из русловых карьеров. Эти же факторы влияют на глубину водных потоков. Переход от плесов к перекатам, в частности, сопровождается уменьшением глубин. Средняя глубина $h = h(x)$ является возрастающей функцией x . При переходе от верхнего к среднему и нижнему течению рек глубина потока возрастает вследствие увеличения водоносности реки.

При $x = \text{const}$ изменение уровня ΔH является функцией времени:

$$\Delta H(t) = H(x,t+1) - H(x,t). \quad (2)$$

Значение и математический знак ΔH зависят от ряда процессов, приводящих к понижению или повышению уровня воды. Изменения H во времени могут быть связаны с вариацией притока воды на участок реки H_1 , заторными или зажорными явлениями H_2 , подпорным взаимодействием сливающихся рек H_3 , нагонами H_4 , приливами H_5 , изменением отметок дна вследствие русловых деформаций H_6 , уплотнением и проседанием грунтов H_7 , тектоническими движениями участков земной коры H_8 , антропогенными факторами H_9 . В общем случае:

$$H = \sum_{j=1}^r H_j = H_1 + H_2 + \dots + H_r, \quad (3)$$

где j — индекс фактора, влияющего на ΔH . Вклад этого фактора численно равен H_j — некоторой части уровня воды H . Нормирование уравнения (3) по отношению к уровню H дает:

$$1 = H_1/H + H_2/H + \dots + H_r/H \quad (4)$$

и

$$1 = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n, \quad (5)$$

где β_j — доля j -го процесса в изменении отметки уровня воды.

Главным фактором изменения уровней воды являются особенности формирования стока в различных частях речного бассейна. Вариация водоносности главной реки, боковая приточность обуславливают суточные, сезонные и многолетние флуктуации уровня воды H_1 .

Изменение уровня воды по длине р. Оки

Бассейн р. Оки расположен на границе лесной и лесостепной зон, имеет широтное простираие (рис. 1). В среднем за год на поверхность водосбора выпадает 700 мм осадков. Слой осадков уменьшается с 750 мм на северо-западе до 600 мм на юго-востоке речного бассейна. В этом же направлении увеличивается слой годового испарения (с 530 до 580 мм) и уменьшается слой стока (от 200 до 110 мм). Коэффициент стока равен 0,2 – 0,3. В различные месяцы года соотношение между слоем осадков и испаряемостью может обуславливать повышенное или пониженное поступление воды в русловую сеть территории. Возникающая внутригодовая неравномерность стока характеризует соответствующие изменения уровней воды в р. Оке и ее притоках.

По классификации Б.Д. Зайкова реки бассейна соответствуют восточно-европейскому типу распределения стока. Для этого типа распределения характерны высокие уровни воды в период весеннего половодья и дождевых паводков. Максимальные уровни воды формируются в период снеготаяния. Низкие уровни устанавливаются во время летней и зимней межени. Экстремально низкие уровни наблюдаются в условиях подземного питания реки.

В бассейне р. Оки выделяются 4 гидрологических района, которые отличаются по режиму уровней воды. Юго-западный район охватывает верхнее течение р. Оки (от истока до впадения р. Угры) и правобережье среднего течения (до устья р. Прони). Реки этого района имеют малую естественную зарегулированность стока. До 74% годового стока формируется весной, 17% — в летне-осенний период, 9% — зимой. Участок р. Оки (от впадения р. Угры до устья р. Клязьмы) образует центральный район. Весной здесь формируется 69%, летом-осенью — 25%, зимой — 6% годового стока. Большая часть бассейна р. Клязьмы (ниже г. Владимира) входит в северо-восточный район. Реки района имеют максимальную естественную зарегулированность. Весной проходит 67, в летне-осенний период — 24 и зимний — 9% годового стока. К юго-восточному району относится нижнее течение р. Оки (бассейны рр. Мокша и Теша). На долю весеннего стока здесь приходится 85, летне-осеннего — 10 и зимнего — 5% годового стока. При прочих равных условиях уровни воды в период половодья максимальны

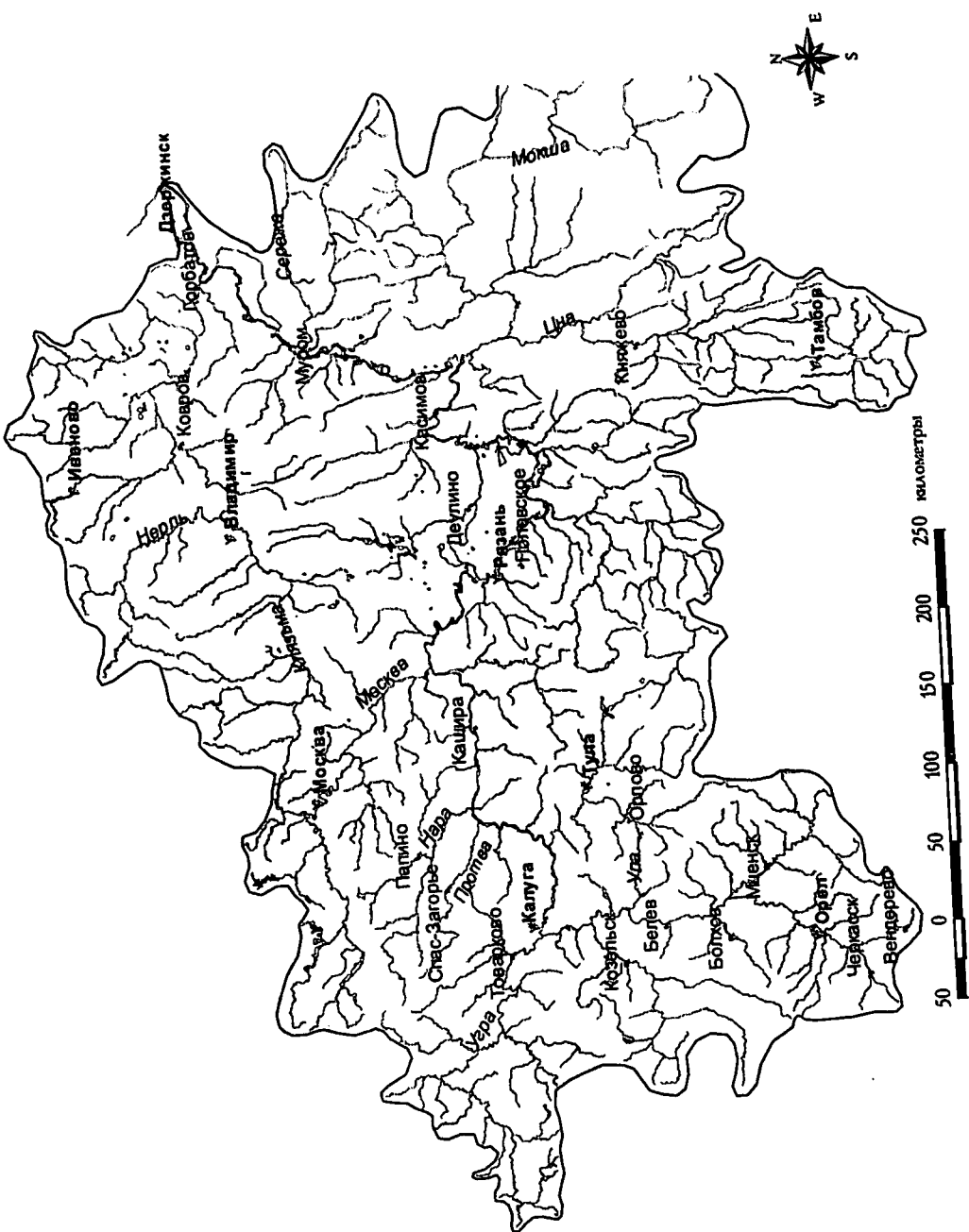


Рис. 1. Бассейн Оки и основные пункты гидрологического мониторинга по длине реки.

в реках юго-восточного, а в период межени — центрального района. Минимальные зимние уровни характерны для водотоков юго-восточной части Окского бассейна.

В любом районе бассейна стоковая составляющая уровня воды в реках достигает максимума в период весеннего половодья. Каждый из районов асинхронен в отношении дат наступления годовых максимумов уровня воды. Весеннее повышение уровней начинается в конце марта на юго-западе и юге бассейна. В северной его части средняя многолетняя дата начала весеннего подъема уровней соответствует началу апреля. Средняя дата наступления максимума уровней на реках южной части водосборной территории приходится на 2 – 5, а северной — на 15 апреля. В ранние весны он наблюдается на 5 – 10 дней раньше средних условий, а в поздние — на 10 – 15 дней позже. Продолжительность периода повышенных уровней воды зависит от площади водосбора, его залесенности, заболоченности, наличия озер, запаса воды в снеге в начале половодья, дружности весны. На средних и крупных реках максимальный уровень воды соответствует пику одновысотного гидрографа половодья. На малых реках (площадь водосбора < 2000 км²) гидрограф имеет более сложную форму. Он отражает внутрисуточное изменение температуры воздуха, интенсивности снеготаяния и водоотдачи. Наибольшая внутрисуточная изменчивость уровней характерна для рек в юго-западном и юго-восточном районах бассейна р. Оки.

Сезонный режим уровней воды по длине р. Оки характеризуют данные наблюдений гидрометеослужбы РФ на 18 уровнях постах (табл. 1). Средняя плотность постов равна 1 пост на 70 километров русла. Максимальное расстояние между постами достигает 156, минимальное — 21 км.

Неравномерное и мощное снеготаяние приводит к возникновению волны половодья, которая вызывает неоднозначное изменение уровней воды на ее подъеме и спаде. На подъеме волны $dH/dt > 0$, а на спаде волны — $dH/dt < 0$. Средняя скорость перемещения волны половодья составляет 0,5 – 1,3 м/с. Время перемещения волны половодья от одного до другого пункта гидрологического мониторинга изменяется от нескольких часов до 2 – 3 дней. Максимальное время добегания ($\tau = 2 - 4$ сут) характерно для участка р. Оки ниже с. Старая Рязань. Для большинства участков реки $\tau \leq 48$ ч.

Закономерное продольное изменение водоносности р. Оки объясняет существование связи между уровнями воды на границах участков реки. Для 21 участка они имеют устойчивый, стабильный (в многолетнем плане) характер. В большинстве случа-

Таблица 1

Действующие посты гидрологического мониторинга на р. Оке

Название поста	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Амплитуда колебаний уровня воды, см	
			средняя	максимальная
д. Вендереево	1466,0	513	389	526
г. Орел	1389,0	4890	706	905
д. Костомарово	1368,0	4900	996	1216
г. Белев	1242,0	17500	1052	1340
г. Калуга	1109,0	54900	1136	1764
г. Серпухов	978,0	66000	874	1169
г. Кашира	927,0	68700	907	1234
г. Коломна	855,0	74100	708	981
г. Рязань	699,0	97700	770	973
с. Половское	649,0	99000	882	1043
с. Старая Рязань	608,0	111000	830	1001
с. Копоново	515,0	119000	728	901
г. Касимов	410,0	130000	878	1104
р.п. Елатьма	313,0	185000	826	1102
г. Муром	215,0	188000	823	1098
д. Сапун	151,0	201000	934	1274
г. Горбатов	78,0	244000	1011	1272
г. Ниж. Новгород	1,2	245000	745	911

ев связь переменных описывают линейные уравнения. На участке р. Оки между с. Половское и с. Старая Рязань такая связь устойчива лишь в период половодья. Между г. Муром и д. Сапун неустойчивость связи наблюдается в период спада уровней воды.

Изменение уровней воды можно корректировать с учетом эрозионного понижения или аккумулятивного повышения отметок дна ($H_6 \neq 0$). Если этим фактором нельзя пренебречь, соответствие уровней вдоль реки можно учесть уравнением:

$$H(x, t) = \alpha(H(x-1, t-\tau)) + H_6. \quad (6)$$

Эмпирический коэффициент α в уравнении (6) изменяется по длине р. Оки. Значение $\alpha > 0$, что свидетельствует о возрастающем характере функции $H(x, t)$. Нестабильность уровня обусловлена в основном различиями в датах прохождения волны половодья на главной реке и ее притоках. Синхронизация волн достигается при

введении в уравнение (6) корректирующей поправки H_{10} :

$$H(x,t) = \alpha(H(x-1, t-\tau)) + H_2 + H_{10}. \quad (7)$$

При синхронности волн половодья на р. Оке и ее притоках $H_{10} = 0$. Если между ними существует сдвиг по фазе ΔT и $\Delta T > 0$ (половодье начинается раньше на главной реке), то $H_{10} < 0$, в русло Оки попадает меньший объем талых вод по сравнению с условиями, при которых $\Delta T = 0$. Уровни воды (ниже узла слияния рек) в соответствии с уравнением (6) оказываются заниженными, поскольку $H_{10} < 0$. В случае $\Delta T < 0$ (половодье на главной реке начинается позже, чем на притоке) уровни воды ниже слияния водотоков также меньше, чем это характерно для ситуации $\Delta T = 0$. Следовательно, и в этом случае $H_{10} < 0$. Даже большая интенсивность увеличения расходов воды в устье притока, расположенного между створами x и $x-1$, недостаточна для увеличения уровня воды до значений, наблюдающихся при $\Delta T = 0$.

Модель русловой трансформации расходов и уровней воды можно достаточно эффективно использовать в прогнозных целях. На это указывают результаты использования связей типа (6) для прогноза уровней по длине р. Оки (табл. 2). При прохождении волны половодья средняя погрешность прогноза изменяется от -19,4 до 13,8%. Абсолютная погрешность прогноза равна $\pm (0,3 - 0,4)$ м. При такой ошибке определения $H(x,t)$ влияние русловых преформирований H_6 на изменение уровня воды (в условиях конкретного половодья) относительно мало. В этом случае несинхронность формирования стока в бассейне главной реки и ее притоков учитывает семейство линейных функций:

$$H(x,t) = \varphi_1 (H(x-1, t-\tau), \alpha(t)), \quad (8)$$

отличающихся лишь по величине $\alpha(t)$. Она равна разности уровней $\Delta H_{x-1,x}$ на участке реки в момент времени t и отражает существование сдвига по времени соответственных колебаний уровня воды на сливающихся реках. Связь $\alpha(t) = \psi(\Delta H_{x-1,x}(t))$ имеет вид:

$$\alpha(t) = \alpha \Delta H_{x-1,x}(t) + \beta \quad (9)$$

и

$$\Delta H_{x-1,x}(t) = r_1 \Delta H_{x-1,x}(t-1) + r_2. \quad (10)$$

Объединение уравнений (9) и (10) дает

$$\alpha(t) = \alpha r_1 \Delta H_{x-1,x}(t-1) + \alpha \beta + r_2$$

или

$$\alpha(t) = k_1 \Delta H_{x-1,x}(t-\tau) + k_2, \quad (11)$$

где $k_1 = \alpha r_1$, $k_2 = \alpha \beta + r_2$, α, β — эмпирические коэффициенты.

Модель русловой трансформации волны половодья наименее эффективна для верховий р. Оки, где притоки сопоставимы с главной рекой. На участках их впадения в главную реку несинхронность волн половодья вносит наибольшие погрешности в прогноз уровней воды (табл. 2). Для участка д. Костомарово — г. Белев, г. Орел — д. Костомарово и г. Белев — г. Калуга возможность уменьшения погрешностей прогноза связана с учетом изменчивости коэффициента $\alpha(t)$. Для первых двух участков коэффициенты k_1 и k_2 соответственно равны -1,06 и -38, -0,94 и 357. С учетом (11) уравнение (8) приобретает вид:

$$H(x,t) = c (H(x-1,t-\tau)) + k_1 \Delta H_{x-1,x} (t-\tau) + k_2. \quad (12)$$

Таблица 2

Погрешности расчета уровней воды р. Оки в 1987 г.
на основе метода русловой трансформации волны половодья

№ уч-ка	Участок реки	Время добегания, ч	Средняя относительная погрешность метода, σ %	Диапазон изменения погрешности
1	Вендерово – Орел	24	-1	-19,0 + 8,8
2	Орел – Костомарово	1	-0,4	-85,0 + 63,6
3	Костомарово – Белев	48	-15,9	-91,9 + 71,7
4	Белев – Калуга	48	-19,4	-161 + 97,2
5	Калуга – Щукина	18	-4,4	-34,0 + 18,0
6	Щукина – Серпухов	24	7,3	-23,4 + 56,7
7	Серпухов – Кашира	24	0,1	-89,0 + 29,5
8	Кашира – Коломна	24	-8,2	-34,0 + 18,3
9	Коломна – Рязань	72	2,2	-38,4 + 59,8
10	Рязань – Половское	19,4	-3,9	-13,2 + 15,4
11	Половское – ст.Рязань	16,0	-1,4	-20,7 + 14,9
12	Ст.Рязань – Копоново	48,0	5,1	-10,8 + 11,1
13	Копоново – Касимов	48,0	-11,0	-58,2 + 50,8
14	Касимов – Елатьма	48,0	13,8	-16,7 + 66,2
15	Елатьма – Муром	48,0	-16,2	-44,0 + 2,0
16	Муром – Горбатов	24,0	1,1	-17,4 + 39,1

Коэффициент c в уравнении (12) можно определить на основе анализа свойств функций (8). Каждая из них отличается лишь значением $\alpha(t)$ при $c = \text{const}$. Например, для участка р. Оки д. Косто-

марово — г. Белев $c = 1,06$; а для участка реки между г. Орлом и д. Костомарово $c = -0,36$. Такой способ оптимизации параметров уравнения (8) повышает сходимость фактических и полученных по модели уровней воды. Абсолютная погрешность ее использования для краткосрочного прогноза уровней р. Оки (г. Белев в 1999 г.) не превышала $\pm 0,26$ м. Относительная погрешность прогноза находилась в пределах от $-6,3$ до $5,7\%$.

Опыт использования модели русловой трансформации волны половодья показал, что точность и заблаговременность прогноза уровней р. Оки зависит от расстояния S между створом, для которого разрабатывается прогноз, и створом, данные по которому являются предиктором в уравнении (8) (рис. 2). Погрешности расчета снижаются до минимальных значений, если $S \leq 200$ км. В этом случае они не превышают $12 - 15\%$. Значение S и погрешность метода σ связаны соотношением $\sigma = 0,04S + 4,06$. При увеличении S до $400 - 500$ км модуль относительной погрешности σ возрастает до 25% . Оптимальное соотношение большой заблаговременности и малых погрешностей прогноза наблюдается при разработке прогноза H по входной информации с пунктов гидрологического мониторинга, находящихся на расстоянии $200 - 400$ км выше по течению от створа, для которого составляется прогноз. На большем удалении от этого створа находятся пункты гидрологического мониторинга, в зоне действия которых генетический «адрес» водной

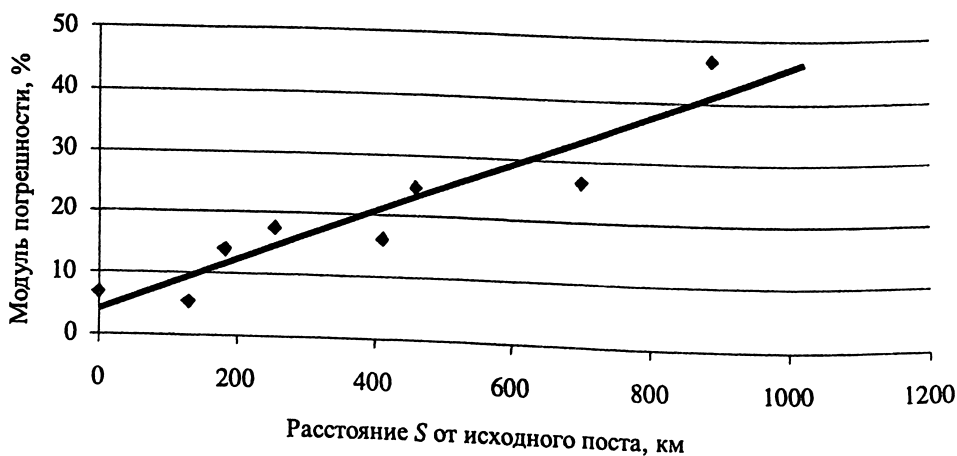


Рис. 2. Изменение погрешности прогноза уровней воды в г. Горбатове в зависимости от расстояния S до вышележащего створа с соответственными колебаниями уровней.

массы в меньшей степени связан с ситуацией ниже по течению реки. Наличие или отсутствие связи уровней на смежных постах характеризует значение коэффициента корреляции. Если коэффициенты корреляции $r \geq 0,75$, то колебания уровня воды H в различных створах русла р. Оки генетически связаны. Число пунктов мониторинга, сведения по которым пригодны для разработки достоверного прогноза, меньше общего количества уровенных постов.

Заблаговременность прогноза T_n в устье реки зависит от расстояния S до створа, данные по которому используются в качестве предиктора (рис. 3).

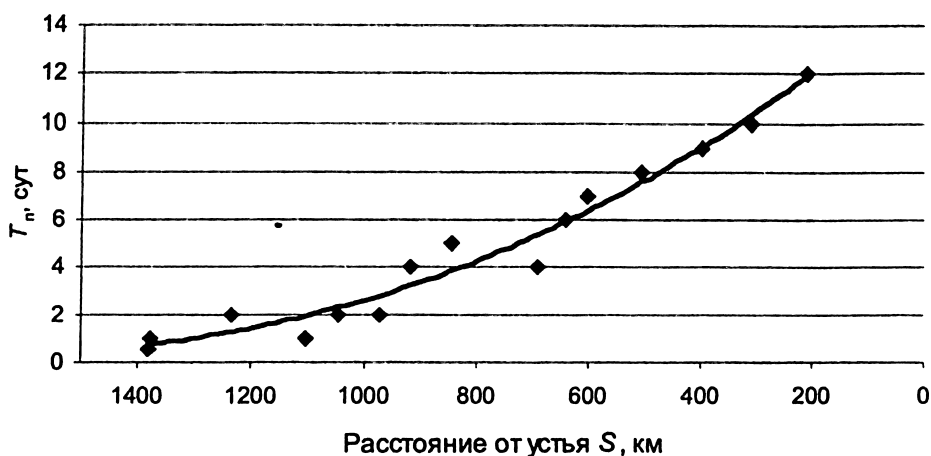


Рис. 3. Изменение заблаговременности T_n достоверного прогноза уровней по длине р. Оки.

Для нижнего участка реки ($S \leq 500$ км) заблаговременность прогноза достигает 9 – 12 сут. Половодье здесь длится более 50 сут, а режим уровней р. Оки слабо зависит от впадения даже крупных притоков (Мокша, Клязьма). В среднем течении (Алексин, Серпухов, Кашира, Коломна, Рязань, Половское, Старая Рязань, Копово) продолжительность половодья достигает 35 – 50 сут. Внешние факторы (несинхронность половодья на р. Оке и притоках, возврат холодов, неравномерность выпадения ливней) оказывают заметное влияние на вариацию отметок свободной поверхности вдоль потока. Заблаговременность прогноза (при коэффициенте корреляции $\geq 0,75$) снижается до 8 и даже 2 – 3 сут.

В верховьях р. Оки (Вендерево, Орел, Костомарово, Белев, Калуга) половодье имеет продолжительность 25 – 35 сут. Уровни воды

в р. Оке в значительной степени изменяются под влиянием притоков. Заблаговременность достоверного прогноза по методу русловой трансформации волны половодья не превышает 2 суток.

Этот метод прогноза уровней воды по длине р. Оки может служить инструментом предупреждения экономических и экологических ущербов при затоплении поймы в период половодья. Он использован для создания программного комплекса, позволяющего оценивать ситуацию с затоплением пойменных территорий при оперативном прогнозе динамики уровней воды. Метод обеспечивает заблаговременность достоверного прогноза (с погрешностью до 25 %) 1 – 10 суток. Аналогичный подход к разработке прогнозных методик можно использовать для предсказания экстремально высоких уровней воды и на других незарегулированных реках.

ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ НАВОДНЕНИЙ

Малик Л.К., кандидат геогр. наук (Институт географии РАН)

Наводнения относятся к экстремальным гидрологическим ситуациям (ЭГС), возникающим при отклонениях гидрологических характеристик от средних многолетних значений, свойственных определенному водному объекту (реке, озеру, водохранилищу) и нормативных для данной территории.

Наводнения угрожают более 70 % территории суши. Это не только наиболее часто встречающееся на Земле опасное природное явление, но и наиболее часто повторяющееся в многолетней перспективе и обладающее большой разрушительной силой.

По данным ООН за 1963 – 1992 гг. наибольшее количество бедствий, вызывающих гибель 100 человек и более, связано с наводнениями (202 случая), тропическими штормами (153 случая), эпидемиями (133) и землетрясениями (102) [7]. За указанный период от природных и техногенных катастроф в мире погибло около 4 млн. человек, пострадало более 3,3 млрд., из них 36 % от общего числа жертв — от наводнений. В России в это время погибло от катастрофических явлений около 3 тыс. человек, пострадало около 540 тысяч, из них 30 % — от наводнений [4]. Нет отраслей хозяйства, на которые не оказали бы влияния наводнения. Это влияние может быть прямым и косвенным.

Непосредственный ущерб от наводнений зависит от высоты и скорости подъема уровней воды, продолжительности их стояния, времени года, степени освоенности и экономического развития территории, плотности населения, от своевременности прогноза и принятия предупредительных мер, от наличия и эффективности защитных противопаводковых гидросооружений.

Во всем мире отмечается тенденция роста ущербов при экстремальных наводнениях в силу целого ряда причин, несмотря на повышение изученности этих явлений и предпринимаемые усилия по их предотвращению и смягчению последствий. Главным фактором непрекращающегося роста ущерба от наводнений признается в первую очередь влияние заселения паводкоопасных территорий и усиление на них хозяйственной деятельности. По подсчетам А.Б. Авакяна [1], на паводкоопасных территориях проживает 1 млрд. человек.

Мало исследованной проблемой является увеличение риска катастрофических наводнений в условиях меняющегося климата.

В США наводнениям подвержено 6% территории, но по размеру экономического ущерба это стихийное бедствие занимает первое место. США являются первой страной, в которой был принят закон о контроле за наводнениями.

Особенно сильные наводнения и ущербы наблюдаются в КНР, чему способствуют муссонный климат и плоский равнинный рельеф. Большие реки Китая в низовьях протекают по ложу, приподнятому над освоенной поймой, например р. Хуанхе — на 12–15 м, в то же время подъемы уровней воды могут достигать 30 м.

В Западной Европе при катастрофических ливневых наводнениях затопляется около 4 % территории. Наиболее сильное наводнение наблюдалось в 1988 г., но самые катастрофические последствия имело наводнение лета 2002 г., когда погибло более 100 человек, а общий ущерб составил более 20 млрд. евро.

В 2002 г. наводнения с большими потерями и человеческими жертвами охватили не только Центральную, но и Восточную Европу и целый ряд регионов Юго-Восточной Азии (Китай, Индию, Таиланд). В Китае число жертв составило 1000, а в Индии — до 900 человек.

В России общая площадь земель, подвергающаяся затоплениям при наводнениях, составляет более 800 тыс. км² (около 5 % территории страны). Угроза существует более чем для 40 крупных городов и нескольких тысяч других населенных пунктов. По материалам МЧС («Прогноз природных и техногенных катаклизмов на 2003 г.») ежегодно со стопроцентной вероятностью в Российской

Федерации затопляются около 50 тыс. км². При этом среднестатистический ущерб от наводнений по стране составляет в среднем около 100 млрд. рублей в год.

Катастрофическим наводнениям летом 2002 г. подверглись южные районы страны — Краснодарский и Ставропольский края, Дагестан, Ингушетия, Чечня, Северная Осетия. Бедственное положение сложилось в районе г. Новороссийска и в примыкающих к нему рекреационных зонах, где прохождение паводка ливневого происхождения вызвало формирование в горах селя, переполнение и опорожнение водохранилищ. Положение было усугублено рядом смерчей, принесших потоки воды с моря и пополнивших охваченные ливневыми паводками реки. Общее число погибших, по предварительным подсчетам МЧС, составило по Южному Федеральному округу 114 человек, материальный ущерб оценен в 15 млрд. рублей.

Конкретные причины бедствий летом 2002 г. на юге России еще будет изучаться и потребуются специальные публикации.

По данным Всемирной метеорологической организации в наводнение лета 2002 г. общая площадь затопленных территорий различных государств превысила 8 млн. км²; лишились крова 17 млн. жителей более чем в 80 странах, около 3 тыс. человек погибли, общий ущерб, нанесенный стихией, составил 30 млрд. долларов.

В каждом районе нашей страны наблюдаются разные типы наводнений: их классификации, с попытками вероятностной оценки частоты наступления и оценки ущербов, приведены в работах С.С. Гинко, Н.А. Алексева, Р.А. Нежиховского, С.М. Мягкова, А.П. Степанова с коллегами, А.Б. Авакяна, А.Ф. Мандыча и ряда других авторов.

В Российской Федерации наиболее распространенным типом являются наводнения, связанные с интенсивным таянием снежного покрова и подъемами уровней воды на равнинных реках. Они могут приобрести катастрофический характер, если сочетаются с весенними дождями и обильным предзимним увлажнением почвогрунтов. Но возможны и зимние наводнения от таяния снега в период оттепелей. Повторяемость выдающихся наводнений этого типа оценивается в 1 раз в 10 — 25 лет.

Распространены наводнения, вызванные затяжными дождями и ливнями большой интенсивности. Угрозе наводнений этого типа чаще всего подвержены обширные территории Дальнего Востока, юг Восточной Сибири до Читинской области, куда распространяется влияние тихоокеанских муссонов, а также Северный Кавказ и Закавказье. Не исключены подобные наводнения и в других регионах России.

Зажорные и заторные наводнения характерны для предгорных и равнинных участков рек, их число на территории бывшего СССР достигает 2400 на 1100 реках [8, 19]. Зажорные подъемы уровней воды в реках, вызванные скоплениями шуги и внутриводного льда, несмотря на зимнее маловодье, могут превышать в некоторые годы уровни весенне-летнего половодья, способствовать образованию в районах с суровым климатом сезонных речных наледей. На промерзающих малых реках формируются в этих районах высокие летние половодья.

У рек, текущих на север в европейской части России, особенно у рек Сибири, выдающиеся наводнения формируются в весенний период вследствие заторов льда при вскрытии рек с верховья (соответственно продвижению фронта снеготаяния). Длина заторов, например, на р. Лене может достигать 50 – 100 км, подъемы уровней — более 10 м.

Наибольшие для России заторные уровни зафиксированы на р. Нижней Тунгуске в сужении русла, где они поднимались над меженью на высоту 35 – 40 м [18].

Наибольшая интенсивность, повторяемость и распространение заторных наводнений, сопровождающихся катастрофическими последствиями, наблюдается в бассейне р. Лены — от верховья до дельты и на ее притоках. На рис. 1 приведена схема размещения крупных ледовых заторов в бассейне р. Лены с выделением наиболее опасных участков. Схема составлена в лаборатории геоморфологии Института географии РАН д.г.н. С. С. Коржуевым [8].

Необходимо отметить, что в Сибири наводнения наблюдаются на сравнительно редко населенных территориях страны, где, однако, до 90% жителей и до 75% сельскохозяйственных земель сосредоточены в долинах рек, подвергающихся наводнениям [10]. Заторные подъемы уровней на реках происходят здесь почти ежегодно, вызывая большие затопления, носящие характер постоянных бедствий. Опасны также наводнения от заторов на европейских реках. Так, на р. Северной Двине у г. Архангельска повторяемость выдающихся заторных подъемов уровней составляет в среднем 1 раз в 4 года с максимальным подъемом воды до 4 м.

В России распространены также нагонные наводнения на морских побережьях при ветрах, дующих с моря. Особенно интенсивны нагонные наводнения, если они совпадают с приливами.

К районам Российской Федерации, терпящим значительный материальный ущерб от нагонных наводнений, относятся устье р. Преголь (г. Калининград), устье р. Дона (г. Азов) и др. Наивыс-

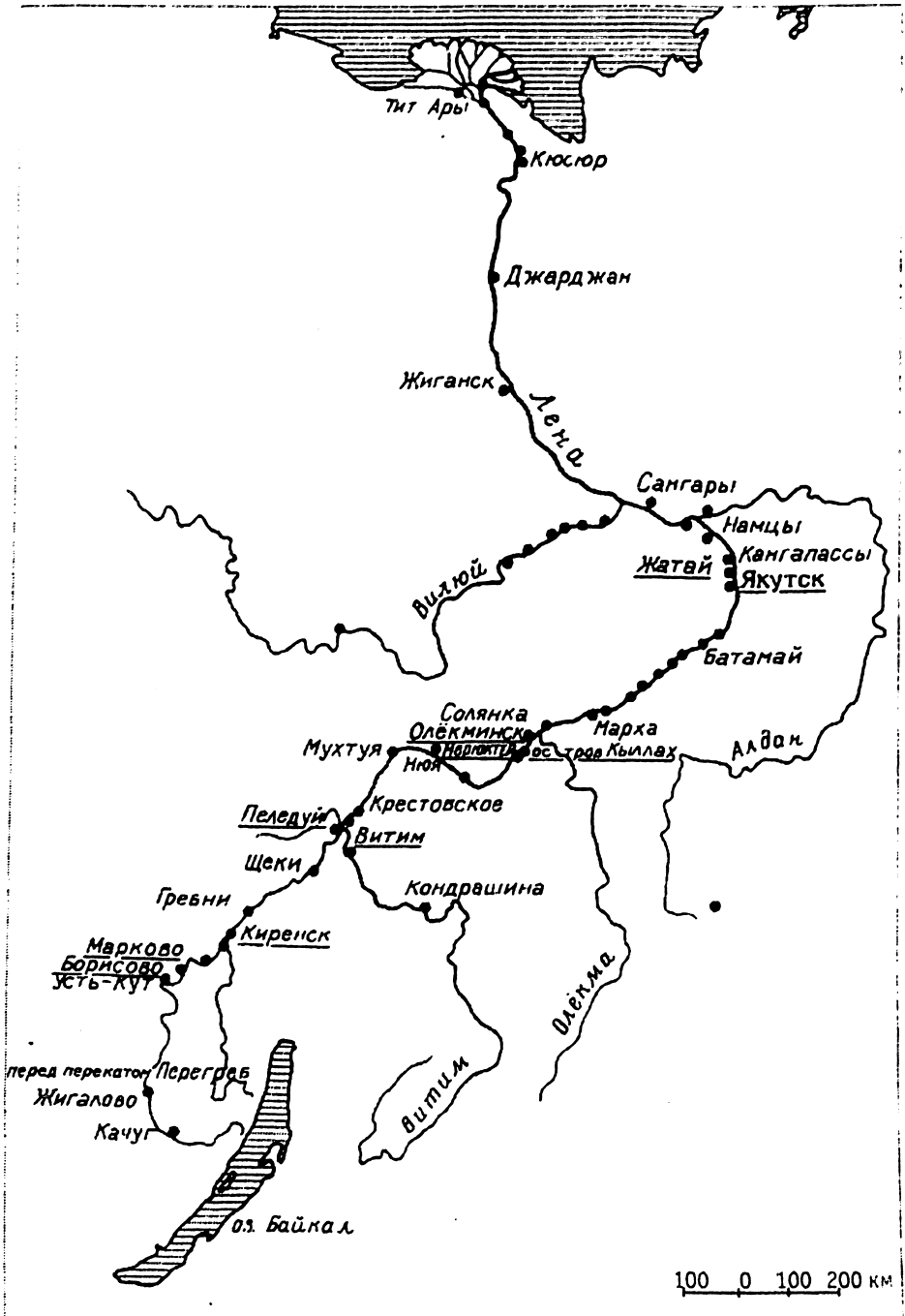


Рис. 1. Схема размещения крупных ледовых заторов на р. Лене. Подчеркнуты названия пунктов, в районе которых происходят катастрофические заторы.

шие нагонные подъемы уровней и их повторяемость наблюдаются в устье р. Невы в пределах г. Санкт-Петербурга. Наводнения здесь формируются во все сезоны и месяцы года, но наиболее опасными являются осенние (70% наблюдающихся здесь наводнений).

В горных районах распространены и представляют большую опасность наводнения, связанные с развитием оползневых процессов, приводящих к подпруживанию рек и образованию «завальных» озер, опорожнение которых сопровождается прорывной волной с большой скоростью прохождения и может спровоцировать формирование селей.

Прорыв подпрудного моренного озера Туюксу в верховьях р. Малой Алмаатинки в 1973 г. вызвал грязекаменный поток огромной разрушительной силы: 15-метровый вал двигался со скоростью 10 м/с, максимальный расход воды достигал 5200 м³/с, поток нес валуны весом до 300 т и был остановлен 110-метровой плотиной у пос. Медео [2].

Образование «завальных» озер и затем прорыв завала и формирование прорывной волны наблюдались на многих реках и ручьях в сейсмичных районах. Из этого типа озер в бывшем СССР наиболее известно Сарезское озеро на р. Мургаб на Памире, возникшее в 1911 г. вследствие землетрясения в 9 баллов и сопровождавшееся обвалом 2,2 млрд. м³ горных пород. Состояние естественной запруды озера в последние годы вызывает большие опасения в связи с угрозой ее прорыва (вероятность которого определена как 1 раз в 200 лет) и возможными катастрофическими затоплениями.

При подвижках ледников и перекрытии ими рек и ручьев образуются ледниково-подпрудные озера, которые затем прорываются, формируя мощные волны прорыва и наводнения.

В лавиноопасных районах нередко образуются прорывные паводки в результате подпруживания рек и ручьев массой сходящего снега. Известны примеры наводнений лавинного происхождения на двух крупных реках Памира — Бартанге и Узгулене, когда уровень воды в них значительно превышал уровень летнего половодья. Так, на р. Бартанге 24 января 1969 г. в 65 км от устья образовалась лавинная запруда и водоем объемом около 1 млн. м³. Прорыв водоема вызвал прохождение по реке водяного вала высотой 5–6 м с большим содержанием снежных комьев.

Наводнения, вызванные ливневыми осадками и приобретающие характер селей, — частое стихийное явление на Северном Кавказе. Так, до 90% селевых наводнений в Дагестане — результат

ливневых дождей с суточным максимумом 50 – 100 мм. Нередки здесь и ледниковые селевые наводнения, твердую составляющую которых «поставляют» оползни [2].

Восточные районы страны — Курилы, Камчатка, Сахалин, побережье Тихого океана — подвергаются наводнениям от гигантских морских волн — цунами, движущихся с большой скоростью (100–1000 км/ч) и достигающих у побережья 5–20 м, а иногда 40 м высоты. Особенно опасна серия волн цунами, следующих с интервалом в 1 ч и более.

Анализ экстремальных гидроэкологических ситуаций за последние 10 лет прошлого столетия и двух лет нового века позволяет привести несколько примеров наблюдавшихся в этот период выдающихся наводнений рассмотренных типов и их последствия.

Повышенной водностью рек и опасными наводнениями отличался 1998 г.

Анализ причин наводнений весной 1998 г. в юго-западных районах России показал, что они были вызваны не только природными факторами — интенсивным ростом в феврале-марте температур воздуха, дождями, быстрым снеготаянием, резким подъемом уровней воды в реках и уровней грунтовых вод. В значительной степени опасная паводочная ситуация была связана с бессистемным возведением плотин на реках с целью создания запасов воды для летнего засушливого периода и, как следствие, невозможностью пропуска воды в период половодья, а также с высоким уровнем стояния грунтовых вод. Последнее обстоятельство было вызвано как самими плотинами, нарушившими естественный сток воды, так и обильными летними дождями предшествующего 1997 г. В результате в условиях дождливой весны грунтовые воды вышли на поверхность и подтопили значительные территории — в Ростовской области 7675 домов (часть из них разрушена) и 95 тыс. га сельскохозяйственных земель. Чрезвычайной паводочной ситуации способствовало резкое увеличение неконтролируемого сброса воды из водохранилищ, в том числе с территории Украины.

Сильные дожди в течение 15 – 19 июля 1998 г. сформировали высокий паводок на р. Колыме, вызвавший затопление на 3 – 4 дня оленьих пастбищ и подтопление г. Сусаман. Был нанесен большой ущерб (более 50 млн. рублей) золотодобывающим предприятиям Сусаманского района, потерявшим около 200 кг золота.

Высокие паводки в августе 1998 г. прошли на р. Амуре и реках Забайкалья, имевшие серьезные последствия. В конце августа — начале сентября интенсивные дожди вызвали наводнение на р. Амуре

на протяжении 600 км. Были затоплены сельскохозяйственные угодья и садово-огородные участки, 10 сентября подтоплены поймы рек Уссури и Малиновки, а 20 сентября паводочные воды подтопили р. Большая Уссурка и пониженные участки г. Дальнереченска.

Опасные гидроэкологические ситуации на реках Дальнего Востока и Хабаровского края, вызванные ливневыми дождями, наблюдались также в мае 2000 г. в долине р. Биры (Еврейская автономная область), высокие уровни из-за дождей были близки к категории особо опасных.

Большой ущерб экономике Приморского края нанесли дожди и наводнение конца июля — начала августа 2002 г. Уже в первые дни было подтоплено 520 домов и 13 тыс. га сельскохозяйственных земель, из-за разливов рек без электроэнергии осталось 15 населенных пунктов. Одной из причин интенсивного роста уровней, возможно, являлись сбросы воды из переполненных водохранилищ на территории Китая. Однако предупреждение об открытии шлюзов с китайской стороны не поступало.

Высокие летние паводки, вызванные ливневыми дождями, были характерны в 1998 г. и для западных районов страны. На р. Волхов, например, в июле они обеспечили приток воды к Волховской ГЭС, в 6,3 раза превысивший норму.

На Северном Кавказе экстремальные гидрологические ситуации, связанные с выпадением летних осадков, наблюдались во многие годы. Так, в июле 2000 г. жаркая погода и ливневые дожди привели к бурному таянию льда в горах, высоким уровням в р. Баксан и формированию пяти мощных селевых потоков в Тырнаузе.

Причиной катастрофических подъемов уровней на реках Севера европейской части России и особенно Сибири были мощные заторы льда. Затор в устье р. Печоры 5 июня 1998 г. вызвал интенсивный подъем уровня половодья, достигший у г. Нарьян-Мар катастрофической отметки в 672 см. Это привело к затоплению 85% территории г. Нарьян-Мара, подтоплению 10 сел, различных сооружений и дорог. В селах было затоплено 512 домов. Срочно построенная дамба помогла уменьшить зону затопления.

В бассейне р. Лены в мае 1998 г. экстремальные уровни на самой реке и ее притоках (Алдане, Амге, Вилюе) были связаны с затяжным характером вскрытия ледяного покрова и мощными множественными заторами льда. Был полностью затоплен г. Ленск, производилась эвакуация населения. Всего в мае 1998 г. в период ледовых заторов и наводнения было затоплено 148 населенных пунктов и эвакуировано 41 тыс. человек.

Неоднократно из-за ледовых заторов резко возрастали уроины на реках Сибири и в другие годы. Мощные заторы льда на р. Лене от г. Ленска до устья и в низовьях р. Енисея вызвали в мае-июне 1999 г. интенсивный подъем уровней, превысивших у г. Якутска отметки, не наблюдавшиеся с прошлого столетия, а у г. Игарки подъем уровня превысил максимум за весь период наблюдений. Почти полностью были затоплены города Якутск и Дудинка. В некоторые годы при заторах в устье р. Енисея затопливалась взлетно-посадочная полоса аэродрома.

К серьезным последствиям привел резкий подъем уровней из-за ледовых заторов на р. Лене на участке от г. Ленска до устья р. Алдана 14 – 22 мая 2000 г. Уровень воды у г. Якутска достиг отметок редкой повторяемости — 1 раз в 100 лет — и вызвал почти полное затопление города. В зоне подтопления оказалось 169 населенных пунктов, в которых проживало 475 тыс. человек. Было затоплено 15 тыс. домов, погибло 15 человек.

Еще более разрушительными в Сибири были наводнения заторного происхождения в 2001 г. Мощные заторы льда сформировались на р. Енисее у Ворогова, в низовьях Ангары, на Нижней и Подкаменной Тунгуске, на отдельных участках Верхней Оби. Катастрофические заторы образовались при вскрытии Средней Лены. Этому способствовало бурное снеготаяние из-за резкого повышения температуры воздуха и интенсивный подъем уровней в начале мая на Верхней Лене, вызвавший затопление ряда населенных пунктов Иркутской области, в том числе Усть-Кута, Киренска и др. С приходом паводочных вод с верховьев ниже г. Ленска образовался большой затор, уровень воды при этом поднялся на 17 м и на 3,1 м превысил наблюдавшийся ранее максимальный уровень. Были затоплены 10 административных районов республики Якутия-Саха, полностью г. Ленск. Из 10000 затопленных домов разрушились 3850, пострадало 700 сельскохозяйственных и около 4000 различных промышленных объектов, было эвакуировано 43 тыс. человек. Общий ущерб составил 5,9 млрд. рублей [17].

После разрушения затора у г. Ленска частичному затоплению подверглись все населенные пункты на участке г. Ленск — устье Алдана, в том числе прибрежные районы г. Якутска.

Кроме наводнений заторного происхождения в бассейне Енисея и на его притоках в мае 2001 г. прошли высокие снежно-дождевые паводки, вызвавшие наводнения и затопления пригородов г. Кизила и других прибрежных населенных пунктов,

а ниже устья Ангары — кратковременные, частичные затопления городов Енисейск и Туруханск и населенных пунктов в низовьях Нижней и Подкаменной Тунгуски.

Регулярно повторяющиеся наводнения в Санкт-Петербурге вызваны штормовыми ветрами и нагонами воды из Финского залива в устье р. Невы. Катастрофическими, вызывающими затопления в городе, считаются уровни, превышающие 210 см над ординаром (над нулем Кронштадского футштока). За период 1990 — 2002 гг. уровни, вызванные нагонами воды, превышали 210 см дважды. Дата их наступления — октябрь, ноябрь или декабрь месяцы. 19 октября 1998 г. наблюдался 289 нагонный подъем уровня за весь период наблюдений (220 см над ординаром), вода вышла на набережные Санкт-Петербурга. С 30 ноября по 1 декабря 2000 г. штормовым ветром и нагоном воды из залива было вызвано 290-е наводнение в городе, когда уровень поднялся до 262 см. Были затоплены подвалы домов вдоль р.Невы, вода достигла тоннелей метро, создалась угроза затопления Эрмитажа, принимались мероприятия по защите АЭС.

В Калининграде в эти же сроки (конец ноября — начало декабря 2000 г.) штормовой ветер (скоростью 25 — 30 м/с) вызвал разрушения и сформировал нагонный уровень в устье р. Преголя, достигший 188 см над ординаром, т.е. повторил абсолютный максимум. В результате были подтоплены 22 предприятия и 29 улиц г. Калининграда, а также поселки Прибрежный, Суворова, Прегольский, затоплена железная дорога Калининград-Мамоново, в г. Балтийске нарушена работа паромной переправы на Балтийскую косу, разрушена авандюна на Куршской косе и т.д.

Особое место занимают паводки и наводнения с человеческими жертвами и большим материальным ущербом, являющиеся следствием воздействия целого ряда взаимосвязанных факторов — аномального развития гидрометеорологических процессов, активного проявления экзогенных процессов, переполнения и прорыва плотин водохранилищ, размыва хозяйственных и рекреационных объектов, разрушения предприятий — источников химического и биологического загрязнения поверхностных и грунтовых вод.

Подобный многоплановый катаклизм наблюдался летом 2002 г. на Кавказе и Черноморском побережье, выразившийся в катастрофических паводках и наводнениях, активизации русловой эрозии, усиливавшихся и развивавшихся за счет активного проявления селевых процессов. Немаловажную роль при таком развитии событий сыграл человеческий фактор — неготовность спецорганов и исполнительной власти к чрезвычайным ситуациям по-

добного масштаба, несогласованность действий различных ведомств, беспечность населения, не покинувшего опасные места несмотря на предупреждения.

Антропогенный фактор сыграл отрицательную роль не только в 2001 г., но и во многих рассмотренных гидроэкологических ситуациях, связанных с наводнениями, — несвоевременное устранение заторов льда на реках, недостроенная дамба в устье Невы, нерациональный, несогласованный с различными пользователями режим заполнения и сработки водохранилищ, строительство и заселение паводкоопасных территорий и т.д. Каждый год создается опасная паводочная ситуация в ряде городов Сибири в связи с размывом на поймах рек песчаных массивов и последующим строительством здесь городских кварталов, как это было в городах Якутске, Тюмени и других регионах. Предпринимаемое в этих случаях строительство противопаводочных заградительных дамб приводит, однако, к нарушению структуры природных дренажных систем и усугубляет неблагоприятную гидроэкологическую ситуацию. К обострению гидроэкологических ситуаций приводит конкуренция в использовании водных ресурсов между различными отраслями хозяйства и пограничными территориями, особенно во время пропуска половодий и паводков и сброса воды из водохранилищ, при сработке уровней в летне-осенний сезоны, при установлении режимов накопления водных ресурсов в водохранилищах и т.д.

Выше уже упоминалось о неконтролируемом, несогласованном сбросе воды из водохранилищ пограничных территорий Украины и Китая. Взаимоотношениям в сфере совместного использования водных ресурсов различных государств должна быть посвящена специальная публикация. Здесь лишь отметим, что, к сожалению, нет четких нормативно-правовых критериев для разрешения конфликтных гидроэкологических ситуаций не только вне, но и внутри Российской Федерации. Так, не разрешен до сих пор спор между Чувашской республикой и соседними территориями. Республика заинтересована в увеличении выработки энергии на Чебоксарской ГЭС, вызывающей, однако, подъем уровней грунтовых вод и подтопление территорий в республике Марий Эл и Нижегородской области.

Одними из видов борьбы с наводнениями являются защитные дамбы. На территории бывшего СССР было создано более 200 систем обвалования общей протяженностью более 12 тыс. км, защищающих свыше 9 млн. га сельскохозяйственных земель [2]. Обвалованы поймы рек Терека, Кубани, Куры и других, от амур-

ских паводков защищены дамбами города Хабаровск, Благовещенск, Комсомольск-на-Амуре и т.д. Обвалования используются для защиты ряда других городов и промышленных объектов.

Однако дамбы снижают иногда пропускную способность русел, способствуют образованию «пробок» изо льда или несомого водой материала, их высота бывает недостаточной для сдерживания от затоплений паводкоопасных территорий. Например, дамбы в районе г. Ленска были разрушены в период катастрофического половодья 2001 г., построены заново, но их высота оказалась недостаточной в половодье 2002 г. [3].

Производятся также берегоукрепительные и руслоспрямительные работы, отводы воды, регулирование стока малых рек, осуществляются лесомелиоративные и агротехнические мероприятия на водосборах (лесопосадки, снегозадержание, распашка земель поперек склонов и т.д.). Все эти меры направлены на перевод поверхностного стока в грунтовый и увеличение подземной составляющей стока.

Однако защитные дамбы и перечисленные мероприятия не решают полностью задачу борьбы с наводнениями. Наиболее эффективным способом борьбы с высокими половодьями и паводками является перераспределение стока путем создания водохранилищ. Водоохранилища для борьбы с наводнениями (обычно комплексного назначения) используются во всех странах мира, что дает возможность на территориях ниже плотин полностью или частично избавляться от чрезвычайных ситуаций и бедствий, связанных с наводнениями, и значительно снижать затраты на строительство хозяйственных объектов. В бывшем СССР водохранилища, по некоторым данным, ликвидировали к началу 1988 г. ущерб от наводнений в среднем за год на сумму 150 млн. рублей. С их помощью была решена в основном проблема наводнений и связанных с ними бедствий на реках Волге, Днепре, Дону, Куре.

Стоит напомнить о прохождении на р. Волге до зарегулирования стока катастрофических наводнений с громадными ущербами и людскими потерями. Таким было, в частности, наводнение в 1926 г., когда было затоплено 150 тыс. км² территории, а число жертв до сих пор неизвестно. Создание водохранилищ на Москве-реке и ее притоках практически избавило нашу столицу от наводнений.

Сооружение на р. Зее крупного водохранилища спасает долину реки от наиболее разрушительных наводнений. Паводки, которые до строительства гидроузла повторялись каждые 2 – 4 года, сейчас наблюдаются лишь 1 раз в 10 – 100 лет. Дальнейшее снижение паводковой опасности на Дальнем Востоке планируется путем стро-

ительства серии водохранилищ в бассейне р. Амура. Однако в связи с тем, что основные неблагоприятные экологические и социально-экономические последствия возникают при создании крупных водохранилищ ГЭС (большие затопления, переселение людей, многие экологические издержки, долгострой и т.д.), необходимо внести коренные изменения в систему проектирования и строительства водохранилищ ГЭС с учетом природоохранных требований и для усиления темпов создания и удешевления стоимости гидроузлов. Снижение их негативного влияния считается возможным путем сооружения каскадов низконапорных гидроэлектростанций, возводимых наплавным методом.

Новая концепция гидроэнергетического строительства была разработана инженерным центром «Каскад» института «Оргэнергострой» с участием институтов «Ленгидропроект» и «Гидропроект» и предложена конкретно для ускоренного освоения гидроэнергоресурсов Дальнего Востока, где создание ГЭС осложнено суровым климатом, слабым развитием экономической и социальной базы, отсутствием сухопутных транспортных путей и всей необходимой инфраструктуры.

Таким путем на Амуре и Зее считается возможным строительство 13 низконапорных ГЭС общей мощностью 2 млн. кВт. В качестве первоочередного рассматривается каскад ГЭС на Зее общей мощностью 350 МВт: Граматухинская, Инжанская, Чагоянская. Осуществление этих планов позволит снизить риск наводнений, снять напряженность в энергоснабжении Амурской области и социальной обстановке на Дальнем Востоке и решить проблемы электроснабжения создаваемого космодрома «Свободный». Строительство каскадов низконапорных ГЭС создаст также условия для устройства водохранилищ МГЭС на притоках.

Спасая обширные территории от наводнений, гидроузлы, однако, сами могут стать источником катастрофических затоплений в нижних бьефах в случае повреждения плотин и формирования волны прорыва. Этим вопросам, в частности факторам риска повреждений и прогнозам, посвящены многие специальные публикации, в том числе сотрудников Лаборатории гидрологии Института географии РАН (из последних статей — [16, 17]).

Не останавливаясь на всех факторах повреждения гидроузлов, напомним, что наиболее распространенным видом аварий на плотинах ГЭС, особенно малых, является перелив воды через гребень плотины в связи с недостаточной пропускной способностью сооружений. Этот вид аварий может быть вызван прохождением па-

водков с расходами воды выше расчетных, отказом гидромеханического оборудования, ошибками проектировщиков и обслуживающего технического персонала.

В истории плотиностроения есть немало примеров разрушения плотин под влиянием паводков крайне редкой, неучтенной в проекте обеспеченности.

В нашей стране не было разрушения больших плотин благодаря высоким требованиям действующих нормативных документов по назначению расчетных максимальных расходов воды. Но плотины на малых реках разрушались в связи с плохой освещенностью их данными гидрологических наблюдений и неверным из-за этого установлением максимальных расходов. В последние годы произошли катастрофы на небольших гидроузлах водохозяйственного назначения (Тирлянском, Кисилевском, Людиновском и др.).

Вероятность разрушения гидросооружений в Российской Федерации выросла в период перестройки экономики и ликвидации ряда органов управления водным хозяйством в связи с отсутствием «хозяина» у некоторых водохранилищ, сокращением сети Гидрометслужбы и невозможностью дать обоснованный прогноз объемов и максимумов экстремальных паводков и паводков, а также в связи с опасностью терактов и военных действий. Серьезным фактором возможных аварий становится старение сооружений и отсутствие соответствующего финансирования на их профилактический ремонт, замену устаревшего оборудования и мониторинг.

Однако аварии при переливе воды через гребень плотин могут быть вызваны не только нерасчетными паводками, но и еще рядом причин, в том числе оползнями и обрушением в водохранилища массивов неустойчивых горных пород на значительных участках их берегов. Следствием этого является формирование волн вытеснения, размеры которых превышают пропускную способность водосбросов.

Повреждения многих плотин и формирование волн прорыва были также связаны с отказом затворов водосбросных сооружений из-за редкого их использования, некомпетентности обслуживающего персонала, отсутствия профилактики и периодической проверки их эксплуатационной надежности. Неувязки в проекте гидромеханического оборудования и неготовность к работе водосброса вызвали разрушение ограждающей дамбы водохранилища Сургутской ГРЭС, так как в паводок не удалось полностью открыть затворы.

Из-за гидрологического фактора — недооценки максимальных расходов воды — известны случаи разрушения лишь плотин малых ГЭС, например в последние годы в Ленинградской области

— Белогорской на р. Оредеж и Будогошьской на р. Пчезжа, а также на р. Язевой на Алтае. Указывается лишь на один случай аварии на большой плотине, связанный с недооценкой максимального расхода воды — разрушение перемычки при строительстве гидроузла Аракс в результате прохождения выдающегося (наибольшего за период наблюдений) паводка весной 1971 г.

Однако чрезвычайные ситуации при строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений возникали неоднократно. Известен прорыв горного Саргазонского водохранилища в 1987 г. в Таджикистане объемом 2,7 млн. м³ с плотиной высотой 23 м. Эта авария вызвала гибель 32 человек и нанесла большой материальный ущерб.

Можно привести ряд примеров, иллюстрирующих нестандартные ситуации при создании плотин. Многие из них связаны с недостатками прогноза возможных последствий создания ГЭС в различных зонах, но немаловажным фактором являются, очевидно, и недостаточные наблюдения за состоянием гидроузлов с помощью системы мониторинга.

Нельзя не упомянуть также об опасности повреждения гидротехнических сооружений в связи с военными действиями в зонах этносоциальных конфликтов и возможными террористическими актами (пример — повреждение турбины Дубоссарской ГЭС при артобстреле во время вооруженного конфликта в Приднестровье и опасность затопления многих населенных пунктов).

Наводнения ниже плотин могут быть связаны не только с их повреждениями, но и с незапланированными сбросами излишних масс воды через гидросооружения. Так, активный сброс воды из Новосибирского водохранилища 18 июня 2001 г. привел к затоплению около 1300 садовых участков.

Напомним также о наводнении в 1988 г. в нижнем бьефе Красноярской ГЭС, вызванным рядом факторов, детально проанализированных автором — свидетелем этого наводнения в период полевых работ в бассейне Енисея [12]. В июле 1988 г. мощный циклон в южных и центральных районах Красноярского края вызвал ливневые осадки большой интенсивности и продолжительности: 25 июля в районе г. Красноярска выпало на 20 – 80 % больше месячной нормы осадков. В целом же в июле количество осадков составило 110 – 230 % нормы. Продолжавшиеся в июле и начале августа дожди способствовали интенсивному таянию горных снегов в верховьях Енисея. Принявшие обильные осадки и сток от таяния снегов реки вышли из берегов, уровни воды в реках Тубе, Абакане поднялись на 2 – 2,5 м и оказались в ряде случаев выше максимальных уровней за весь период

наблюдений. Так, на р. Абакан максимальный уровень был на 0,5 м выше наблюдавшегося с 1953 г., и город был под угрозой затопления.

Резко поднялся уровень воды в Енисее и Красноярском водохранилище, и критическое положение при его переполнении вынудило открыть пять из семи затворов водопропускных сооружений. Расход сброса достигал 12 тыс.м³/с, около 3 тыс.м³/с сбрасывала недостроенная Саяно-Шушенская ГЭС. Уровень воды в нижнем бьефе Красноярской ГЭС в короткое время поднялся на 4 м, что вызвало наводнение с большим материальным ущербом. Были затоплены или подтоплены жилые массивы в ряде районов города, нарушена работа водозаборных сооружений, подтоплен ряд промышленных предприятий. Паводочная волна разрушила причалы, разбросала караваны барж, затопила предприятия лесного хозяйства, расположенные в долине Енисея, многие луга и сенокосы, вынудив спешно эвакуировать стада с островов.

Но не только интенсивные ливневые осадки и таяние снегов в горах, вызвавшие резкий подъем уровня воды в Енисее и на его притоках (подобный подъем последний раз наблюдался в 1902 г. и имел обеспеченность 1%), и недостаточная точность предсказания характера летнего половодья 1988 г. явились причиной наводнения.

Ряд хозяйственно-организационных факторов, несмотря на штормовые предупреждения местных отделений Госкомгидромета, не позволил пропустить необычное летнее половодье на Енисее без больших потерь. Это — прежде всего неготовность к заполнению ложа и работе в режиме приток — сброс Саяно-Шушенского водохранилища, которое хотя и срезало на 30% максимальные расходы в июне 1988 г., понизив этим уровни в Красноярске на 1,5 м, но не приняло того количества воды, которое обеспечило бы более существенную срезку волны летнего половодья. К лету 1988 г. были готовы агрегаты ГЭС, однако ложе водохранилища еще не было подготовлено к затоплению — не сведен лес, не произведена санитарная обработка почвы, не вывезено полностью население, не перенесены социально-бытовые объекты из зоны затопления и т.д.

Кроме того, несмотря на то что Красноярская ГЭС к тому времени эксплуатировалась уже 16 лет, строители не обустроили русло Енисея. Это усугубило последствия наводнения в нижнем бьефе из-за перекрытия или сужения ряда протоков, наращивания прибрежных русловых участков, постройки хозяйственных объектов в пойме реки. Необходимо также отметить, что все сооружения в нижнем бьефе Красноярской ГЭС рассчитаны на максимальный

пропуск из водохранилища 0,1% обеспеченности (в соответствии с «Основными правилами использования водных ресурсов Красноярского водохранилища»). Однако 31 июля 1988 г. сброс, равный 12000 м³/с, превышал попуск 0,1% обеспеченности.

Пример рассмотренного наводнения еще раз свидетельствует о необходимости соблюдения главного правила — в нижних бьефах гидроузлов и на территориях, подвергающихся периодическим затоплениям паводочными водами, не должно быть важных, недостаточно защищенных хозяйственных объектов и жилых построек, не должно быть хозяйственных объектов, стесняющих поток воды, которые могут быть разрушены. Тенденция все большей освоенности, застроенности и заселенности нижних бьефов и паводкоопасных территорий нарастает несмотря на печальный исторический опыт и предупреждения гидротехников и природоохранительских организаций. Так, по данным Роскомвода при прорыве плотин в г. Пензе в зоне затопления может оказаться 75 тысяч человек, в г. Челябинске — 170 тысяч, а в случае прорыва плотины Волжского каскада — несколько миллионов человек.

По данным МЧС в целом во всем Приволжском регионе, включающем значительную часть бассейна Волги, в случае прорыва плотин будут затоплены территории площадью 8 тыс. км², на которых проживает до 1,5 млн. человек [22]. Материальные и экологические потери, которые могут быть при разрушении плотин Волгоградской и Саратовской ГЭС, и наводнениях, связанных с прохождением волн прорыва, рассмотрены ранее [14]. Но необходимо напомнить, что опорожнение водохранилищ (аварийное или запланированное) представляет очень сложную водохозяйственную проблему с труднопрогнозируемыми последствиями. Нарушения инфраструктуры хозяйственных связей, большие ущербы экономике, экологические ущербы, возможные человеческие жертвы, свидетельствуют о большой опасности наводнений при прорыве плотин. На примере гипотетического разрушения указанных плотин ГЭС была показана сложность и многогранность рассматриваемой проблемы, непредсказуемость некоторых последствий, угрожающих прежде всего жизни и здоровью людей. Поэтому усилия должны быть направлены на предвидение, предупреждение и прогноз возможных последствий аварийных ситуаций. Тем более, что до сих пор раздаются призывы к спуску водохранилищ, не подкрепленные прогнозами возможных последствий этих действий.

Территории, подверженные особенно продолжительным затоплениям от наводнений (вода стоит в течение многих месяцев),

относятся к районам экологического бедствия. Но по мнению специалистов в области наводнений [1] до сих пор нет надежных долгосрочных прогнозов появления катастрофических наводнений, достоверных методик расчетов причиняемого ими ущерба и общепринятой концепции защиты.

В настоящее время оперативное прогнозирование паводочной опасности осуществляет Агентство МЧС России по мониторингу и прогнозированию чрезвычайных ситуаций, объединяющее более 30 ведущих организаций, головной среди которых является ВНИЧ ГОЧС [23]. Центр мониторинга располагает базой данных по опасным уровням, с которыми сопоставляются наблюдаемые и прогнозные уровни конкретных водных объектов. Существующая обстановка отслеживается с помощью средств космического и авиационного наблюдения. По данным космических снимков производится также оценка ущерба от наводнений по разработанной в МЧС технологии.

Вспомогательным средством прогнозов паводочной опасности должен стать подготавливаемой к печати «Атлас чрезвычайных ситуаций», где помещена разработанная в МЧС карта «Опасность наводнений в связи с половодьями и паводками на реках».

Во многих странах, в том числе в бывшем СССР, не было систематического учета ущербов от стихийных бедствий, в том числе от наводнений, а также от волн прорыва. Вследствие отсутствия единой методики учета ущербов их оценка производится во многих случаях лишь для прямых потерь, связанных с непосредственным разрушительным влиянием, например, естественных и прорывных наводнений.

Отдел секретариата ООН по координации чрезвычайной помощи (ЮНДРО) и аналогичные национальные организации не делают принципиальных различий между стихийными бедствиями и технологическими авариями, ранжируют их по числу жертв и размеру экономического ущерба. В Министерстве по чрезвычайным ситуациям основным критерием оценки чрезвычайных ситуаций по степени тяжести последствий является количество пострадавших людей и количество людей с нарушенными условиями жизнедеятельности, а также размер зоны проявления чрезвычайной ситуации и минимальный размер компенсации ущерба.

В МГУ ущербы оценивают по восстановимости потерь (полностью восстановимые, не полностью и т.д.) и возможным срокам их восстановления (до 3-х сут., до 1 года, 5 – 7 лет в экономическом обозримом масштабе времени). Сделана также попытка разработать универсальную шкалу тяжести последствий стихийных бед-

ствий, построенную по логарифмическому закону и учитывающую потери по числу человеческих жертв и материальному ущербу в рублях и долларах США [21]. Логарифмический характер шкалы обеспечивает перекрытие всего диапазона возможных масштабов бедствий, а также дает необходимое огрубление данных о сильнейших стихийных бедствиях, что полезно при применении шкалы к описанию исторических событий.

Основными факторами, определяющими размеры бедствий и ущерба при прохождении природных катастрофических наводнений и волн прорыва, являются, по мнению автора, высота подъема уровней воды, скорость продвижения гребня волны и площадь затоплений. В зависимости от этих факторов, опираясь на многие опубликованные и архивные данные о природных и антропогенных наводнениях, автором выделены следующие четыре типа наводнений по их последствиям, учитывающим кроме гидрологических характеристик и их повторяемости (для природных наводнений) изменения социальных факторов и размеры материального ущерба — незначительные, ощутимые, значительные и катастрофические (таблица).

Предлагаемая типизация одного из наиболее распространенных бедствий — наводнений — не содержала на первом этапе конкретных численных критериев, она их приобрела при разработке легенды к картам последствий разрушения гидротехнических сооружений при характеристике остроты ситуации в различных районах нижнего бьефа в зависимости от параметров волны прорыва [9, 15, 16].

Последствия экстремальных наводнений и прохождения волн прорыва можно типизировать далее по видам потерь — экологические и экономические.

Наводнения (естественные и прорывные) вызывают прежде всего экологические потери, из которых главными являются демозкологические, определяющие социальную значимость ущербов. Это — морально-психологические травмы, заболевания и человеческие жертвы. Демозкологические потери могут быть вызваны как непосредственно стихийными или техногенными катастрофами, так и их последствиями. Например, заболевания и гибель людей могут быть связаны с загрязнением источников водоснабжения и ухудшением эпидемиологической обстановки вследствие прохождения волны прорыва или катастрофического половодья. Велики и недостаточно пока оцениваются психологические травмы, вызванные эмоциональным воздействием на людей (угрозы жизни и угрозы потери имущества). Нервные потрясения связаны также с картинами разрушений, гибелью людей и животных.

Типизация последствий естественных и техногенных наводнений по масштабам их проявлений

Последствия наводнений (естественных и от волн прорыва)	Характеристика последствий (по гидрологическим данным, площадям затоплений, социально-экономич. показателям и ущербам)	Повторяемость (раз в n лет) ¹
Незначительные	Небольшие подъемы уровней воды и площади затоплений, сохранение режима жизни и производственной деятельности, незначительный материальный ущерб	Почти ежегодно
Ощутимые	Затопления сравнительно больших участков речных долин, отдельные нарушения уклада жизни и производственной деятельности людей, частичная эвакуация населения, ощутимый материальных ущерб	1 раз в 20 – 25 лет
Значительные	Частичное или полное затопление долины реки, существенные нарушения производственной деятельности и резкие изменения жизни, массовая эвакуация населения и материальных ценностей, значительный материальный ущерб.	1 раз в 50 – 100 лет
Катастрофические	Затопления больших территорий (в том числе вне границ долин), паралич хозяйственной деятельности, полное изменение уклада жизни, огромный материальный ущерб, гибель людей	1 раз в 100 – 200 лет

* Для естественных наводнений

Ущерб при наводнениях необходимо подразделять также на оценимые (поддающиеся в той или иной степени оценке в денежном выражении) и на неопределимые, не поддающиеся точной денежной оценке. С этих позиций все экологические потери, в первую очередь демозоологические, относятся к неопределимым ущербам.

Экономические потери могут быть непосредственными (прямыми) или косвенными. К прямым потерям относятся разрушения жилых и промышленных объектов, памятников культуры, сельскохозяйственных объектов, коммуникаций, портов и причалов, рыбозаводных заводов и рыбозаводческих хозяйств, лесобирж,

складов заготовленной древесины, потери сельскохозяйственной и промышленной продукции и др. Но еще более опасны и составляют основную часть экономических потерь косвенные ущербы, связанные с последствиями разрушительного воздействия экстремальных половодий, паводков и волн прорыва, — сокращение производства, прекращение водоснабжения и выработки электроэнергии, нарушение связи, судоходных и водных путей сообщения, освоение новых земель, переселение людей и т.д.

При подсчетах ущербов в большинстве случаев не учитываются потери, связанные с непригодностью в период наводнений поверхностных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Поэтому прибегают к использованию подземных источников, расположенных вне зоны затопления или резервных источников, пригодных для питьевого водоснабжения, что существенно увеличивает потери.

В период наводнений происходит еще много проявлений «вредного» воздействия вод, ущерб от которых не всегда можно оценить. Это — размыв и разрушение берегов рек, озер, водохранилищ, плотин, дамб, подтопление подземными водами городов и целых регионов, заболачивание земель, эрозия почв, развитие оврагов и т.д.

Очень существенны и будут расти экономические затраты на прогнозные и профилактические работы по предотвращению катастроф. К косвенным ущербам справедливо отнесены также спад торговых и банковских операций, уменьшение доходов, в том числе вследствие прекращения производства, снижение урожая сельскохозяйственных культур, потери плодородия почв, замена энергоисточников, увеличение транспортных расходов и др.

К косвенным ущербам относят также убыль рабочей силы и сокращение производства из-за эвакуации населения, пострадавшего от наводнений и т.п. Косвенный ущерб должен включать также расходы на лечение пострадавших, на санитарно-эпидемиологические мероприятия и др. [19].

Важным фактором снижения ущербов является страхование паводкоопасных территорий, которое должно строиться и решаться на основе общих принципов страхования с учетом специфических особенностей последствий наводнений природного или техногенного характера. В настоящее время отсутствует законодательство об обязательном страховании имущественных интересов граждан и юридических лиц на паводкоопасных территориях. Однако разработан и требует внедрения комплекс предложений, касающихся вопросов законодательства и отдельных нормативно-методических актов [6].

В Российской Федерации нет, к сожалению, статистики наводнений и достоверных данных об ущербах. Однако сделана попытка сравнительной оценки средних многолетних потерь от наводнений по экономическим районам, различающимся по плотности населения и количеству населенных пунктов [11]. Как видно из рис. 2, наибольшие ущербы приходятся на Дальневосточный и Сибирский регионы несмотря на общую небольшую плотность населения и количество городов и поселков, сосредоточенных, однако, на паводкоопасных территориях (в долинах рек) с интенсивными, часто повторяющимися наводнениями.

Велики ущербы также в Центральном, Северо-Кавказском и Северо-западном районах. В горных районах особенно опасны наводнения, формирующиеся на реках дождевого, ледникового и снежно-ледникового питания, особенно при различном сочетании этих факторов.

В последние годы к регионам, которым наводнения наносят наибольший ущерб, МЧС относит Приморский край, Сахалинскую и Амурскую области, республики Бурятия, Дагестан и Кабардино-Балкария, Краснодарский и Ставропольские края, Астраханскую и Волгоградскую области (Государственный доклад, 2002).

Не оценены полностью причины, последствия и ущербы от наводнений летом 2002 г. в Ставропольском и Краснодарском краях. Хотя очевидно, что они имеют не только природное, но в значительной степени антропогенное происхождение: несогласованность действий местных органов власти, несанкционированный сброс воды из водохранилищ, неготовность администрации и населения к действиям в чрезвычайных ситуациях и т.д.

Главное средство борьбы с наводнениями — прогноз и предупреждение опасных гидрологических явлений.

До недавнего времени основное внимание соответствующих органов власти и специальных ведомств уделялось ликвидации последствий стихийных бедствий и антропогенных катастроф, т.е. оперативному реагированию на чрезвычайные ситуации (ЧС), что требует больших затрат по ликвидации ущербов, но не всегда способствует снижению рисков появления чрезвычайных ситуаций и обеспечению безопасности населения [20]. Важной составной частью этих мер является уточнение характеристик речного стока, особенно его экстремальных значений, используемых для прогноза гидрологических явлений.

Неучет изменяющейся гидрометеорологической обстановки, особенно в связи с прогнозируемыми изменениями климата, мо-

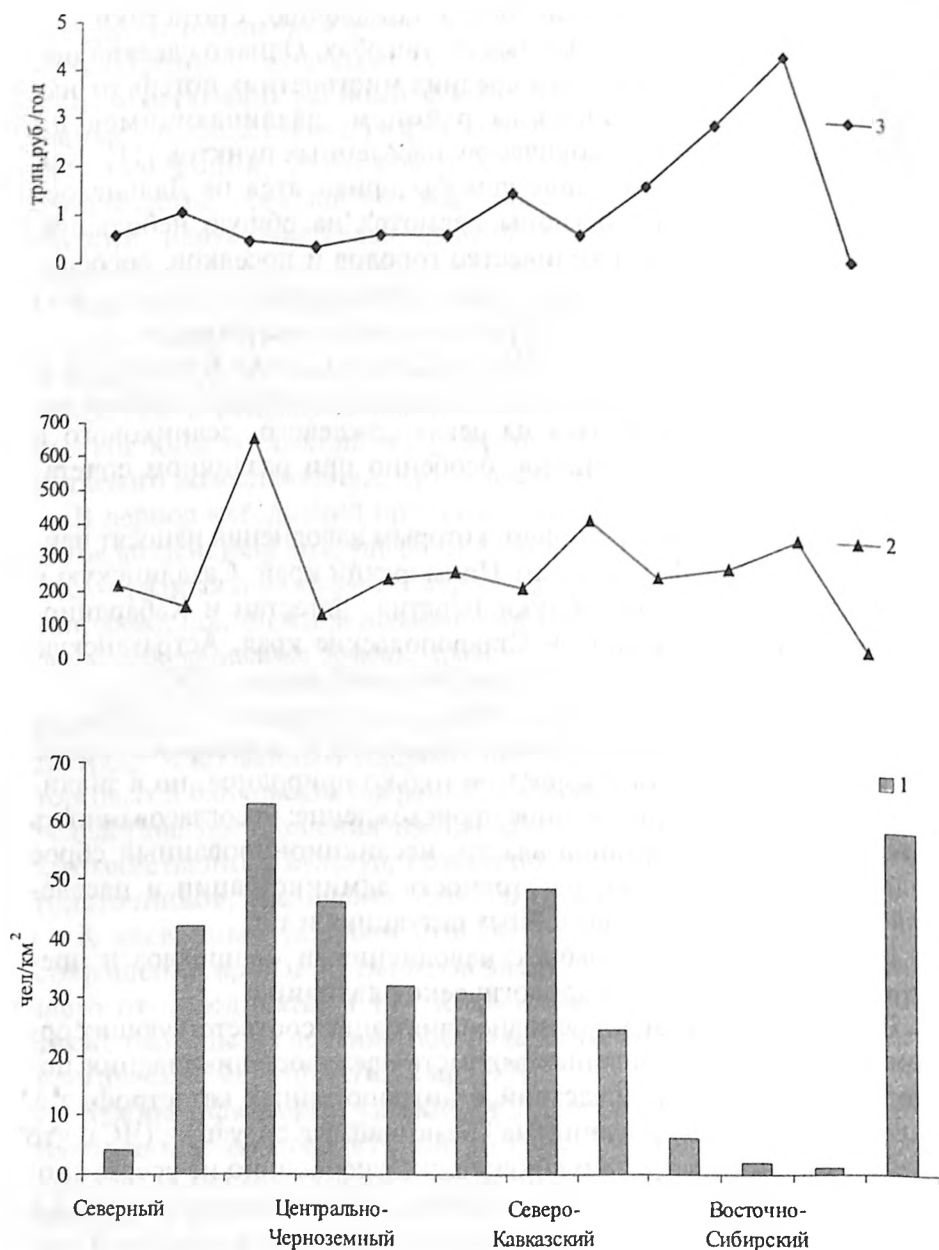


Рис. 2. Средний многолетний социально-экономический ущерб от последствий наводнений на территории России: 1 — плотность населения по экономическим районам (чел/км²); 2 — количество городов и поселков городского типа; 3 — ущерб (трлн. руб./год в ценах апреля 1997 г.).

жет привести к тяжелым последствиям для населения и многих отраслей хозяйства, в том числе к увеличению вероятности аварий и катастроф на подпорных гидротехнических сооружениях [13, 24, 25]. В настоящее время отвергается принцип стационарности гидрологических рядов, ведется их перерасчет с учетом меняющейся гидрометеорологической обстановки.

Составной частью работы по уточнению данных гидрологических наблюдений является перестройка сети постов и станций Росгидромета в связи с переходом России к рыночной экономике, получением субъектами Федерации большей самостоятельности, изменением функций и условий финансирования гидрологической сети, необходимостью преобразования ее технического оснащения, увеличения числа автоматизированных пунктов наблюдений, с внедрением аэрокосмических методов измерений и др. Разработанная в ГГИ стратегия функционирования гидрологической сети наблюдений предусматривает ее разделение на основную, финансируемую из федерального бюджета, и дополнительную, финансируемую из региональных бюджетов [5].

В России необходимо создание федерального органа надзора за комплексной безопасностью или закрепление этих функций за одним из существующих органов власти, создание единого информационного банка данных о ЧС и о спасательных силах, более широкое привлечение науки при экспертизе ЧС, их прогнозе и оценке ущерба.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Авакян А.Б.** Наводнения в прошлом, настоящем и будущем: концепция защиты. //Бюллетень. Использование и охрана природных ресурсов в России. 2001. № 10.
2. **Алексеев Н.А.** Стихийные явления в природе. Проявление, эффективность защиты. М.:Мысль. 1988.
3. **Асариц А.Е.** Наводнения — природные и рукотворные. Недавний опыт и давние мысли. //Бюллетень использования и охраны природных ресурсов в России. 2002. № 78.
4. **Борщ С.В., Мухина В.М.** Метод прогноза возможного ущерба от наводнений (на примере Московской области). //Метеорология и гидрология. 2000. № 7.
5. **Воскресенский О.Б., Явойская Н.В.** Методические основы преобразования речной гидрологической сети в новых экономических условиях. //Метеорология и гидрология. 2002. № 4.
6. **Каганов Г.М., Турбина К.Е.** Концептуальные основы законодательных и нормативных предложений, связанных с возможностью и условиями введения государственной программы страхования от наводнений природного и техногенного происхождения. //Безопасность энергетических сооружений. ОАО «НИИЭС». М.: 2000. вып. 6.

7. Кондратьев К.Я., Донченко В.К. Экодинамика и геополитика. Том 1. Глобальные проблемы (К.Я. Кондратьев). //СПб. 1999.
8. Коржуев С.С. Ледовые заторы и заторные наводнения на северных реках и их экологическая оценка. «Рельеф среды жизни человека (экологическая геоморфология). М.: Медиа-Пресс. 2002.
9. Коронкевич Н.И., Малик Л.К., Барабанова Е.А. Прогноз последствий разрушения гидроузлов. //Известия РАН, сер. географическая, 1995, № 2.
10. Корытный Л.М., Кичигина Н.В. Наводнения в речных долинах Восточной Сибири. //Водные ресурсы. 1998. том 25. № 2.
11. Кофф Г.Л., Чеснокова И.В., Шахраманьян М.А. Оценка социально-экономического ущерба от опасных процессов на территории России. // Прикладная геоэкология, чрезвычайные ситуации, земельный кадастр и мониторинг. М.: изд-во РЭФИЯ. 1997. вып. 2.
12. Малик Л.К. Географические прогнозы последствий гидро-энергетического строительства в Сибири и на Дальнем Востоке. М.: Институт географии АН СССР. 1990.
13. Малик Л.К. Проблемы эксплуатации и безопасности объектов энергетики в условиях меняющегося климата. //Известия РГО. т. 134. 2002. № 6.
14. Малик Л.К., Барабанова Е.А. Прогноз чрезвычайных ситуаций при повреждении плотин нижних ступеней Волжского каскада ГЭС. // Проблемы региональной экологии. 2002.
15. Малик Л.К., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А. Повреждения гидроузлов и возможные последствия. //Водные ресурсы. 2001. 28 № 2.
16. Малик Л.К., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А. Безопасность и риск аварий и катастроф на подпорных гидротехнических сооружениях. // Геоэкология, инженерная гидрогеология, геокриология. 2001. № 4.
17. Махутов М.М., Осипов В.И., Гаденин М.М. и др. Научные основы обеспечения комплексной безопасности России, «Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. М.: 2002. вып. № 5.
18. Мягков Г.М. География природного риска. //М. МГУ. 1995.
19. Пырченко В.А. Оценка ущерба и уязвимости: реальная ситуация и пути решения. //Оценка и управление природными рисками. // М.: АНКИЛ. 2000.
20. Рагозин А.Л. Общие положения оценки и управления природными рисками //Геоэкология. 1999. № 5.
21. Родкин М.В., Шебалин Н.В. Проблемы измерения катастроф. //Известия РАН. сер. географическая. 1993. № 5.
22. Шахраманьян М.А., Акимов В.А., Козлов К.А. Оценка природной и техногенной безопасности России. // М.: ВНИИ ГОЧС. 1998.
23. Шахраманьян М.А. Проблемы обучения новым технологиям мониторинга, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. // Человек и катастрофы: проблемы обучения новым технологиям. Международный симпозиум. М.: ВНИИ ГОЧС. Информиздат Центр. 1999.
24. Malik L.K. Paleohydrological data in verification of water management calculation. //Hydrological consequences of global climate changes. Geologic and historic analogs of future conditions. Conference papers and abstracts. Moscow and Central Part of Russian Plain. August 21–26. 2000.

25. Malik L.K., Zajtseva I.S., Koronkevich N.I., Barabanova E.A. Briefing Paper on Development of Dams in the Russian Federation and other NIS Countries. // Case study prepared as an input to the World Commission on Dams. 2000: Cape Town. <http://www.dams.org/>.

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ, ВЫЗВАННЫХ НАВОДНЕНИЯМИ В XIX, XX ВЕКАХ И НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

*Нигметов Г.М., Филатов Ю.А., кандидаты техн наук
(ФЦ ВНИИ ГОЧС)*

Территория Российской Федерации характеризуется чрезвычайно большим разнообразием природных условий. На ее огромном пространстве в 17,1 млн. км² происходят более тридцати видов опасных природных явлений и множество видов явлений техногенного характера. К наиболее разрушительным из них относятся наводнения.

По повторяемости, площади распространения и суммарному среднему годовому материальному ущербу в масштабах нашей страны наводнения занимают первое место в ряду стихийных бедствий. По количеству человеческих жертв и удельному материальному ущербу (т.е. ущербу, приходящемуся на единицу пораженной площади) наводнения занимают второе место после землетрясений.

В зависимости от условий возникновения выделяется несколько групп наводнений: наводнения, связанные, в основном, с максимальным стоком от весеннего таяния снега (половодья); наводнения, формируемые дождями, ливнями или таянием снега при зимних оттепелях (паводки); наводнения, вызванные, в основном, большим сопротивлением, которое водный поток встречает в реке при скоплении на отдельных участках русла льдин, при весеннем ледоходе (заторах) или скоплениях мелкобитого льда, при ледоставе в начале зимы (зажоры); наводнения, создаваемые ветровыми нагонами воды в морских устьях рек, на крупных озерах и водохранилищах (нагонные наводнения); наводнения, возникающие при прорывах плотин (искусственных — при оползнях и ми, или естественных, созданных природой — при оползнях и обвалах горных пород, перегораживающих русло водотока), а также при сбросах воды из переполненных водохранилищ.

Особо выделяются наводнения, вызванные сейсмическим воздействием при подводных землетрясениях или вулканических извержениях — цунами.

Основными характеристиками наводнений являются: *уровень воды* — высота поверхности воды в реке (озере, водохранилище) над условной горизонтальной поверхностью сравнения, называемой обычно нулем гидрологического поста, и *расход воды* — количество воды (сток воды), протекающей через данный створ реки за секунду. Уровень воды выражается обычно в сантиметрах, а расход — в кубических метрах за секунду.

Важной характеристикой является *абсолютная отметка уровня воды*, т.е. превышение поверхности воды в реке (озере, водохранилище) над определенной поверхностью моря. В России исчисление высот ведется от среднего уровня Финского залива Балтийского моря у г. Кронштадта (в так называемой Балтийской системе высот). Абсолютная отметка уровня воды измеряется в метрах.

Основные характеристики водного режима реки — уровень и расход воды — непрерывно изменяются во времени. Уровень воды в рассматриваемом участке или створе реки определяется расходом воды, т.е. уровень воды в створе реки устанавливается автоматически такой, какой необходим для пропуски данного расхода воды. Обычно на основании серии измерений для данного створа реки определяется графическая зависимость между расходом и уровнем воды, называемая кривой расходов. График изменения расходов воды во времени, так называемый *гидрограф стока*, является одной из составных характеристик рассматриваемой реки.

Важнейшими характеристиками для оценки мощности наводнения являются *максимальный уровень* и *максимальный расход* воды за время наводнения. Максимальный уровень воды является критерием стихийных гидрологических явлений.

При проектировании различных гидротехнических сооружений и при оценке риска от наводнений для населения и экономики прилегающих к данной реке территорий учитывается, кроме величины максимального уровня или максимального расхода воды, также *повторяемость* этой величины. Повторяемость той или иной величины максимального уровня есть число лет, за которые эта величина оказывается превзойденной. Повторяемость уровня устанавливается через вероятность его превышения, называемую в гидрологии обеспеченностью. Соотношение между повторяемостью ($N_{\text{лет}}$) и обеспеченностью ($P, \%$) равно:

$$N = \frac{100}{P}.$$

Так, например, если обеспеченность $P = 1\%$, то $N = 100$ лет, т.е. в среднем 1 раз в 100 лет случится наводнение с максимальным уровнем, с $H_{\max} \geq H_{\max, P=1\%}$.

Другими характеристиками наводнений, имеющими большое значение для прогноза возможных последствий наводнения и проектирования гидротехнических сооружений, являются: скорость течения, скорость подъема уровня воды, объем наводнения, площадь, слой и продолжительность затопления местности.

К факторам, обуславливающим величины основных характеристик наводнения (максимального уровня и максимального расхода воды) для случая весеннего половодья, относятся следующие:

запас воды в снежном покрове (снегозапасы) перед началом весеннего таяния;

объем и интенсивность атмосферных осадков в период снеготаяния и половодья;

осенне-зимнее увлажнение почвы к началу весеннего снеготаяния;

наличие ледяной корки на поверхности почвы;

интенсивность снеготаяния;

сочетание волн половодья крупных притоков речного бассейна, озерность, заболоченность и лесистость бассейна

По размерам или масштабам наводнений и по наносимому ими ущербу различаются четыре вида наводнений:

1. **Низкие (малые) наводнения** наблюдаются в основном на равнинных реках и имеют повторяемость примерно один раз в 5 – 8 лет (обеспеченность их ~ 12 – 20%). Затопливается при этом менее 10% сельскохозяйственных угодий, расположенных в низких местах. Такие наводнения наносят незначительный материальный ущерб и почти не нарушают ритма жизни населения.

2. **Высокие (большие) наводнения** сопровождаются значительным затоплением, охватывают сравнительно большие участки речных долин и иногда существенно нарушают хозяйственный и бытовой уклад населения. Они нередко приводят к частичной эвакуации людей, наносят ощутимый материальный и моральный ущерб. Повторяемость их один раз в 10 – 25 лет (обеспеченность 4 – 10%). Затопливается примерно 10 – 15% сельскохозяйственных угодий.

3. **Выдающиеся наводнения** охватывают целые речные бассейны. Они парализуют хозяйственную деятельность и резко нарушают бытовой уклад населения, наносят большой экономический ущерб. Во время таких наводнений обычно возникает необходимость массовой эвакуации людей и материальных цен-

ностей из зоны затопления. Выдающиеся наводнения имеют повторяемость, примерно, один раз в 50 – 100 лет (обеспеченность 1 – 2%). Затопляется при этом 50 – 70% сельскохозяйственных угодий, а также значительное количество населенных пунктов. На территории России таким наводнениям подвержено свыше 150 тыс. км², в том числе более 300 городов, десятки тысяч более мелких населенных пунктов, с суммарным количеством населения свыше 5 млн. человек, более 7 млн. га сельскохозяйственных угодий и множество хозяйственных и транспортных объектов, расположенных по берегам рек и водоемов.

4. **Катастрофические наводнения** вызывают затопления громадных территорий в пределах одной или нескольких речных систем, могут охватывать, например, территории нескольких субъектов Российской Федерации. В зоне затопления полностью парализуется хозяйственная и производственная деятельность, на довольно продолжительное время резко изменяется жизненный уклад населения. Такие наводнения приводят к огромным экономическим ущербам (достигающим, например, в России, единиц и даже десятков миллиардов рублей) и гибели значительного количества людей. Их повторяемость обычно один раз в 100 – 200 лет и реже (обеспеченность максимальных уровней менее 1%). Затопляется более 70% сельскохозяйственных угодий, множество населенных пунктов, объектов экономики, значительная протяженность линий коммуникаций.

Количество жертв при катастрофических наводнениях, хотя и уступает количеству жертв при землетрясениях, однако суммарное количество жертв от наводнений за значительный ряд лет на Земле сопоставимо с количеством жертв от всех других стихийных бедствий вместе за этот период времени. Так, например, это подтверждается результатами исследований глобальных стихийных бедствий, проведенных по информации за 20-летний период, с 1947 по 1967 гг., учеными Шиханом и Хевиттом.

Наибольшее число жертв наводнений в течение указанного периода — 154 тыс. человек — приходится на Азию (без СССР). Число жертв наводнений за этот период времени в Европе (без СССР) — 10540 человек. В Африке, Южной Америке и Карибском районе зарегистрировано по 2000 – 3000 жертв. За тот же период времени число жертв наводнений составило в Северной Америке — 680 человек и Австралии — 60 человек, а в сумме по всем этим регионам — 173170 погибших. Этот итог сопоставим с числом, равным 269635 жертв, относимых за счет 18 других

стихийных бедствий, рассматриваемых в этом исследовании, за этот же период времени. Если же учесть, что многие из этих бедствий — например торнадо, тайфуны, ураганы и др. — также сопряжены с наводнениями, число жертв наводнений, очевидно, становится еще большим.

На реках России за весь исторический период наблюдений зарегистрировано весьма значительное количество выдающихся и катастрофических наводнений. Однако негативные последствия от них не достигли столь огромных масштабов, как на реках Азии, Европы и Америки, например По и Арно в Италии, Янцзы и Хуанхэ в Китае, Ганге и Брахмапутре в Индии, Инде в Пакистане, Миссури и Миссисипи в США, Амазонке в Бразилии.

Основной причиной такого отличия в последствиях наводнений заключается в особенностях климата России. На большей части территории нашей страны крупные наводнения связаны с весенним половодьем, а на Дальнем Востоке — с периодом летних муссонных дождей. Поэтому наводнения повторяются в один и тот же сезон года, о них знают, их ждут в этот период времени.

На всех же вышеперечисленных и многих других реках стран Азии, Европы и Америки наводнения, в основном, вызываются обильными дождевыми и ливневыми осадками, место и время которых заранее предвидеть практически невозможно.

В отличии масштабов последствий наводнений имеет значение также меньшая хозяйственная освоенность и заселенность (кроме центральных и южных районов европейской части нашей страны) по сравнению с зарубежными европейскими странами.

Следует также отметить и такую особенность нашей страны, как большую протяженность ее территории с запада на восток и с севера на юг. В связи с этим, наводнения, значительные по своим масштабам и последствиям, случаются почти ежегодно в тех или иных регионах огромной территории Российской Федерации. При этом на территории нашей страны случаются наводнения различных типов: и половодья, и паводки, и заторные, и зажорные, и нагонные наводнения, а на Дальнем Востоке изредка наблюдаются и цунами.

Некоторые сведения о наводнениях, имевших место на территории России, наряду со сведениями о других природных стихийных явлениях, можно почерпнуть из русских летописей. Из летописных сведений наиболее однородны те, что касаются центра и запада европейской части России и относятся к XIII—XVII векам. Всего за этот период отмечено около 600 чрезвычайных

чайных ситуаций природного характера. По количеству упоминаний чрезвычайные ситуации природного характера распределились следующим образом:

сильные морозы, заморозки в вегетационный период	26,6 %
засухи	15,5 %
наводнения	13,7 %
грозы, градобития	13,7 %
ураганы, бури, смерчи	10,5 %
особо сильные или длительные дожди	7,1 %
сильные снегопады, метели	6,2 %
особо теплые зимы (неблагоприятные для урожая)	3,6 %
землетрясения	3,0 %
оползни и лавины	единично

Число чрезвычайных ситуаций, связанных с наводнениями, в последующие века росло быстрее, чем число других стихийных бедствий. Основными причинами этого являлось: изменение режима стока и состояния речных русел вследствие массовой выруб-ки лесов и увеличения числа поселений по берегам рек. Увеличение числа поселений и плотности населения по берегам рек России было связано с развитием горнодобывающей промышленности, развитием пароходства, но более всего с освоением Сибири (с XVII в.). Если наблюдения за режимом рек велись земледельцами Восточной Европы в течение веков, то в Сибири русские поселенцы столкнулись с неизвестными им ранее особенностями наводнений и нередко места поселений выбирались ими неудачно, на территориях, доступных воздействию наводнений. Из-за угрозы наводнений в различное время переносились на новые места, например, такие города, как Белоозеро, Великий Устюг, Галич, Калуга, Орел, Переяславль-Залесский, Полоцк, Саратов и др.

Наиболее тяжелыми по своим последствиям оказались наводнения, вызванные заторам льда и сочетанием интенсивного снеготаяния и сильных дождей. В русских летописях отмечалось разовое число жертв наводнений, составлявшее тысячу человек, а пострадавших — десятки тысяч.

Следует отметить, что тяжесть последствий природных чрезвычайных ситуаций, обусловленных наводнениями, на территории России (до XX века) в целом имела тенденцию к некоторому снижению по мере многовекового постепенного рационального

«отбора» мест расположения населенных пунктов, приспособления к водному режиму рек сельскохозяйственных технологий, развития транспортной сети и взаимопомощи регионов.

В XX веке, особенно со второй его половины, наметилась тенденция увеличения тяжести последствий наводнений. По данным ЮНЕСКО, за последнее столетие в мире от наводнений погибло около 9 млн. человек (от землетрясений и ураганов за этот же период времени погибло 2 млн. человек).

Об усилении катастрофичности наводнений в последние десятилетия свидетельствует, например, тот факт, что начиная с 70-х — 80-х годов XX века по всему миру дождевые паводки и весенние половодья во многих районах побивали рекорды по своим масштабам и интенсивности за сто лет или за время наблюдений, а по расчетам гидрологов некоторые из них соответствовали повторяемости максимальных уровней и расходов воды один раз в 300—1000 лет (ливневые наводнения в Новой Зеландии, Великобритании, Португалии и др.).

По данным зарубежных источников за период с 1962 по 1992 гг. от природных и техногенных катастроф в мире погибло около 4 млн. человек, число пострадавших превысило 3,3 млрд. человек, а прямой экологический ущерб составил около 377,8 млрд. долларов. При этом число пострадавших от наводнений составило 36% от общего числа пострадавших.

В России за тот же период времени от природных катастрофических явлений погибло около 3 тысяч человек, а число пострадавших составило около 540 тысяч, из них 30% приходится на наводнения. Экономический ущерб от наводнений составил более 30% от суммарного ущерба.

Систематизированный, регулярный сбор и обобщение данных о природных чрезвычайных ситуациях и их последствиях были организованы в России с конца 80-х годов — начала 90-х годов XX века. Согласно имеющимся данным, в период 1985—1993 гг. на территории России происходило ежегодно 130—140 чрезвычайных ситуаций природного характера. Колебания их числа от года к году находились в пределах ~ 30%. В соответствии со своими причинами природные чрезвычайные ситуации в период 1985—1993 гг. можно подразделить следующим образом (с целью сопоставления аналогичных данных за предыдущие столетия, приведенных выше, порядок их деления сохранен таким же):

сильные морозы, заморозки	
в вегетационный период	3 %
засухи	2 %

наводнения	35 %
грозы, градобития	1 %
ураганы, бури, смерчи	19 %
сильные или особо длительные дожди	14 %
сильные снегопады, метели	75 %
землетрясения	8 %
оползни, обвалы, сели	5 %
лавины	2,5%
гололед, подтопление, карстовый провал	1%

Чрезвычайные ситуации, создаваемые наводнениями и другими опасными природными явлениями, наносили экономике России в период времени 1985–1993 гг. прямой экономический ущерб следующего порядка (в ценах конца 80-х годов):

наводнения, вызванные снеготаянием, — сотни миллионов рублей в год и до 550 миллионов рублей за одну ЧС (в бассейне Волги и в Западной Сибири);

наводнения, вызванные ливневыми осадками, а также ураганы, тайфуны с сопровождающими их ливневыми паводками и т.п.—сотни миллионов рублей в год и до 500 – 600 миллионов рублей за одну ЧС (в Приморье, Забайкалье, Северном Кавказе);

шквалы, смерчи, местные сильные ливни и градобития — десятки миллионов рублей в год и до 10 миллионов рублей за одну ЧС (на Северном Кавказе, в Приморье, в Центральных районах европейской части России);

гололед, метели — десятки миллионов рублей и до нескольких миллионов рублей за одну ЧС (преимущественно в центре и на севере европейской части страны);

сели, лавины — миллионы рублей за одну ЧС (в горных районах Северного Кавказа, Дальнего Востока, Забайкалья).

Суммарный прямой экономический ущерб от чрезвычайных ситуаций этих видов составил за этот период времени величину порядка 1 миллиарда рублей (в ценах конца 80-х годов), без учета землетрясений. Полный ущерб составил, по-видимому, до 5 миллиардов рублей.

Если рассмотреть отдельно по регионам России, какие из перечисленных выше природных явлений с учетом их повторяемости являлись в 1985 – 1993 гг. причинами чрезвычайных ситуаций, приводящих к наибольшему вкладу в суммарный экономический ущерб, то они распределяются по регионам следующим образом (в порядке уменьшения повторяемости для каждого региона):

северо-западный регион: сильные ветры, наводнения, морозы, снегопады, метели;

центральный регион: сильные дожди, сильные ветры, наводнения, снегопады, морозы, метели, заморозки;

приволжский регион: наводнения, сильные дожди, сильные ветры, землетрясения, сели, оползни, сильные снегопады, лавины, гололед, градобития;

уральский регион: наводнения, сильные ветры, метели, сильные дожди, оползни;

западно-сибирский регион: наводнения, сильные снегопады, засуха, сильные дожди, метели, оползни;

восточно-сибирский регион: наводнения, метели, сильные морозы, сильные дожди, сильные ветры, лавины, обвалы, сели;

забайкальский регион: наводнения, сильные дожди, землетрясения, сильные ветры, засуха, сильные снегопады;

дальневосточный регион: наводнения, сильные дожди, сильные ветры, землетрясения, сильные снегопады, сели, лавины, метели, сильные морозы.

Очевидно, что наводнения являются теми природными стихийными явлениями, которые были и остаются причиной основной составляющей суммарного многолетнего экономического ущерба для подавляющего большинства регионов России (за исключением, может быть, Северо-западного и Центрального региона).

Наивысшие значения подверженности населения чрезвычайным ситуациям природного характера, и в первую очередь от наводнений (по количеству природных ЧС на 1 млн. человек населения), отмечаются для регионов Северного Кавказа и Дальнего Востока, наименьшее значение — для регионов центральной части запада России.

Периодическому затоплению при наводнениях в России подвержена территория площадью около 500 тыс. км². Ежегодно (то есть с обеспеченностью 100%) затопливается около 50 тыс. км². Под угрозой наводнений в нашей стране находятся более 500 городов и десятки тысяч других населенных пунктов.

Среднестатистическая величина ущерба от наводнений в России оценивается в 3,25 миллиардов долларов в год (или более 100 миллиардов руб.).

По другим данным, среднемноголетний ущерб от всех видов наводнений в действующих ценах составляет около 42 миллиардов рублей.

Несмотря на усиление внимания во второй половине XX века в мире к вопросам борьбы с наводнениями, к разработке и совершенствованию методов и средств борьбы с ними, за пос-

леднее десятилетие во всем мире (в том числе и в нашей стране) наблюдается значительный рост наносимого крупными наводнениями ущерба и потерь населения.

По данным Всемирной метеорологической организации, только с 1990 по 1996 гг. в мире произошло 5 катастрофических наводнений, каждое из которых было причиной смерти не менее 1000 человек: в апреле 1991 года в Бангладеш погибло при наводнении 14000 человек; в июле 1991 года в Китае погибло 3074 человека; в октябре 1992 года в Пакистане — 1500 человек; в мае-июне 1994 года в Китае — 1410 человек; в июне — августе 1996 года в Китае — 2700 человек.

Ущерб, нанесенный каждым из 21 крупнейших наводнений за этот же период времени, превышал 1 млрд. долларов. Например, наводнение июня — августа 1996 года в Китае нанесло ущерб экономике страны 26,5 млрд. долларов; наводнение июня — августа 1993 года в США — 16 млрд. долларов; наводнение июля — августа 1995 года в Северной Корее — 15 млрд. долларов; наводнение ноября 1994 года в Италии — 12,5 млрд. долларов.

Наводнение августа 1998 года на р. Янцзы и ряде других рек Северо-восточных провинций Китая привело к гибели 3000 человек и нанесло ущерб около 20 млрд. долларов.

В таблице представлены данные о крупнейших наводнениях и их последствиях, происходивших на территории России в последнее десятилетие XX века и в первые годы XXI века.

Как видно из данных таблицы, в последние десятилетия (а особенно в последние годы) катастрофические наводнения в России (так же как и в других странах) принимают все более широкие масштабы, отличаются все более возрастающими негативными последствиями, да и случаются они все чаще, все более возрастает их повторяемость.

Это объясняется, в первую очередь, глобальным изменением климата, особенно четко проявляющимся в последние годы. По предположению ученых, изменение климата на Земле связано с загрязнением атмосферы Земли и с так называемым «парниковым эффектом». При этом все более усиливается таяние льдов в арктических и антарктических зонах Земли, а также в высокогорьях, все более увеличиваются интенсивность и продолжительность ливневых и дождевых осадков в отдельных регионах Земли. Характерными примерами таких катастрофических паводков являются например паводки, происходившие в 2002 г. на территории европейских стран и в нашей стране, на Северном Кавказе.

Крупнейшие наводнения в последнее десятилетие XX века
и первые годы XXI века

Дата	Место (район бедствия)	Число жертв	Данные о масштабах и последствиях наводнений
Апрель-май 1990г.	Республика Башкортостан, Красноярский край, Эвенкийский АО. Бассейны рек Белой, Камы, Енисея, Нижней Тунгуски и др.	12	Катастрофическое весеннее наводнение (половодье). Только в Башкортостане частично или полностью было затоплено более 130 населенных пунктов, включая г. Уфу; разрушено 90 мостов, 100 животноводческих ферм. Прямой экономический ущерб республике составил около 250 млн. руб. (в ценах того времени). Уровень воды в р. Белой поднялся на 9 метров выше обычного. Уровень воды в р. Нижняя Тунгуска поднялся на 26 метров. Были частично затоплены г. Тура и ряд других населенных пунктов по берегам Енисея и его притоков.
Июль 1990г.	Приморский край		Катастрофический дождевой паводок вследствие прихода тайфунов. Ущерб от паводка превысил 100 млн. руб. (в ценах 1990г.)
Апрель-май 1991г.	Республики Башкортостан, Татарстан, Ульяновская, Самарская, Волгоградская, Астраханская области		Выдающееся весеннее половодье на Урале и в Поволжье и, вследствие этого, повышенный сброс воды из водохранилищ Волжского каскада. Только в Башкортостане в зоне наводнения оказались 33 населенных пункта, в том числе городах Уфа, Бирск, Стерлитамак. Ущерб от наводнения и повышенного сброса воды из водохранилищ в Поволжье составил свыше 180 млн. руб. (в ценах 1991г.)
Июль 1991г.	Республика Бурятия, Читинская область	4	Катастрофический паводок, вызванный сильными ливнями. Пострадало 80 населенных пунктов, в том числе города Чита, Улан-Удэ, Нерчинск, 95 линий электропередач, 183 км. линий связи, затоплено свыше 100 тыс. га с/х угодий, погибло 2700 голов скота, эвакуировано около 5100 человек. Ущерб — свыше 600 млн. руб.

Продолжение таблицы

Дата	Место (район бедствия)	Число жертв	Данные о масштабах и последствиях наводнений
Август 1991 г.	Приморский и Хабаровский края, Сахалин		Высокое наводнение, вызванное сильными ливнями. Затоплена обширная площадь с/х угодий.
Май-июнь 1992 г.	Ставропольский край		Выдающийся паводок, вызванный затяжными дождями, на реках края. Было затоплено 800 домов и подтоплено свыше 1200 домов, размыто более 500 тыс. м ² . дорог и тротуаров, повреждено 12 км. водопроводных и канализационных сетей, уничтожено 40 тыс. га и повреждено 72 тыс. га посевов.
25 января 1993 г.	Калининградская область		Выдающееся нагонное наводнение в городах Калининграде, Балтийске. В г. Калининграде был затоплен ряд заводов (вагоно-строительный, целлюлозно-бумажный, завод "Янтарь" и др.)
14 июня 1993 г.	Свердловская область	6	Из-за сильных ливней и интенсивного таяния снега в горах произошел большой подъем воды в реках Ляля, Лобва, Каква. На р. Какве в г. Серове произошел прорыв плотины. В результате катастрофического наводнения было затоплено 10 населенных пунктов, повреждено 1550 домов, из них 1 120 снесено и разрушено, разрушено 3 автомобильных моста и 1 ж/д мост. Пострадало свыше 6500 человек.
16 июня 1993 г.	Красноярский край, г. Минусинск		Выдающийся дождевой паводок. Прорвана дамба на р. Минусинке. Затоплено более 400 домов, консервный завод, хлебокомбинат и др. хозяйственные объекты. Повреждено 4 моста.
1 июля 1993 г.	Омская область		Высокий дождевой паводок. В районах области было затоплено около 300 жилых домов, а также подтоплены жилые дома в 5 районах г. Омска

Продолжение таблицы

Дата	Место (район бедствия)	Число жертв	Данные о масштабах и последствиях наводнений
2 августа 1993 г.	Республика Бурятия. Бассейны рек Селенга, Джида	2	Катастрофический паводок в результате ливневых дождей. Затоплению подверглись 7 районов республики; затоплено 8 тыс. жилых домов и более 10 тыс. дачных участков, а также 3 водозабора.
11 августа 1993 г.	Сахалинская обл.		Высокий паводок, вызванный приходом тайфуна «Робин». Затоплено 6 населенных пунктов, 42 км ж/д путей (в т.ч. 2,2 км размыто), затоплены шахта, хлебозавод и др. хозяйственные объекты.
Весна 1994 г.	Вся Европейская территория России	46	Катастрофическое весеннее наводнение (половодье). Было затоплено полностью или частично 914 населенных пунктов; затоплено более 62600 домов, 1623300 га с/х угодий; повреждено 1173 моста, 7310 км дорог, 1173 км линий связи и ЛЭП; погибло более 22600 голов скота. Общий экономический ущерб от половодья составил 1955 млрд. руб. (в ценах того времени).
7 августа 1994 г.	Белорецкий район республики Башкортостан	70	В результате проливных дождей и паводка на р. Белой была прорвана плотина Тирляндского водохранилища. Было затоплено 220 домов, сотни домов снесены потоком.
17-21 октября 1994г.	Приморский край, Хабаровский край, Сахалин		Катастрофический паводок, вызванный тайфуном "Мелисса". Ущерб составил более 300 млн. долларов. Основной ущерб был нанесен пяти районам Приморского края, а также г.г. Находка и Партизанск.
12 апреля 1997г.	Ростовская область, устье р. Дон		Высокое нагонное наводнение. Подтоплены пониженные места в районах г. Аксай, г. Ростова, г. Азова, г. Таганрога. Подтоплены ж/д в Азовском, Неклинном и Чалтырском районах. Производилась эвакуация населения из районов затопления.

Продолжение таблицы

Дата	Место (район бедствия)	Число жертв	Данные о масштабах и последствиях наводнений
Апрель-июнь 1997г.	Архангельская, Мурманская, Костромская области, республика Карелия, Уральский регион, Западная Сибирь, республика Саха (Якутия), Приморский край, Камчатка		Выдающееся весеннее наводнение (половодье). Особенно высокие уровни воды наблюдались в бассейнах рек: Кострома, Белая, Тавда, Исеть, Ница, Тура, Бакса, Тара, Сосьва, Кемь, Онега, Нижний Выг. Затопливались жилые дома г.г.: Красноярск, Уяр, Долматов, Ирбит, Тавда, Туринск, Тюмень, Беломорск, Среднеколымск, Зырянка и много других населенных пунктов.
Июнь 1997г.	Астраханская область		Высокое наводнение в результате повышенного сброса воды из Волгоградского водохранилища. Затопливались населенные пункты в Ахтубинском районе
Июнь 1997г	Новгородская, Псковская области, Ставропольский край, Республики: Карачаево-Черкесская, Кабардино-Балкария, Дагестан, Северная Осетия (Алания)		Высокие дождевые паводки в результате сильных ливневых осадков на реках указанных субъектов Российской Федерации. Подтоплено и затоплено свыше 700 жилых домов. Ущерб только в Севастопольском крае составил около 363 млрд. рублей (в ценах того времени)
Август 1997г.	Республика Тыва, Свердловская область, Краснодарский край, Карачаево-Черкесская республика		Высокие дождевые паводки в результате сильных ливневых осадков. Подтоплено и затоплено свыше 2000 жилых домов. Ущерб только в Краснодарском крае составил около 75 млрд. рублей (в ценах того времени)
Сентябрь-октябрь 1997г.	Краснодарский край, Карачаево-Черкесская Республика, Вилюйский район Республики Саха (Якутия), Ростовская область		Высокие паводки в результате обильных дождей. Подтоплено и затоплено более 1900 жилых домов. Суммарная величина ущерба по указанным субъектам Российской Федерации составила свыше 50 млрд. рублей (в ценах того времени)

Другой важной причиной увеличения в последнее время степени риска, учащения повторяемости и увеличения масштабов и тяжести последствий наводнений является все более увеличивающееся влияние антропогенного фактора на территории водосбора (урбанизация, все более увеличивающееся хозяйственное освоение территорий, примыкающих к водостокам, в том числе недопустимая застройка и заселение территорий, подверженных наводнениям, интенсивная вырубка лесов, распашка территорий водосбора; нерегулярное выполнение работ по расчистке русл, их углублению и спрямлению, по укреплению берегов, по реконструкции и укреплению гидротехнических защитных сооружений (плотин, дамб, обвалований) и т.п.).

Особенно четко тенденция возрастания масштабов катастрофичности наводнений прослеживается в самые последние годы (1999–2002 гг.). Ниже приводятся результаты анализа причин и тенденций в части чрезвычайных ситуаций, обусловленных наводнениями, имевшими место на территории Российской Федерации в 1999–2001 годах и в первом полугодии 2002 года.

Следует отметить, что и во втором полугодии 2002 года масштабы последствий катастрофических наводнений продолжали расти. Примером тому может служить катастрофический паводок, прошедший 8 августа 2002 года в результате быстротечного смерча, прошедшего в населенном пункте Широкая Балка, и выпадения обильных осадков в районе г. Новороссийск, Анапском и Крымском районах Краснодарского края. Этот паводок привел к частичному затоплению г. Новороссийска, Анапы, Крымска и затоплению 15 других населенных пунктов. В зону бедствий попало более 30 тыс. человек, в зоне затопления оказались более 7000 жилых домов и административных зданий, из них разрушено 128 и повреждено около 3100 зданий. Погибло 62 человека.

В этом же месяце катастрофические наводнения, вызванные сильными и продолжительными дождями, произошли в ряде стран Западной Европы (в Германии, Чехии, Австрии, Испании, Англии, Италии), а также в Китае.

Только в Китае за период с июня по август 2002 года, согласно данным МВД Китая, в результате наводнений и селей, вызванных ливнями, погибло около 1000 человек (из них более 200 проживали в провинции Хунань), разрушено почти 27 тыс. домов, пострадало более 4 тыс. кв. км. посевов, 8,4 млн. человек остались без крова.

По данным Всемирной метеорологической организации, в 2002 году от наводнений на Земле пострадало свыше 17 млн. человек, погибло около 3 тысяч человек. Материальный ущерб от наводнений составил более 30 млрд. долларов. Суммарная площадь затопления составила около 8 млн. км².

ОСОБЕННОСТИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПАВОДКОВ

Калустян Э.С., доктор тех. наук, Горбушина В.К., кандидат тех. наук (ЦСГНЭО — филиал АО «Институт Гидропроект»)

Пресная вода рек является важнейшим природным ресурсом для обеспечения жизнедеятельности человеческого общества: объем её возможного ежегодного использования в мире ограничен и оценивается в 37,3 тыс. км³, в том числе в России — 4,2 тыс. км³. Речной сток на Земле характеризуется неравномерным распределением, большая его часть проходит в период паводков. Главным способом регулирования речного стока в течение 5000 лет является плотиностроение, в последние 100 лет этот способ используется и для выработки электроэнергии. В XX веке глобальной индустриализации общее число плотин достигло 800 тысяч, при этом число только высоких плотин увеличилось с 1,2 тысячи в начале прошлого столетия до 45 тысяч в настоящее время.

Водохранилищные плотины обладают удивительной живучестью и надёжностью. За время с момента строительства первой плотины инженеры научились возводить надёжные сооружения, в том числе на сильно проницаемых, закарстованных основаниях, в районах вечной мерзлоты, участках древних оползней, тектонических нарушений и сильных землетрясений. Вместе с тем, несмотря на высокую надёжность и обеспечение безопасности населения в долинах рек в период паводков, гидротехнические сооружения, как и другие техногенные и природные объекты, претерпевают аварии.

Разрушение естественных и искусственных преград на реках, как правило, сопровождается значительными негативными социальными, материальными и другими последствиями. Учитывая отмеченный рост числа плотин, одной из задач устойчивого развития общества является смягчение негативных социальных последствий и предупреждение опасностей, связанных с авариями плотин.

Решению этой проблемы может способствовать, в частности, изучение причин и способов предотвращения технических, социальных и иных рисков, сбор и анализ информации по авариям в специальных банках данных.

Природные паводки являются грозным стихийным бедствием. За последние 100 лет в результате чрезвычайных паводков во всём мире погибло 9 млн. человек. Так, в результате редкого по повторяемости паводка в январе 1997 г., в центральной долине Калифорнии разрушенными оказались дамбы, считавшиеся до этого весьма надёжными. Было затоплено 300 кв. миль территории, число погибших составило 9 человек, убытки при этом достигли 1,6 млрд. долл. Оценка и регулирование рисков актуальна и в водохозяйственных отраслях России, поскольку убытки от паводков ежегодно составляют 1-3 млрд. рублей, а затоплению могут подвергаться до 40 тыс. км² территории. Так, в результате паводка 2002 г. в Краснодарском крае погибло 118 человек, а убытки превысили 2 млрд. руб. В результате сильнейшего за последние 100 лет наводнения в 2002 г. ряд стран Европы понесли убытки 4 млрд. евро. Разумное регулирование внутригодового стока рек путём аккумуляции его части в водохранилищах и устройство защитных дамб остаются одними из главных способов снижения катастрофических последствий природных паводков.

Техногенные паводки вызваны разрушениями или крупными повреждениями плотин. Количество человеческих жертв и материальные убытки от разрушения современной плотины сопоставимы с ущербом от крупного стихийного бедствия. По примерным подсчётам, за последние 100 лет в результате крупных катастроф на плотинах во всем мире погибло не менее 14 тыс. человек.

Практическое значение представляют наиболее характерные сценарии аварий, для оценки вероятности которых в последнее время распространение получил способ дерева отказов.

Ниже рассматривается распределение отказов в соответствии с кривой старения бетонных плотин по различным периодам в XX веке и соответствующие сценарии рисков.

Отказы в период начального наполнения водохранилища. В начальный период времени эксплуатации сооружения, которое продолжается в течение первого полного наполнения водохранилища, отмечено значительное количество отказов плотин, составляющее согласно статистике 70% общего числа. Наиболее характерными причинами аварий в период начального наполнения водохранилища являются: чрезмерная проницаемость, деформационная неоднородность и другие особенности конструкции плотин. Для

современных бетонных плотин на скальном основании одной из наиболее характерных моделей сценария «первоначальное наполнение водохранилища — реакция плотины» при отказах являются фильтрация и противодействие в основании (и теле плотины), связанные с превышением прочности скального массива и бетона плотины на растяжение. Как правило, подобное трещинообразование отмечается при напорах на плотину более 100 м.

Для арочной плотины Мальпасе высотой 66,5 м с водохранилищем объемом 51 млн. м³ трещинообразование со стороны напорной грани явилось одной из первоначальных причин, вызвавших сдвиг правобережного примыкания по нарушению в его основании. В процессе наполнения водохранилища один раз в год производились измерения деформаций. Полученные величины измерялись миллиметрами и опасений не вызвали. Поэтому наблюдения были прекращены ещё до завершения заполнения водохранилища. 2 декабря 1959 г. плотина разрушилась, при этом в пос. Фрежюс в 7 км в нижнем бьефе плотины погибли 421 человек. Убытки в результате катастрофы в два раза превысили стоимость затрат по строительству гидроузла.

Уроком аварии Мальпасе при последующем строительстве плотин стало признание необходимости учёта в расчётах свойств основания по результатам полевых испытаний, в частности сдвиговых показателей по трещинам, а также прочности скального массива на растяжение. Была подтверждена важность проведения натурных наблюдений в течение всего периода эксплуатации сооружения, особенно при первоначальном заполнении водохранилища.

Другим сценарием аварий в условиях заполнения водохранилища является проявление деформационной неоднородности основания. Для современных высоких бетонных плотин одним из повреждений является трещинообразование в основании со стороны напорной грани плотины, вызванное, как и в случае плотины Мальпасе, превышением прочности на растяжение скального массива. Важность учёта этого фактора подтверждает тот факт, что предотвращение негативных последствий трещинообразования со стороны верховой грани арочной плотины Кёльнбрайн высотой 200 м в Австрии потребовало 15 лет ремонтных работ и дополнительные затраты в 190 млн. долл. В России на арочно-гравитационной плотине Саяно-Шушенской ГЭС последствия подобного трещинообразования были выявлены и ликвидировались в течение 1985 — 1996 гг.

Недостаточная прочность на сдвиг в основании и примыканиях в период первоначального наполнения наблюдалась на

24 плотинах, 2 из которых — Байлес в США и Херигуэра в Испании — разрушились в период до 1950 г.

Оползень объемом 300 млн. м³ при объёме водохранилища 168 млн. м³ арочной плотины Вайонт высотой 261,5 м в Италии в сентябре 1963 г. вызвал повреждение плотины. Тем не менее, волна паводка объемом 25 млн.м³ воды, переклестнувшая через гребень плотины, послужила причиной гибели 1996 человек в селении Лонгароне, расположенном в 3 км в нижнем бьефе. Уроком катастрофы на водохранилище Вайонт явилось требование изучения свойств берегов водохранилища в пределах всей его зоны. Особое внимание было обращено на важность регулирования скорости наполнения и сброски водохранилища, а также проведение регулярных наблюдений в период первоначального наполнения.

Катастрофические разрушения плотин Мальпассе, Вайонт и ряда других (Вега де Тера в Испании, Рутта в Италии) в период 60-х годов наложили жесткие требования к качеству строительства плотин в последующие годы, особенно в вопросах обеспечения их безопасности.

Катастрофические разрушения плотин в XX веке использовались инженерами для принятия в поверочных расчётах всё более редких по повторяемости значений внешних воздействий. При этом наблюдается тенденция принятия более строгих требований к значениям параметров сопротивляемости сооружения на данные воздействия.

Отказы в период обычной эксплуатация. Отказы в период 5 – 10 лет после первого наполнения водохранилища проявляются преимущественно при несистематических чрезвычайных воздействиях или старении.

Примером проявления старения на этой стадии при несвоевременном проведении ремонтных работ можно отнести разрушение в России в 1994 г. Тирлянской грунтовой плотины высотой 9,85 м, длиной по гребню 400 м, с водохранилищем объемом 4,96 млн. м³, входившей в состав сооружений металлургического комбината. Размыв тела грунтовой плотины и повреждение водосбросных сооружений произошли вследствие невозможности пропуска воды через водосбросы из-за заклинивания затворов. Пропускная способность полностью открытых водосбросных отверстий при НПУ составляла 290 м³/с при расчётном расходе 1% обеспеченности 300 м³/с, т.е. не соответствовала нормам для данного класса плотины.

В результате размыва тела плотины переливающимся потоком образовался проран шириной 20 – 25 м по всей ее высоте. Техногенным паводком были затоплены пос. Тирлян и ряд на-

селенных пунктов в нижнем бьефе, число погибших составило 22 человека, убытки превысили 40 млрд. руб. в ценах августа 1994 г.

Период поздних отказов. Считается, что период, связанный с изменением свойств материалов, наступает после 25 – 40 лет эксплуатации сооружения. К этой группе отнесены случаи заилиения водохранилищ в результате отложения наносов. Заилиение наносит значительный материальный ущерб, поскольку ежегодно во всём мире теряется около 70 км³ зарегулированных водохранилищами объемов речного стока.

Наряду с техническим риском, возникающим в процессе заполнения водохранилищ, отказы фиксируются и от действия других факторов.

Гидрологический риск. Наиболее характерным сценарием отказов при действии паводков повторяемостью ниже значения, принятого в проекте, являются размывы основания в нижнем бьефе. Большая часть аварий плотин в этой группе связана с размывами основания непредвиденными паводками, а также недостаточной прочностью на сдвиг (плотины Аустин в США, Бузи во Франции и Тигра в Индии). Ежегодный риск разрушения плотины для сценариев этого воздействия за период с 1900 по 1985 гг. равен $0,15 \cdot 10^{-4}$.

Авария грунтовой плотины Киселёвского водохранилища Серовского завода ферросплавов высотой 18 м и длиной по гребню 1920 м с водохранилищем объемом 32 млн. м³ в России была вызвана паводком повторяемостью, большей, чем принятая максимальная расчётная (1 раз в 1000 лет). Разрушение плотины в результате размыва тела плотины переливающимся через её гребень потоком из-за недостаточной водопропускной способности водосбросов, рассчитанных на пропуск расхода 560 м³/с, произошло 14 июля 1993 г. По фактическим замерам 14 июля 1993 г. приток в водохранилище достиг 1000 м³/с и продолжал увеличиваться. Размыв плотины был зафиксирован на длине 70 м на всю высоту плотины. Нерегулируемое опорожнение водохранилища вызвало гибель 15 человек, убытки — 40 млрд. руб. в ценах на июль 1993 г.

Задача достоверного определения величины максимального паводкового расхода не теряет актуальность и в настоящее время, о чём свидетельствует катастрофа на плотине Мачуу II в Индии в 1979 г., где принятый на основании 90-летнего ряда наблюдений расход паводка в 5663 м³/с оказался превзойденным в 4,7 раза и составил 26645 м³/с.

Геодинамический риск. Природно-техногенные паводки часто вызываются оползнями, возникающими в результате землетрясений,

извержений вулканов, при подрезке склонов и устройстве выемок. Так, во время катастрофического 10-балльного землетрясения с $M 7,7$, в результате которого в Перу в 1976 г. погибло около 40 тыс. человек, от пика горы Уаскоран на высоте более 5,5 км сорвался скальный массив объемом в несколько миллионов кубических метров. Скальная лавина, двигаясь с громадной скоростью по направлению к р. Санте, уничтожала всё на своём пути. По мере приближения к реке образовался грязекаменный поток, вначале перекрывший р. Санту, а затем прошедший по осушенному руслу со скоростью 36 км/час. При этом селевой поток заполнил туннели подземной ГЭС и вывел бетонную плотину Каньон дель Пато из эксплуатации на один год.

В 1985 г. в результате извержения вулкана Аренас в Колумбии, расположенного на высоте 5400 м и бездействовавшего до этого пять веков, произошло таяние ледников и образование селевых потоков. Раскаленная лава и селевые потоки распространились на расстояние 150 км в долины, окружающие вулкан. В результате катастрофы погибло 21596 человек.

В июле 1991 г. в Румынии в результате аварий были выведены из эксплуатации три небольшие ГЭС и разрушена построенная в 1962 г. грунтовая плотина Белчи высотой 16 м. В результате землетрясений 12 и 18 июля и ливней, вызвавших оползень объемом 100 тыс. m^3 , была выведена из эксплуатации ГЭС Клабучет, а более крупный оползень 19 июля вызвал аварию ГЭС Ларешти мощностью 19 МВт.

В ночь с 28 на 29 июля 1991 г. в течение 1,5 ч в области Тецлай выпало 120 – 150 мм осадков. Приток в водохранилище плотины Белчи объемом 12 млн. m^3 , обычно составлявший 3 – 4 m^3/c , увеличился до 1200 – 1400 m^3/c , объём дождевого паводка составил 40 млн. m^3 . В результате перелива через плотину в левобережном примыкании образовался проран шириной 80 м. Регулирующая способность водохранилища была значительно уменьшена в результате заиления: в 1975 г. её объём уменьшился на 8 млн. m^3 , а на момент аварии составил около 3 млн. m^3 . В результате катастрофы, считающейся крупнейшей за всю историю плотиностроения Румынии, погибли 71 человек и нанесён значительный материальный ущерб.

В другом случае оползень объёмом 50 млн. m^3 на участке слияния рек Пауте и Джодан в Эквадоре в 1993 г. образовал дамбу длиной 1 км и два водоёма на этих реках, уровень в которых за три дня поднялся на 19 м. Были повреждены водоприёмные туннели и возникла реальная угроза разрушения ГЭС Пауте мощностью 1075 МВт, затоплены ряд населенных пунктов и дорог. В результате катастрофы погибло 150 человек.

Во время землетрясения 20 сентября 1999 г. на Тайване с магнитудой 7,4 по шкале Рихтера, в результате которого погибло 2400 человек, деформации по трещине, оперяющей главный разлом, составили 200 – 800 см, что вызвало разрушение бетонной плотины Ши-Канг. Техногенный паводок был существенным, поскольку водохранилище до этого было сработано наполовину.

Модели и сценарии реализации риска для конкретной плотины определяются характерными условиями для данного гидроузла, действующими нагрузками на сооружение, строением и свойствами основания.

Управление безопасностью. Для плотин, как и других рукотворных сооружений, 100 % аварий связаны с ошибками специалистов, при этом до 20 % их вызваны экстремальными воздействиями на сооружение, остальные 80 % случаев аварий произошли в условиях обычной эксплуатации. Случаи разрушений или крупных повреждений плотин с многочисленными жертвами среди гражданского населения всегда придавали мощный импульс для принятия дополнительных мер по повышению безопасности возводимых сооружений. Как правило, после очередных катастроф принимались организационные и технические меры по повышению надёжности возводимых сооружений: более консервативные критерии проектирования, государственное регулирование безопасности и ряд других.

В результате этих мер на протяжении XX столетия реализованный риск аварий всех типов плотин, достигший в 20 – 30-е годы 14 – 16%, к 1971–80 гг. снизился в 2,5 – 3,0 раза. Для бетонных плотин аналогичные риски в 1981–90 гг. уменьшились примерно в 5 раз. Риск разрушения плотин всех типов, достигший в 20 – 30-е годы 4%, в 1971 – 1980 гг. снизился примерно до 0,7%. Риск разрушения бетонных плотин снижен при этом почти в 30 раз — с 3% в 1911–20 гг. до 0,1 % в 1981–90 гг. Ежегодное значение реализованного риска, например, для бетонных плотин на скальном основании за весь рассматриваемый период составляет $0,34 \cdot 10^{-4}$ по разрушению и $0,45 \cdot 10^{-3}$ по повреждению. Для плотин, возведенных в период после 1950–60 гг., риск их разрушения и повреждения существенно ниже.

Уменьшение технического риска в течение текущего столетия не отразилось на размере социального риска, который оценивается 10^{-7} и не имеет тенденции к снижению. Такое значение риска считается критерием допустимого уровня социального риска, когда проявляется озабоченность безопасностью в рассматриваемой отрасли и требуется её снижение. Социальный риск или опас-

ность для населения, как правило, возникают в результате реализации технического риска. Обеспечение безопасности плотин требует выведения из пользования опасных зон при прохождении техногенного паводка.

В течение XX века выделяются два периода, когда использовались различные способы повышения надёжности и безопасности плотин.

В первый период до 30-х годов аварии были вызваны преимущественно недоучётом геологических условий оснований плотин и паводками. В этот период — в 1928 г. — была создана и успешно действует до настоящего времени Международная комиссия по большим плотинам (СИГБ). Большинство разрушившихся бетонных плотин в зарубежной практике относится к этому периоду. В России в этот период был отмечен ряд аварий плотин малых гидроэлектростанций.

Социальные потрясения в обществе в этот период отразились на судьбе плотин. С древнейших времён в военной гидротехнике совершенствовались и использовались методы «наиболее эффективного» разрушения гидротехнических сооружений с целью нанесения максимального урона неприятелю. Наиболее крупными разрушениями плотин во второй мировой войне явились аварии на плотинах Моне и Эдер в Германии с общим числом жертв 1600 человек и Днепровской в СССР.

Второй период наблюдается с 60-х годов, когда опасение энергетического кризиса вызвало рост числа возводимых плотин в мире. Крупнейшие катастрофы плотин Вайонт, Мальпасе, Вега де Тера и др. в этот период вызвали ужесточение государственного контроля за состоянием сооружений в период наполнения и эксплуатации водохранилищ.

В этот период у нас в стране были отмечены аварии на отдельных гидроузлах. На шлюзе Воткинского гидроузла 10 мая 1962 г. в период производства шлюзований левой камерой при незавершённых строительных работах по засыпке межшлюзового пространства произошло разрушение секций I — IV стен камеры шлюза. Опрокидывание стен в сторону свободного пространства между шлюзами произошло в период, когда там работала смена строителей.

31 мая 1964 г. была отмечена более крупная авария, связанная с прорывом дамбы обвалования хвостохранилища в Бабьем Яру, эксплуатируемой небольшим кирпичным заводом в г. Киве на Украине.

В 1971 г. для усиления контроля за состоянием сооружений в Минэнерго СССР была создана и действует по настоящее время отраслевая система надзора за безопасностью напорных гидротехнических сооружений.

С крупнейшими катастрофами плотин связано введение государственного контроля за их безопасностью в ряде стран с развитым плотиностроением: в 1895 г. — во Франции после аварии плотины Бузи, в 1928 г. — в штате Калифорния (США) после аварии плотины Сен Френсис, в 1935 г. — в Англии после аварии плотины Эйджи и ГЭС Долларог. В России Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» № 117-ФЗ принят в 1997 г. после аварий Киселёвской (1993 г.) и Тирлянской (1994 г.) плотин. Необходимость введения специального Закона была вызвана разгосударствлением в промышленности в 90-е годы. Закон предусматривает обязательное декларирование безопасности напорных гидротехнических сооружений с оценкой риска отказов и лицензирование заявленных собственниками видов деятельности.

Мероприятия по обеспечению безопасности плотин, содержащиеся в проекте каждого крупного гидроузла, основываются на расчётах времени прохождения волны техногенного паводка и размеров опасных зон прорыва и затопления. Время прохождения техногенного паводка определяется условиями нерегулируемой сработки водохранилища, индивидуальными для каждого водохранилища. К примеру, с момента прорыва плотины Киселёвского водохранилища на Урале в 1993 г. до возвращения потока в первоначальное (до паводка) русло потребовалось 8 ч.

Для своевременного оповещения важно точно установить момент начала разрушения сооружения: для бетонных плотин оно принимается мгновенным, для грунтовых — образование прорана растянуто по времени. Для прогнозирования момента разрушения инженеры пытались использовать данные инструментальных натуральных наблюдений. Однако в силу чрезвычайной сложности механизма крупных катастроф плотин эти попытки оказывались безуспешными. На плотине Вайонт, например, предвестник оползня 1963 г. — оползень 1961 г. — не убедил в необходимости принятия решения об эвакуации 8 сентября 1963 г. Последствия катастрофы известны: в 3 км в нижнем бьефе в поселке Лангароне число погибших составило 1996 человек. На плотине Титон в 1976 г., напротив, благодаря наличию большего времени, использованного для оповещения, число человеческих жертв было минимальным, однако материальные убытки превысили

1 млрд. долл. Во время аварии плотины Цойцир специалисты усомнились в правильности показаний прямого отвеса, зафиксировавшего в 1978 г. внезапное смещение до 80 мм, и только образование трещин на низовой грани со стороны левобережного примыкания вызвало срочную сработку водохранилища.

Степень разрушений и число жертв в нижнем бьефе определяются глубиной воды и скоростью потока, заселенностью паводка бьефа, а обеспечение безопасности в зоне техногенного паводка достигается своевременным выводом населения и материальных ценностей из опасной зоны. По степени опасности Бюро Мелиорации США выделяет несколько зон, в которых важную роль для планирования действий играет время оповещения ($T_{оп}$): при $T_{оп} \leq 15$ мин с момента прорыва до момента достижения участка волной число жертв в зоне может достичь 50%. В случаях, когда $15 \text{ мин} \leq T_{оп} \leq 90$ мин, число жертв в опасной зоне достигает 63 человек на каждые 10 тыс. человек. В зоне с $T_{оп} \geq 1,5$ часа число жертв составляет 2% от числа находящихся в ней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мирцхулава Ц.Е. Надёжность и безопасность гидротехнических сооружений. Симпозиум МАГИ. С.-Петербург. 2002
2. Калустян Э.С. Риски в гидротехнике. //Известия АН. Серия Энергетика. №2. 2001
3. Kreuzer H. The use of risk analysis to support dam safety decisions and management. ICOLD. Transactions of 20-th Congress on Large Dams. Vol.1. GR.Q. 76, China, 2000

ТИПИЗАЦИЯ НАВОДНЕНИЙ В НИЗОВЬЕ РЕКИ КУБАНИ¹

*Магрицкий Д.В., кандидат геогр. наук
(МГУ им. М.В. Ломоносова)*

Под наводнением понимается затопление территорий водой, вышедшей из берегов, по масштабам и интенсивности относимое к стихийным бедствиям. Речные наводнения — очень распространенное стихийное явление для многих рек, не исключение и главная водная артерия Краснодарского края — река Кубань. Начиная с XVIII в., когда информация о наводнениях стала конкретной, на Кубани было отмечено около 200 случаев катастрофических наводнений [9]. В низовье Кубани из-за низких абсолютных отметок и малых уклонов поверхности, а также разнообразия причин, вызы-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 00-05-64179, 01-05-64493, 02-05-64034)

вающих здесь катастрофические подъемы уровней воды, данная территория не раз затоплялась либо речными, либо морскими водами.

Наводнения в низовье Кубани по генезису могут быть разделены на стоковые, заторные и нагонные. Причем чаще всего заторные наводнения формируются при прохождении паводка по реке и одновременно наблюдающихся в речных руслах, либо на предустьевом взморье заторах льда. По приблизительным оценкам, наибольшую повторяемость в дельте Кубани за последние 100 лет имеют заторные (в т.ч. смешанного типа) наводнения (до 50 % случаев). На стоковые наводнения приходится около 40% случаев, а на нагонные — 10%. Кроме них затопление дельтовых земель может происходить вследствие выпадения осадков и отсутствия условий для их быстрого впитывания, либо сброса в гидрографическую сеть, как это было в 1972, 1973 и 1998 гг. (табл. 1).

Стоковые наводнения. Уровненный режим низовьев Кубани (и соответственно опасные подъемы уровней воды в реке) находится в тесной зависимости от речного стока. Лишь при образовании заторов или зажоров, а также вследствие сгонно-нагонных явлений (в низовьях дельтовых рукавов) эта взаимосвязь нарушается. В свою очередь, годовой ход расходов воды Q в нижнем течении р. Кубани отражает климатические, орографические и гидрогеологические особенности почти всего ее бассейна. Поэтому большие расходы воды Q_{\max} могут наблюдаться в низовье р. Кубани в любое время года, но особенно часто с мая по август (табл. 2). К устьям рукавов Протока и Кубань повторяемость Q_{\max} в теплый сезон снижается. Это связано с поступлением в рукав Кубани вод левобережных притоков с осенне-зимним паводочным режимом, с интенсивным забором в теплый период воды на оросительные и обводнительные нужды, с разливом по пойме и плавням паводковых вод, с рассредоточением стока в узлах разветвления и др.

При превышении Q_{\max} пропускной способности речного русла начинается затопление поймы и размещенных на ней хозяйственных и социальных объектов. Продолжительность и масштаб затоплений зависят от параметров половодий и паводков, условий рельефа и особенностей речных русел и долин.

Со временем пропускная способность р. Кубани и ее дельтовых рукавов, отметки выхода воды на пойму менялись. В особенности этому способствовало обвалование русел рек и дноуглубительные работы. К началу XX в. отдельные участки дельтовых рукавов уже были обвалованы, а устья большинства ериков перерыты и перекрыты. Новый этап обвалования пришелся на 1920 — 1924 гг. [10],

Сведения о наводнениях в дельте р.Кубани

Дата	Характер явления	Перечень участков дельты, затронутых наводнением. Характер последствий
1–2 октября 1739 г.	Шторм, морской нагон	Во время осады русскими войсками османской крепости Ачуево морским штормом и сопутствовавшим ему нагоном был разбит паром, разбросана флотилия, залита артиллерия и боеприпасы [8].
31 января 1801 г.	Морской нагон	«От норд-веста потопило все берега, лежащие по обе стороны Сладкого лимана и Сладкого ерика, по-над морем от Кучугур до Ачуево, даже достигло устья Черного ерика. Затопило водой на 1,5 аршина (1,05 м), разорило рыболовные заводы» [2].
1840 г.	Морской нагон	Были занесены Сладковское, Рубцовское и другие крупные гирла [8].
17 февраля 1892 г.	Морской нагон	«... на Ачуевской косе вследствие порывистого юго-западного ветра было сильное наводнение, коим уничтожен 31 рыболовный завод, потонуло 30 человек, 400 голов рогатого скота, 56 лошадей. Коса была залита водой на 3 аршина (2,1 м).» Наводнением была охвачена территория от Темрюка до Ачуево [2].
28 февраля 1914 г.	Шторм, морской нагон	Поселения, расположенные на побережье между устьями Кубани и Дона, были затоплены трехметровым слоем воды. На берег было выброшено 600 рыбацких баркасов. В Темрюке, где вода поднялась на 1,7 м выше ординара, смыло оградительную дамбу и затопило часть города; на Ачуевской косе прибой уничтожил жилые строения и консервные предприятия. Пострадало более 3000 человек [2,8].
Февраль 1928 г.	Заторы льда	Выше Тиховского во многих местах был прорван правобережный вал, вода затопила 65 000 га пойменных земель [11].
Март 1932 г.	Паводок, заторы льда в устье и рукавах	Грандиозный паводок. На р. Кубани (между Краснодаром и Тиховским), на рук.Протока (до Гривенской) и, возможно, на отдельных участках рукава Кубань из-за многочисленных заторов, вызвавших чрезмерное повышение уровней воды в реке, и в результате прорыва водооградительных валов отмечались очень большие разливы и затопление пойменных земель [11].

Продолжение таблицы 1

Дата	Характер явления	Перечень участков дельты (затронутых наводнений), характер последствий
Февраль 1937 г.	Паводок, заторы льда	Затоплена пойма в районе Переволоцкого узла разветвления, на отдельных участках – прораны и размывы в защитных валах [3].
Август 1953 г.	Ливневые осадки	В Темрюке выпало 277 мм осадков, т.е. 710 % по отношению к норме этого месяца (архивы КУС).
23–24 мая 1955 г.	Морской нагон	Уровень в районе Темрюцкого порта поднялся на 150 см. В результате речная вода (вследствие подпора со стороны моря) затопила правобережную пойму [11].
18–20 февраля 1963 г.	Паводок при подпоре во время ледохода	На нескольких участках размывы береговые валы: в 11–13 км ниже Троицкой (ширина проранов в пределах 50–200 м), возможно, в районе Тиховского; в 18 км выше Демина ерика в 6 местах размыв правый берег, вода вышла на пойму; в 300 м ниже поста Гривенская размыв левый береговой вал, длина размыва – 50м [3].
16–21 июня 1966 г.	Паводок	В районе Тиховского, Славянска и Гривенской отмечалась интенсивная фильтрация воды сквозь валы; в 25 км выше Варениковской - размыв правобережного вала [3].
28-29 октября 1969 г.	Морской нагон	Наводнение охватило участок юго-восточного и восточного побережья полосой протяженностью 150 км и шириной 8-10 км (по Кубани и Протоке волна нагона распространилась на 80 км). Максимальный подъем уровня (против предштормового) составил 4 м (пос.Перекопка). Пострадали дома в прибрежных поселках, имущество Темрюцкого рыбзавода; мелкие суда и баржи унесло в море. Погибли люди (архивы КУС).
Июль 1972 г.	Паводок	Произошел прорыв дамбы на рукаве Казачий ерик и затопление близлежащих сельскохозяйственных угодий (архивы КУС).
Сентябрь, октябрь 1972 г.	Ливневые осадки	В районе ст. Запорожской и пос. Стрелка было подтоплено несколько домов и размывта железнодорожная насыпь. У Запорожской это привело к сходу с рельсов тепловоза с пассажирскими вагонами (архивы КУС).

Дата	Характер явления	Перечень участков дельты, затронутых наводнением. Характер последствий
14–15 мая 1973 г.	Ливневые осадки	В районе ст. Запорожской была размыта железнодорожная насыпь (архивы КУС).
12 февраля 1985 г.	Заторы льда, паводок	Из-за затора в устье Петрушина рукава были затоплены построенные на пойме жилые дома, огороды и хозяйственные строения (архивы КУС).
Март 1998 г.	Ливневые осадки, паводок на реке	В крае было подтоплено около 500 тыс. га земли, 132 населенных пункта, более 22500 жилых домов, пострадало 113 экономических объектов. В г. Темрюке и ст. Голубицкой произошла резкая активизация оползней (архивы КУС).
Декабрь 2001 г. - январь 2002 г.	Сбросы водохранилищ, заторы льда в рукавах и устьях	Пострадали Темрюкский, Славянский, Крымский, Красноармейский и Калининский районы (в целом 74 тыс. га земель). Затоплены частично или полностью х. Урма, х. Ханьков, район Зайцева Колена и Орехова Кута, территория от дороги г. Темрюк-пос. Стрелка до Ахтанизовского лимана (Казачий ерик), г. Темрюк, пос. Переволока, рыбопитомник в ст. Гривенской.
8–9 июля 2002 г.	Паводок	В результате прорыва дамбы на рукаве Протока в районе пос. Забойский (Славянского района) было затоплено 1,5 км ² рисовых угодий и насосная станция, подающая воду в рисовые чеки. Сам поселок почти не пострадал.

Примечание. Приводятся сведения только о тех наводнениях, о которых имеется достаточно полная и достоверная информация в литературных источниках и архивах Кубанской устьевой станции (КУС)

Таблица 2

Повторяемость наибольших годовых уровней и расходов воды в дельте р. Кубани по сезонам года (% от числа лет наблюдений)

Пост, расстояние от устья, км	Период, годы	Март-апрель	Май-август	Сентябрь-октябрь	Ноябрь-февраль
Тиховский, 116	1912, 1927, 1930-1941, 1945-2000	<u>19 (19)</u> 11 (14)	<u>52 (50)</u> 64 (61)	<u>3 (2)</u> 4 (0)	<u>26 (29)</u> 21 (25)
Варениковская, 45	1936-1940, 1947-1948, 1968-1989	<u>25 (31)</u> 12 (12)	<u>17 (38)</u> 41 (35)	<u>8 (3)</u> 0	<u>50 (28)</u> 47 (53)
Зайцево Колено, 22 – Переволоцкий узел, 16	1925, 1934-1939, 1946-2000	<u>32 (24)</u> 14 (10)	<u>41 (41)</u> 47 (45)	<u>3 (0)</u> 0 (4)	<u>24 (35)</u> 39 (41)
Темрюк, 7,2	1930-2000	<u>-(24)</u> 11 (11)	<u>-(37)</u> 39 (36)	<u>-(2)</u> 4 (0)	<u>-(37)</u> 46 (53)
Славянск-на-Кубани, 115	1930, 1931, 1933-1940, 1945-2000	<u>16 (18)</u> 15 (15)	<u>61 (53)</u> 59 (52)	<u>5 (5)</u> 4 (0)	<u>18 (24)</u> 22 (33)
Гривенская, 52	1930-1940, 1946-1997	<u>21 (19)</u> 16 (16)	<u>55 (50)</u> 44 (44)	<u>5 (5)</u> 0	<u>19 (26)</u> 40 (40)
Слободка, 12	1964-2000	<u>22 (33)</u> 7 (0)	<u>22 (34)</u> 48 (57)	<u>0</u> 14 (4)	<u>56 (33)</u> 31 (39)
Дубовый Рынок, 6,9	1964, 1966-1999	<u>12,5 (12,5)</u> 11 (11)	<u>50 (38)</u> 48 (41)	<u>12,5 (12,5)</u> 0	<u>25 (37)</u> 41 (48)

Примечания: 1) в числителе — по данным по 1972 г. (включительно), в знаменателе — с 1973 г.; 2) вне скобок — для расходов воды, в скобках — для уровней воды

а к концу 50-х годов необвалованными оставались лишь правый берег Протоки ниже ст. Гривенской и приустьевые участки дельтовых рукавов. Паводковые воды разливались по правобережным плавням Протоки при расходе воды в Гривенской в 220 м³/с, т.е. большую часть каждого года [11]. В результате около 18% годового стока рукава (за 1936 – 1941, 1946 – 1953 гг.) не доходило до моря. Впоследствии правый берег Протоки был также обвалован. Высота валов (по состоянию на 1980 г.) составляла от 1,5 до 2 м и более, а вдоль нижних участков рукавов — около 1 м и менее.

До обвалования пропускная способность русла р. Кубани ниже г. Краснодара не превышала 1000 м³/с, а после была увеличена до 1500 м³/с, т.е. как раз в расчете на максимально возможный пуск Краснодарского водохранилища. В рукавах Кубань и Протока, в каждый из которых поступает примерно половина стока воды

главной реки [6], максимальная пропускная способность для большинства участков (по материалам полевых изысканий Кубанской устьевой станции) составляла на 1980 г. $750 \text{ м}^3/\text{с}$ и более. Особенно безопасным в этом отношении был рукав Кубань, что явилось следствием более масштабных защитных мероприятий (в сравнении с Протокой) на самом водоносном в недавнем прошлом рукаве [6]. На Протоке, напротив, между х. Бараниковским и ст. Гривенской в отдельных местах перелив воды через защитные валы мог происходить уже при $700 \text{ м}^3/\text{с}$ и менее. В Казачьем ерике уровень в рукаве даже при очень больших расходах воды не достигал гребня прируслового вала.

Из-за периодического подмыва и разрушения прирусловых валов во время больших расходов воды в реке защитные дамбы не решали полностью проблему борьбы с паводками. Поэтому, начиная с сороковых годов, большое внимание уделялось комплексному решению задачи борьбы с паводками, главным образом с помощью строительства водохранилищ: Тшицкого на реках Белой и Кубани (в 1941 г., в 300 км от устья), Шапсугского на р. Афипс (1952 г., с полным и полезным объемом соответственно 160 и 150 млн. м^3), Шенд-жуйского на р. Чибий (1964 г., 29,6 и 21,6 млн. м^3), Крюковского на реках Бугундырь, Песчанка, Иль и Бугай (1972 г., 111 и 101 млн. м^3), Варнавинского на реках Абин, Адагум и др. (1972 г., 40 и 20 млн. м^3) и Краснодарского на р. Кубани (1973 г., 242 км, 3,05 и 2,16 млрд. м^3).

Строительство Краснодарского водохранилища, во-первых, привело к уменьшению Q_{max} с 1140 (1927, 1930 – 1972 гг.) до $800 \text{ м}^3/\text{с}$ (1973 – 1986 гг.). Этому способствовало также общее уменьшение годового стока воды р. Кубани вследствие увеличения объемов водопотребления в бассейне реки и естественной изменчивости самого стока воды: в 1929 – 1948 гг. среднегодовой расход воды $Q_{\text{ср}}$ в вершине дельты был равен $410 \text{ м}^3/\text{с}$, в 1949 – 1972 гг. — $366 \text{ м}^3/\text{с}$, в 1972 – 1986 гг. — $292 \text{ м}^3/\text{с}$. В дельте расходы воды были еще меньше из-за разбора воды оросительными и обводнительными каналами, рассредоточения стока воды между рукавами [6].

Во-вторых, аккумуляция в Краснодарском водохранилище части наносов Кубани (в 1949 – 1972 гг. сток наносов составлял 6,81 млн. т, а в 1972 – 1986 гг. — уже 10,90 млн. т) привела к усилению эрозионных процессов ниже Краснодара и, как следствие, понижению уровней воды в реке и на верхних участках Кубани и Протоки [7].

В результате стоковые наводнения в период с 1972 по 2001 гг. больше не наблюдались в низовье р. Кубани (табл. 1), а повторяемость и продолжительность затопления поймы между бровкой бере-

га и прирусловыми валами существенно снизились. Исключение составил Казачий ерик, у которого из-за повышения отметок дна повторяемость выхода воды на пойму в 1973 – 2000 гг. увеличилась примерно в два раза по сравнению с 1936 – 1972 гг.

В 90-х годах ситуация с предотвращением стоковых наводнений вновь начала ухудшаться. Это связано как с большим физическим износом оборудования и конструкций гидротехнических и ирригационных сооружений, снижением пропускной способности русел, так и с увеличением с 1987 г. стока воды р. Кубани. В 1987 – 2000 гг. $Q_{\text{ср}}$ составил 414 м³/с, а Q_{max} — 895 м³/с.

В отношении Краснодарского и других водохранилищ наибольшие опасения вызывают [1]:

- необеспеченность Краснодарским водохранилищем безопасного пропуска паводков редкой повторяемости по причине фактической осадки гребня плотины на 0,2–0,25 м больше проектной, опасного гидравлического режима на водосбросном сооружении, ограничения максимальных сбросных расходов из-за недостаточной пропускной способности обвалованного русла Кубани; необеспеченность безопасного пропуска паводков Шапсугским и Октябрьским водохранилищами;

- необеспеченность требуемой сейсмостойкости сооружений;
- снижение емкости Краснодарского водохранилища (полной — на 134 млн. м³, полезной — на 390 млн. м³) вследствие заиления и вынужденного понижения НПУ на 0,9 м; снижение емкости Шапсугского водохранилища на 15 млн. м³ и Шенджийского — на 10 млн. м³;

- физический износ и деформация части оборудования и отдельных конструкций; снижение фильтрационной способности грунтов и др.

Ремонт прирусловых валов и дноуглубительные работы проводились последний раз около 15 лет назад. В результате максимальная пропускная способность русла р. Кубани ниже Краснодара снизилась с 1500 до 1200 м³/с.

Сейчас в зоне риска наводнения находится 600 тыс. га сельскохозяйственных земель и населенные пункты с общей численностью населения 300 тыс. чел. [1]. Из-за закрытия ряда гидрологических постов стало сложнее своевременно проводить мониторинг и оповещать местное население об угрозе наводнений.

В то же время, как показали события лета 2002 г., противопаводковая система Нижней Кубани по-прежнему способна предотвращать стоковые наводнения. Несмотря на катастрофический характер паводка в июне-июле 2002 г. (приток в Краснодарское

водохранилище достигал $1940 \text{ м}^3/\text{с}$, а сбросы в нижний бьеф — $1300 \text{ м}^3/\text{с}$), только в одном случае произошел прорыв дамбы и незначительное затопление дельтовых угодий (табл. 1).

Заторные наводнения. В зимний период прохождение паводка может спровоцировать ледоход или сопутствует ледоходу, который, в свою очередь, нередко сопровождается образованием в различных частях дельты заторов льда. Уровень воды выше «головы» затора, даже при сравнительно небольшом Q , может не только превысить наибольший стоковый уровень H в году (о чем косвенно свидетельствуют данные табл. 2), но и уровень $H_{\text{кр}}$, при котором начинается затопление поймы. Напротив, подъемы уровня воды, вызванные зажорами, также типичными для дельты и наблюдаемыми в начале (реже в середине и конце) зимы, обычно не достигают критических для данного участка реки отметок.

Помимо интенсивных и высоких паводков во время зимы заторным явлениям в дельте р. Кубани также способствуют малая устойчивость ледового режима и наличие многочисленных препятствий ледоходу (в том числе по причине сохранения ледостава в дельте и на предустьевом взморье при начавшемся ледоходе на остальной Кубани, как это было в марте 1932 г. и декабре 1933 г.).

По [11] на Кубани насчитывается до 17 участков, благоприятных для заторообразования, а на Протоке — до 10. Это места крупных поворотов и сужения русла, узлы разветвления (в том числе и перед островами), перекаты (на Кубани их 16 до ст. Варениковской и 3 ниже, на Протоке их 23 до ст. Гривенской и 2 ниже [11]), приустьевые отмели (бары), искусственные объекты, в частности мосты (например, в ст. Троицкая и г. Славянск-на-Кубани).

Бороться с заторными наводнениями из-за сложного характера и многочисленности причин образования ледяных заторов не просто. Поэтому в настоящее время это единственный связанный с рекой тип наводнения, периодически угрожающий природному и социально-хозяйственному комплексу дельты.

Сооружение противопаводковых водохранилищ, регулирующих в частности паводковый сток и зимнего периода, в какой-то мере снизило повторяемость заторно-зажорных явлений в дельте (в 2 — 5 раз), в районе отдельных постов они перестали наблюдаться вовсе (Тиховский, Сербин, Троицкая, Варениковская, Демин ерик). Это произошло и через изменение термического режима вод Нижней Кубани (вследствие регулирующей деятельности Краснодарского водохранилища и региональных изменений климата) и, как следствие, изменение характеристик ледовых явлений. Так, начало

ледовых явлений на посту Тиховский сдвинулось на более поздний срок (с 16 февраля за 1912 – 1948 гг. на 31 февраля за 1973 – 1999 гг.), а их окончание — на более ранний (с 24.02 на 13.02); почти в 2 и 3 раза уменьшилась продолжительность периода с ледовыми явлениями и (соответственно) ледостава. Чаше стали отмечаться годы с отсутствием ледостава. В 1,5 раза уменьшилась толщина льда.

В самой дельте борьба с заторами и вызываемыми ими наводнениями проводится по нескольким направлениям. *Во-первых*, это сооружение и наращивание (уже существующих) прирусловых валов, дноуглубительные работы (в рукавах и на взморье) и расчистка русла. *Во-вторых*, это мероприятия по оперативному снижению уровня воды в реке и рукавах выше головы затора через уменьшение расходов воды: при помощи искусственных проранов; при отводе части стока воды в лиманы (по уже существующим каналам и по новым противопаводковым, которые предлагается создать, например, на месте старого судоходного Ахтарского канала, Черноморского и Куликовского ответвлений Кубани), при безопасном заборе воды неработающими зимой оросительными системами. Повысить эффективность этой группы мер можно было бы за счет открытия рукава Переволока и расчистки Казачьего ерика. *В-третьих*, это неоднократно уже применявшийся комплекс мер (пиротехнических и механического воздействия) по разрушению ледового покрытия в местах предполагаемой закупорки русла и уж, конечно, самих заторов. В 1985 и 2002 гг. по предложению начальника КУС А.А. Иванова применялся необычный, но, как оказалось, достаточно эффективный метод снижения прочности ледового покрытия в рукавах при помощи посыпки его угольной пылью, шлаком, сажой и солью.

Большую помощь в борьбе с заторами могли бы оказать организация в зимний период мониторинга гидрологической обстановки с воздуха и увеличение количества гидрологических постов.

Главное же при борьбе с наводнениями — это скоординированные действия всех имеющихся в водных объектах дельты служб, что порой часто отсутствовало зимой 2001–2002 гг.

Нагонные наводнения. Третий тип наводнений связан с морскими нагонами. Нагоны на морском крае дельты Кубани вызываются северными, западными и северо-западными ветрами. Повторяемость этих ветров невелика и нагоны здесь наблюдаются сравнительно редко: по данным поста Темрюк [4] — в среднем 5 раз в год (с большей частотой в мае-июле); подъемы уровня отличаются малой продолжительностью. Для весны повторяемость ветров северного, западного и северо-западного направлений составляет 12, 7 и 12%;

для летних месяцев — 19, 6 и 14%; для осеннего сезона — 12, 5 и 10%; для зимы — 5, 7 и 8% [4]. В то же время наибольшие нагонные изменения уровня воды на взморье Кубани формируются в осенне-зимний сезон [10], поскольку с октября по апрель скорости нагонных ветров заметно больше, чем в остальные месяцы. Это также подтверждается данными по количеству штормов различных направлений в различные месяцы года [4].

Максимальные нагоны в Темрюкском заливе наблюдаются в двух случаях. Во-первых, когда на восток Азовского моря выходят глубокие циклоны с Черного моря, и восточные и северо-восточные ветры сменяются северными, затем северо-западными и западными (левое вращение). Скопившаяся на юго-западе моря масса воды перегоняется нагонными ветрами вдоль южного берега на восток, вызывая подъемы уровня в Темрюке, затем в Ачуево и, наконец, в Приморске-Ахтарске. Во-вторых, когда циклоны приходят с запада или северо-запада и южные ветры сменяются юго-западными, западными и северо-западными (правое вращение). В таких случаях основная масса воды, скопившаяся на севере Азовского моря, при смене ветра направляется прямо на юг.

Берега дельты от устья Кубани до устья Протоки (и далее до Приморска-Ахтарска) низменны. Отметки наиболее повышенных участков берега не превышают, за редким исключением, 1 м над средним уровнем моря. Поэтому ветровые подъемы уровня воды выше 1 м могут вызывать наводнения. А они повторяются почти каждый год [5]. С повторяемостью один раз в году значения экстремальных уровней моря у порта Темрюк и пункта Ачуево составляют 128 и 108 см (над средним уровнем моря), один раз в 5 лет — 174 и 160 см, в 25 лет — 242 и 220 см, в 50 лет — 284 и 248 см, а в 100 лет — 312 и 272 см.

Именно самой редкой повторяемости был катастрофический нагон в устье Кубани в конце октября 1969 г. Его интенсивное развитие определялось не только большой скоростью ветра (35—40 м/с), но и быстрой сменой его направления во времени — с юго-западного на западное и северо-западное. Последнее обстоятельство способствовало концентрации больших масс воды (в том числе пригнанных через Керченский пролив из Черного моря) преимущественно в юго-восточной части водоема и необычно высокому подъему уровня. Самый высокий подъем уровня наблюдался у пос. Перекопка — 8,5 м абс. (350 см над «единым нулем моря»); к северу он был ниже: в Приморске-Ахтарске

— 650 см. Наводнение сопровождалось сильным ветром и волнением. Высота волны у пос. Пересыпь достигала 50 см, а у пос. Перекопка — 200 см. Продолжительность нагона составила в Темрюке 15 ч, в Приморске-Ахтарске 18 ч.

Наводнение охватило участок побережья протяженностью 150 км и глубиной 8 – 10 км (восточнее Темрюка даже до 17 км). По Кубани и Протоке волна нагона распространилась приблизительно на 80 км.

После событий 1969 г. были разработаны ряд методик, позволяющих заранее прогнозировать катастрофические нагоны на юго-восточном и восточном побережье Азовского моря. За этим следит Гидрометцентр РФ и его подразделения в Южном Федеральном округе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вода России. Речные бассейны /Под. ред. А.М.Черняева. Екатеринбург: Издательство «АКВА-ПРЕСС». 2000.
2. Галкин Г.А. Катастрофические нагонные наводнения в Восточном Приазовье в XVIII—XX вв. //Материалы научно-практической конференции «Актуальные вопросы экологии и охраны природы Азовского моря и Восточного Приазовья». 1990. Часть 1.
3. Гидрологический ежегодник. Том 3. Вып. 0,1.
4. Гидрометеорологический справочник Азовского моря. Л.: Гидрометеоздат. 1962.
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том V. Азовское море. СПб.: Гидрометеоздат. 1991.
6. Михайлов В.Н., Магрицкий Д.В., Иванов А.А., Долженко Н.П. Современные гидролого-морфологические процессы в устьевой области Кубани. Материалы XVII пленарного межвузовского координационного совещания по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Краснодар. 2002.
7. Михайлов В.Н., Повалишников Е.С., Иванов А.А. Многолетние изменения уровней воды в дельте р.Кубани //Водные ресурсы. 2002. Том 29. № 1.
8. Михеенков Н.Д. Азовские наводнения //Человек и стихия. 1971». 1970.
9. Нагалецкий Ю.Я., Юрченко Н.В., Гайдамакина Т.М. Наводнения и их виды на территории Северо-Западного Кавказа. Материалы Международной научно-практической конференции «География и регион». Вып. IV. Пермь. 2002.
10. Симов В.Г. Гидрология устьев рек Азовского моря. М.: Гидрометеоздат, 1989.
11. Симонов А.И. Гидрология устьевой области Кубани. М.: Гидрометеоздат, 1958.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА НАВИГАЦИОННУЮ ОБСТАНОВКУ НА РЕКАХ РОССИИ*

*Чалов Р.С., доктор геогр. наук, Рулева С.Н., Завадский А.С.,
кандидаты геогр. наук (МГУ им. М.В. Ломоносова), Беляков А.А.
доктор геогр. наук (Московская гос. академия водного транспорта)*

По прогнозам метеорологов [Будыко М.И., 1980; Глобальное потепление, 1993], одним из наиболее вероятных сценариев глобального изменения климата является его потепление, которое может привести к повышению средних многолетних температур на 4°C, причем, по различным оценкам, это произойдет в течение от первых двух - трех десятилетий XXI века до его конца. В свою очередь, это приведет к общему увеличению водности рек в среднем на 10 – 15 % [Основы геоэкологии, 1994]. Это относится к Северу и Центру Европейской части России, а также большей части Сибири и Дальнего Востока. Обратная ситуация будет наблюдаться только на юге Европейской территории, где повышение температуры приведет к общему снижению водности вследствие увеличения потерь на испарение.**

Изменения водности рек при общем (глобальном) потеплении климата неизбежно скажется на условиях навигации при использовании их в качестве водных путей. Сток рек (его объем, внутригодовая и многолетняя изменчивость) — внешний фактор русловых процессов, который, в свою очередь, определяет глубину русла, в том числе на перекатах, являющихся главной формой руслового рельефа, лимитирующей условия судоходства. Климат обуславливает продолжительность физической навигации, которая соответствует времени свободного ото льда русла между концом ледохода и появлением первых ледовых явлений.

На практике габариты судовых ходов и длительность навигации определяются технико-экономическими соображениями. Так, глубина на перекатах, называемая гарантированной, устанавливается по специальным формулам в зависимости от размеров расчетных судов, плотов или их составов (осадки судов и запаса глубины под днищем). Эта глубина поддерживается с помощью дноуглубительных средств, но до определенных пределов, которые зависят от гидравлических условий каждой реки. Однако такие максимально возможные по гидравлическим условиям глубины достигаются редко, так как их поддержание обычно экономически невыгодно.

*Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант №00-05-64690) и в рамках проекта поддержки ведущих научных школ (проект №01-05-64284).

** Если не учитывать увеличение интенсивности ледотаяния на реках с ледниковым питанием (ред.)

До середины XX века глубины на судоходных реках в межень были близки к естественным; дноуглубление носило, как правило, эксплуатационный характер и было призвано обеспечить движение флота в маловодный период. Начиная с 50-х годов и вплоть до конца 80-х проводилась крупномасштабная реконструкция водных путей, в том числе посредством проведения капитальных землечерпательных и выправительных работ. Это привело к существенному (до 2 – 2,5 раз) увеличению гарантированных глубин, стабилизации трасс судовых ходов и общему улучшению условий судоходства. С начала 90-х годов дноуглубление на реках было резко сокращено или полностью прекратилось. Начался процесс восстановления естественного руслового режима рек, который привел к началу XXI столетия к снижению глубин практически до естественных, хотя на реках в ряде случаев создавалась иная картина в расположении лимитирующих перекатов по длине реки и относительно форм самого русла [Чалов, 2000; Рулева и др., 2001]. Это же привело к необходимости максимального использования дифференцированных глубин, зависящих от уровня воды, и проведения дноуглубления в минимальных размерах лишь при уровнях, близких к проектным (т.е. соответствующих гарантированной глубине), которые на всех реках уменьшились до значений, близких к естественным (если не возникли дополнительные искусственные факторы - например, регулирование стока ГЭС и размывы русла в их нижних бьефах).

На малых реках, на которых в межень снижение водности не обеспечивает глубин, необходимых для движения транспортного флота, транзитное судоходство осуществлялось только в период высокой воды, так называемым экспедиционным методом. Уже в 60 – 70-е годы в связи с массовым переходом водного транспорта на крупнотоннажный флот на многих малых реках судоходство было закрыто, особенно в экономически развитых или интенсивно развивающихся районах (европейская часть России, Центр и Юг Западной Сибири), где шло переключение традиционно речных грузопотоков на строящиеся автомобильные и железные дороги.

Оценить изменения глубин на перекатах при увеличении водности (или ее сокращении для Юга европейской территории России (ЕТР)) вследствие повышения среднегодовых температур воздуха можно на основе совместного анализа кривых расходов воды $Q = f(H)$, где Q — расход воды, H - соответствующие им уровни, и графиков связи глубин на перекатах T в зависимости от уровней воды на опорных гидрологических постах $T = f(H)$. Такие графики ежегодно или за многолетний период строятся службой пути го-

сударственных бассейновых управлений водных путей и судоходства и их структурными подразделениями - районами водных путей. Эта работа достаточно трудоемкая, требует значительного времени, но должна проводиться с учетом сезонного и многолетнего режима перекатов, устойчивости русла, особенностей грядового движения наносов и т.д.

Анализ изменения глубин (увеличения/уменьшения) при увеличении (уменьшении) водности рек может быть выполнен в первом приближении по существующим формулам:

модифицированной Х.М. Полина [Маккавеев Н.И., 1949; Седых и др., 1978]

$$T = 0,5 \sqrt[3]{K_n Q_{np}} \quad (1)$$

где K_n — коэффициент плеса, характеризующий устойчивость русла; Q_{np} — расход воды при проектном уровне;

К.В. Гришанина [1972]

$$T_{cp} = \frac{MQ^{0,5}}{(gB)^{0,5}} \quad (2)$$

где B — ширина русла;

Г.Лэсея [G. Lasey, 1929 — 1930]

$$T = 0,47 \left(\frac{Q}{8\sqrt{d}} \right)^{1/3} \quad (3)$$

где d — крупность руслообразующих наносов.

Принимая все составляющие формул, кроме расхода воды, неизменными при повышении (уменьшении) среднегодового расхода воды и незначительность изменения внутригодового режима стока воды, можно получить в первом приближении долю увеличения (уменьшения) глубины русла на перекатах (табл. 1).

Таблица 1

Увеличение (+) или уменьшение (-) транзитных глубин по сравнению с современными при росте среднегодовых температур воздуха и повышении водности рек (для юга ЕТР — понижении водности), %.

Формула	Увеличение водности		Уменьшение водности 7%
	15%	3%	
Х.М. Полина (1949)	+4	+3	-3
К.В. Гришанина (1972)	+7	+4	-5
Г. Лэсея (1929-1930)	+3	+2	-2

Во многих случаях реальные повышения глубин при проектных уровнях, особенно на средних и больших реках, находятся в пределах 5 – 10 см (по отношению к установленным на 2000 г гарантированным глубинам), что равнозначно состоянию глубин в условиях, когда уровни в межень не понижаются до проектных, а дифференцированные глубины оказываются больше гарантированных в маловодную фазу режима. Таким образом, увеличение стока и проектного расхода должно сказываться на условиях судоходства, особенно при современных минимальных объемах дноуглубления, и проведении последнего в превентивных целях. Это определяется тем, что в данных расчетах не учитывается возможность изменения режима движения наносов и обмеления перекатов как его следствия при повышенной водности реки. Это возможно на песчаных реках со слабоустойчивым или неустойчивым руслом, отличающимся активными переформированиями руслового рельефа.

При повышении устойчивости русла возможен с увеличением водности межени саморазмыв гребней перекатов, и тогда будет устанавливаться глубина, большая расчетной. На реках с устойчивым, как правило, галечным руслом рост глубин будет осуществляться только за счет повышения водности и, соответственно, уровней, так как крупность наносов на них всегда будет больше критической при заданном увеличении водности.

При снижении водности реки, особенно в маловодный период (если принимать неизменным внутригодовое распределение стока), уровни воды будут только за счет этого фактора устанавливаться ниже проектных. И если на магистральных водных путях допускается срыв проектных (гарантированных) глубин в потоке до 5 сут. за навигацию, то теперь это значение возрастает в 2 – 3 раза, что неизбежно повлечет за собой необходимость пересмотра отметок самого проектного уровня или перевода реки в другой, более низкий класс водных путей.

Со стоком воды связан еще один показатель качества водных путей — радиус кривизны судового хода. Он определяется по формуле Н.И. Маккавеева (1949)

$$r = kQ_{\phi}^{1/2} I, \quad (4)$$

где Q_{ϕ} — руслоформирующий расход воды, I — уклон, k — коэффициент, в среднем равный 0,0014. Значение Q_{ϕ} определяет также ориентировку дноуглубительных прорезей на перекатах. При увеличении водности (при неизменности внутригодового стока) можно полагать, что Q_{ϕ} возрастает так же, как и среднегодовой

расход воды. Отсюда при росте $Q_{\text{ср}}$ на 10% радиусы кривизны по формуле (4) возрастут на 4%, при росте $Q_{\text{ср}}$ на 15% — на 7%. Более пологая трасса фарватера создает более благоприятные условия для судоходства.

На малых реках в силу их общей естественной мелководности увеличение глубин при повышении водности будет незначительным (как правило, до 5 см), что находится в пределах точности определения самих глубин. Однако увеличение среднегодового стока воды на них может сопровождаться общим углублением русл (их размывом), что приведет к значимости роста глубин по сравнению с расчетным. В результате возрастет возможность транспортного использования малых рек и удлинения периода, пригодного для экспедиционного завоза грузов.

При снижении водности и уменьшении глубин на малых реках следует ожидать полного прекращения судоходства на них.

Вопрос о продолжительности физической навигации на реках в условиях повышения (понижения) их водности более сложен для экспертной оценки вследствие его неразработанности. Исходя из того, что на южных реках она существенно больше, чем на северных, можно полагать, что потепление (а не изменение водности) будет сопровождаться удлинением навигации. Так, на верхней Оби (слияние Бии и Катунь — устье Чарыша) при среднегодовой температуре воздуха $+1,4^\circ$ продолжительность навигации составляет 193 дня, на средней Оби, соответственно, $-3,8^\circ$ и 166 дней. Если принять прямую зависимость между среднегодовой температурой и длительностью навигации, то можно при повышении первой на $4,5^\circ$ в центре Западной Сибири ожидать увеличения навигационного периода на средней Оби на 20 дней.

С другой стороны, исходя из водности, логично предположить, что ее рост должен сопровождаться удлинением навигации. Однако в действительности эта связь более сложная. Так, на верхней и средней Оби в многоводные годы навигация на 10 — 20 дней продолжительнее, чем в маловодные. Например, в Барнауле в многоводном 1995 г она составила 208 дней, а в маловодном 1991 г — 193 дня; в Дубровино (участок Новосибирск — устье Томи) в те же годы, соответственно, 217 и 198 дней. В то же время на Северной Двине (табл. 2) и Дону эта связь обратная. В этих условиях оценку изменения длительности навигации, очевидно, правильнее оценивать по изменению среднегодовой температуры воздуха.

Судоходные условия шлюзованных и зарегулированных рек в целом более стабильны, чем на свободных реках, и соответ-

Таблица 2
Длительность навигации в характерные по водности годы
на Северной Двине

Участок	Годы	Водность года	Длительность навигации, дни
Беликий Устюг - Котлас	1996	Min	215
	1978	Max	189
Котлас – Рочегда	1988	Min	184
	1952	Max	168
Рочегда – Березник	1988	Min	177
	1952	Max	177
Березник – устье р. Пинеги	1975	Min	176
	1993	Max	169

ствуют проектным параметрам — за исключением свободных (неподпертых) нижних бьефов гидроузлов и зон выклинивания подпора водохранилищ, которым свойственны отличные от незарегулированных рек русловые деформации.

В зависимости от степени зарегулированности стока водохранилищами, назначения гидроузлов и состава участников водохозяйственных комплексов (ВХК), а также от технического состояния гидросооружений, изменения годового стока влияют на уровень режим и судоходные условия рек по-разному (или же такое влияние отсутствует). Если в составе гидроузлов на реках имеются гидроэлектростанции, то из участников ВХК именно они получают наибольший эффект от увеличения годового стока (благодаря его регулированию водохранилищами). Так, в РФ при установленной мощности гидроэлектростанций их расчетная среднемноголетняя выработка составляет 167 млрд. кВт·ч/год (10 % технического потенциала); однако в 90-х годах из-за сложившейся высокой водности выработка ГЭС была значительно больше (максимум 176 млрд. кВт·ч в 1995 г).

В середине 90-х годов совместный анализ проблем энергетики и глобальных изменений климата позволил сформулировать следующую схему их взаимодействия (данные А.М. Резниковского): глобальное потепление климата ведет к увеличению стока рек и увеличению выработки электроэнергии ГЭС; это, в свою очередь, ведет к увеличению доли гидроэнергии в энергобалансе и уменьшению сжигания топлива теплоэнергетикой. Однако очевидно, что наращивание мощностей ГЭС не должно быть самоцелью, а должно рассматриваться в комплексе с перераспределением стока во

времени и по территории. Попуски из водохранилищ, обусловленные работой ГЭС, не совпадают с потребностями судоходства. Поэтому увеличение естественного притока в водохранилища, давая возможность увеличить выработку электроэнергии, не вызывает адекватного увеличения судоходных глубин.

Наиболее характерный пример — р. Вилюй: водохранилище в его верховьях осуществляет глубокое сезонное и многолетнее регулирование стока, и если до его создания максимальные расходы воды имели место в мае — июле при ничтожно малых расходах в зимнюю межень, то в настоящее время максимальные расходы проходят зимой (когда наиболее велика потребность в электроэнергии ГЭС), а на протяжении большей части навигационного периода минимальные глубины Вилюя не превышают 40 — 70 см. В результате Вилюй для судоходства является «малой рекой» с экспедиционным завозом грузов [Водные пути ..., 1995], и увеличение годового стока Вилюя, давая увеличение выработки электроэнергии Вилюйских ГЭС-1, ГЭС-2 и ГЭС-3, не повышает коммуникативного качества реки.

Поэтому для повышения комплексной эффективности использования возрастающего стока на реках с водохранилищами глубокого регулирования в верховьях (Вилюй, Колыма, Зeya, в перспективе — Бурея и др.) целесообразно сооружение каскадов низконапорных гидроузлов с гидроэлектростанциями и судопропускными сооружениями.

Изменения навигационных условий в разных регионах

Север европейской территории

Все реки находятся в свободном состоянии. Современные гарантированные глубины (на 2000 г) близки к естественным; их изменения при увеличении годового стока на 15 % приводятся в табл. 3. Расчет проведен по формулам (1) ... (3).

Современная средняя продолжительность навигации (по данным атласа «Внутренние водные пути...», 1986): Вологда — 199 дней, Котлас — 185, Архангельск — 178, Троицко—Печорск — 173, Усть-Уса — 155, Мезень — 165 дней. Эти данные дают тренд, позволяющий предполагать, что прогнозируемое увеличение среднегодовой температуры на 4° повлечет за собой удлинение навигации на всех реках региона в пределах 1 месяца (30 дней). Это даст возможность увеличить продолжительность навигационного периода за счет более раннего начала и более позднего окончания сроков судоходства. Вместе с тем, поскольку общий объем весеннего половодья не будет существенно отличаться от современно-

Таблица 3

Увеличение минимальных глубин (ΔT) на перекатах рек севера ЕТР
(при увеличении годового стока на 15%)

Река, участок	Современная гарантированная глубина, см (2000г)*	ΔT , см
Вологда	180	7-12
Сухона: выше устья Вологды	180	7-12
устье Вологды – Камчуга	150	6-10
Михайловка – Нюксеница	100	4-7
Нюксеница – Великий Устюг	90	4-6
Уфтюга	110	4-7
Лежа	110	4-7
Юг: выше Кичменьгского Городка	130	5-9
Кич. городок – устье	150	6-10
Вычегда: Усть-Кулом – Ленью	120	4-8
Ленью – устье Сысолы – Угольные причалы	130	5-9
Угольные причалы – устье	170	6-11
Северная Двина:		
Великий Устюг – Котлас	110	4-7
Котлас – Орлецы**	170	6-11
Орлецы – Архангельск	215	8-15
Вага	80	3-6
Омега	120	4-8
Мезень: выше устья Вашки	70	3-5
устье Вашки – устье	90	4-6
Печора: Троице-Печорск – Вуктыл	95	4-7
Вуктыл – Бизовая	125	5-8
Бизовая – Печора	145	6-10
Уса	145	6-10
Колва	90	4-6

* Официальные данные Росречфлота.

** Реальные гарантированные глубины на этом участке 110 – 130 см.

го, весеннее обмеление большинства перекатов не будет экстремально большим. Наиболее полно позитивная роль увеличения стока воды для нужд транспортного флота проявится в период летне-осенней межени. Годы с многоводным меженным периодом всегда были благоприятными для водного пути, так как позволяли максимально долго использовать дифференцированные

глубины для поддержания судоходной трассы без применения землечерпательной техники. Особенно актуально это становится в современных экономических условиях при минимальных объемах финансирования водных путей. В случае, если многоводные меженные периоды станут нормой, это позволит снизить объемы землечерпания или, сохранив их, увеличить габариты судового хода. Для среднего течения Северной Двины увеличение меженого стока на 15% приведет к повышению уровня воды (по г.п. Абрамково) на 20 см. Это даст возможность увеличить современные гарантированные глубины на перекатных участках до 130 см, при которых число лимитирующих перекатов составит 20 – 25 %. При сохранении современной гарантированной глубины (110 см) число лимитирующих в настоящее время перекатов снизится с 26% до 6 – 8%, и таковыми останутся только традиционно сложные для судоходства Шеловский, Паячный, Верхне Рубежский, Верхне Коптельский, Шилинские перекаты.

Таким образом, увеличение среднегодовой температуры в бассейне Северной Двины (по рассмотренному сценарию) приведет к перестройке водного баланса территории и в целом положительно скажется на условиях судоходства.

Увеличение годового стока рек окажет определенное позитивное воздействие на судоходные условия соединительной Северо-Двинской системы. Однако из-за плохого технического состояния старых гидротехнических сооружений этим не удастся воспользоваться: возросли фильтрационные потери из подпертых бьефов, или же плотины не могут держать проектный напор.

Учитывая труднодоступность многих районов региона, особенно в бассейнах Печоры и Мезени, в целом можно говорить о вероятности улучшения условий судоходства на реках при повышении среднегодовой температуры и водности рек.

Центр европейской территории

Судоходные условия на водных путях Волжско-Камского каскада в наименьшей степени зависят от складывающейся водности. Однако ввиду того, что Чебоксарское и Нижнекамское водохранилища не заполнены до проектных отметок, подпор от них не достигает, соответственно, Городецкого и Воткинского шлюзов. Особенно неблагоприятно первое, так как угрожает разрывом Единой глубоководной системы на изолированные участки Волги выше Городца (северная часть) и ниже устья Оки (южная часть). Увеличение притока в Горьковское и Рыбинское водохранилища возможно позволит увеличить судоходные по-

пуски в нижний бьеф Горьковской ГЭС, что в сочетании с комплексом выправительных сооружений даст возможность несколько смягчить ситуацию. Однако радикальное решение проблемы состоит в создании подпора на данном участке — заполнении Чебоксарского водохранилища или же сооружения промежуточной подпорной ступени.

Большинство судоходных рек — притоков Волги — находятся в подпоре от волжских водохранилищ. Поэтому изменение их водности не приведет к росту глубин и изменению условий судоходства.

В табл. 4 приводятся данные для рек Ветлуги и Суры выше зоны выклинивания подпора и рек бассейна Оки.

Таблица 4

Увеличение минимальных глубин на перекатах рек центра ЕТР при увеличении годового стока на 10%

Река, участок	Современная гарантированная глубина, см (2000 г)	ΔT , см
Ветлуга: Ветлужская — Юркино	85	3-4
Сура: выше Курмыша	80	2-3
Ока: Калуга — Алексин	65	2-3
Алексин — Щурово	120-130	4-5
Щурово — Сейма	200	6-8
Проня	120	4-5
Мокша	100	3-4
Клязьма: Владимир — устье Тезы	70	2-3
устье Тезы — устье	100	3-4
Цна: выше 40 км от устья	80	2-3
ниже 40 км	100	3-4

Анализ данных табл. 4 показывает, что прирост глубины будет в основном находиться в пределах точности ее определения. Таким образом, по этому показателю улучшения условий судоходства при прогнозных изменениях климата практически не произойдет.

Разница в среднегодовых температурах воздуха в пределах региона невелика — в пределах 1,5 — 2°. Навигация на реках сокращается в направлении с запада на восток, составляя на Оке 232 дня в Калуге, на Сейме (близ устья) — 227, на Цне — 218, на Ветлуге — 205 дней. Очевидно, это связано с усилением континентальности климата и суровости зим. Изменение среднегодовой температуры на 2° не вызывает заметных изменений в ее длительности.

Юг европейской территории

При повышении среднегодовой температуры воздуха на 1° ожидается снижение водности рек на 7 %. Это повлечет за собой снижение многолетних меженных глубин на разных реках (Дон, Кубань, Маныч, Воронеж) только за счет этого фактора от 2 до 6 см и лишь на Северском Донце — до 7 – 11 см. При этом следует учесть то, что все реки испытывают огромное влияние эрозии почв и овражной эрозии на сельскохозяйственных землях. Снижение водности рек усиливает аккумулятивные процессы в реках и вызывает их дополнительное обмеление. В результате можно ожидать уменьшения глубин в 1,5 – 2 раза больше расчетного. В этой ситуации возникает необходимость пересмотра отметок проектного уровня.

Изменение длительности навигации при незначительном повышении температуры воздуха может быть в пределах нескольких дней.

Бассейны нижней и средней Оби

Здесь при повышении среднегодовой температуры на $4,5^\circ$ и увеличении годового стока на 15 % следует ожидать роста глубин практически на всех реках бассейна, причем на основных — в значимых пределах (табл. 5).

Учитывая, что реки в основном имеют относительно устойчивые русла и в то же время возможен их саморазмыв при повышении водности, увеличение глубин будет способствовать улучшению условий судоходства, в том числе там, где водные пути являются главным средством сообщения и доставки грузов (Надым, Таз, Пур). На левобережье Иртыша (Тара, Тура, Тобол, Тавда) врезание рек, очевидно, будет компенсироваться повышением поступления наносов с эрозионных сельскохозяйственных земель этой части региона.

Увеличение среднегодовой температуры воздуха на $4,5^\circ$, в соответствии с трендом зависимости от t_{cp} длительности навигации в бассейне, повлечет за собой удлинение ее в разных частях бассейна на 10 ... 15 сут.

Бассейн верхней Оби

Увеличение годового стока на 10% может повлечь за собой некоторый рост глубин на Оби (в пределах 4 – 10 см) на разных ее участках, не находящихся под влиянием Новосибирской ГЭС. Однако малая устойчивость русла и интенсивность его переформирования не позволят этому процессу реализоваться. Лишь ниже устья Томи оно может превысить 10 см.

Таблица 5

Увеличение минимальной глубины на перекатах рек бассейна средней и нижней Оби при повышении годового стока на 15%

Река, участок	Современная гарантированная глубина, см (2000 г)	ΔT , см
Иртыш: Клин – Новая Станица	180	7-12
Новая Станица – устье Тобола	210-200	8-15
устье Тобола – устье Иртыша	300	12-21
Тара	80-85	3-6
Тура	140	5-10
Тобол	140	5-10
Тавда: Исюк – Таборы	75	3-5
Таборы – В. Тавда	90	4-6
В. Тавда – устье	120	5-8
Конда: Дальние причалы – Междуреченка	120	5-8
Междуреченка – устье	140	6-10
Обь: Соснино – устье Иртыша – устье Оби	300	12-20
Газ: Красноселькуп – Газсале	140	6-10
Газсале – устье	210	8-14
Пур: Пуровск – Уренгой	130	5-9
Уренгой – 125 км	230	10-16
125 км – устье	260	10-18
Надым: Надым – 38 км	200	8-14
38 км – устье	230	10-16
Вах: 432 км – Самотлор	120	4-8
Самотлор – устье	300	8-14
Аган	120	4-8

На других реках возможное увеличение глубин за счет роста водности незначительно: 2 – 3 см на Бие выше Мал. Угреново и на верхней Томи, 4 – 5 см в низовьях Бии. Лишь на нижней Томи можно ожидать роста глубин за счет повышения уровней воды на 8 – 11 см.

За годы эксплуатации Новосибирского гидроузла в его нижнем бьефе произошли существенные русловые деформации, выразившиеся в «посадке» уровней и уменьшении судоходных глубин при малых расходах. При увеличении годового стока увеличение притока в Новосибирское водохранилище даст прирост выработки ГЭС, но влияния на судоходные условия не окажет.

Увеличение среднегодовой температуры воздуха на 3° приведет к заметному удлинению навигации — до 20 дней.

Бассейн среднего и нижнего Енисея

Здесь прогнозируется увеличение годового стока на 15% при увеличении среднегодовой температуры на $4,5^{\circ}$. Это повлечет за собой общий рост глубин на реках за счет повышения уровней воды (табл. 6), который будет поддерживаться высокой устойчивостью русл, имеющих галечный состав руслообразующих наносов. Это обстоятельство благоприятно из-за наличия порогов на многих реках, в том числе на Енисее (Осиновский порог); существенное повышение глубин над ними обеспечит снижение скоростей течения (пропадает эффект водослива) и облегчит проход судов.

Таблица 6

Увеличение минимальных глубин на перекатах рек бассейна среднего и нижнего Енисея при увеличении годового стока на 15%

Река, участок	Современная гарантированная глубина, см (2000 г)	ΔT , см
Енисей:		
устье Ангары – устье Подкаменной Тунгуски	320	13-22
устье Подкаменной Тунгуски – Игарка	340	14-24
Подкаменная Тунгуска:		
Ванавара – Чуня	250	10-17
Чуня – Вельмо	260	10-18
Вельмо – устье	265	11-19
Нижняя Тунгуска:		
Кислюпан – устье Туры	240	10-17
Устье Туры – Ногинск	270	11-19
Ногинск – устье Н. Тунгуски	210	11-20
Курейка	210	8-15

Увеличение среднегодовой температуры воздуха на $4,5^{\circ}$, очевидно, будет способствовать удлинению навигации до 10 дней на нижнем Енисее, Подкаменной и Нижней Тунгусках и до 20 – 25 дней в среднем течении реки. В условиях первостепенного значения водного пути это имеет большое значение в обеспечении доставки грузов с труднодоступные районы Сибири.

Бассейн верхнего Енисея

При увеличении водности на 10% на реках в свободном состоянии можно ожидать незначительного, но устойчивого прироста глубин (реки имеют галечное русло) в пределах 2 – 6 см на верхнем Енисее, 4 – 5 см на Ангаре и Тасеевой. Более заметный прирост глубин возможен на Енисее между г. Красноярском и устьем

Ангары — 9 — 12 см. Однако здесь, особенно на участке Красноярск-Атаманово, это будет затушевываться неблагоприятной для водного транспорта значительной амплитудой суточных колебаний уровня в нижнем бьефе Красноярской ГЭС, достигающей 6 м, которая могла бы быть снята устройством контрбьефа (аналогичного Майнскому гидроузлу в нижнем бьефе Саянской ГЭС). Однако ниже по течению увеличение глубин за счет повышения уровней приведет к некоторому улучшению условий судоходства в районе Казачинских порогов, хотя кардинально судоходные условия на них могут быть улучшены только при подпоре воды плотинами.

На Ангаре судоходство осуществляется в замкнутых бьефах — водохранилищах, так как в свое время строительство судопропускных сооружений в составе гидроузлов было отнесено на неопределенную перспективу. Поэтому увеличение годового стока, увеличивая водноэнергетические ресурсы каскада, не вызывает изменения судоходных условий. Вместе с тем непрерывность каскада будет нарушена; поэтому при достройке Богучанской ГЭС принято решение о значительном понижении НПУ водохранилища — до 185 м против 208 м по проекту. В результате подпор от Богучанской ступени не будет доходить до Усть-Илимской ступени, и перспективы Ангары как пути сообщения становятся еще более неопределенными.

Увеличение продолжительности навигации при повышении температуры на $4,5^{\circ}$ может быть существенным, но будет сдерживаться усилением заторных явлений.

Бассейны нижней Лены, Яны, Индигирки, Колымы

Реки бассейнов находятся в свободном состоянии. Увеличение годового стока на 15 % приведет к увеличению глубин за счет повышения меженных уровней (табл. 7). При этом наличие мерзлых грунтов в руслах рек или галечный состав руслообразующих наносов будет способствовать стабилизации этого повышения на реках с малоустойчивым руслом.

В условиях сурового климата северо-востока России увеличение среднегодовой температуры даже на 5° не изменит продолжительности навигации, т.к. среднее ее значение сохраняется ниже -10° .

Бассейн верхней и средней Лены

Реки здесь находятся в свободном состоянии, имеют галечный состав наносов. Ожидаемый рост глубин при увеличении водности рек на 10% невелик (в пределах 5 — 10 см), но достаточно стабилен из-за высокой устойчивости русл.

Таблица 7

Увеличение минимальных глубин на перекатах рек бассейнов нижней Лены, Яны, Индигирки, Колымы при увеличении годового стока на 15 %

Река, участок	Современная гарантированная глубина, см (2000 г)	ΔT , см
Лена: Якутск – Быков мыс	290	12-20
Вилюй	130	5-9
Яна: Батагай – устье Адычи	95	4-7
устье Адычи – Куйга	110	4-8
Куйга – Нижнеянск	220	9-15
Оленек	150	6-10
Индигирка	200	8-14
Колыма: Усть-Среднекан – Ороек	110	4-8
Ороек – Зырянка	140	6-10
Зырянка – Черский	200	8-14

Повышение среднегодовой температуры воздуха на 3° в условиях сурового климата Восточной Сибири не приведет к изменению длительности навигации, так как во всем бассейне они сохраняются на уровне ниже -1° .

Бассейн Амура

Увеличение годового стока на 10% приведет в целом по бассейну к незначительному росту глубин (4 – 8 см) при современных глубинах от 85 см (Амгунь) до 200 см (средний Амур). На Амуре ниже устья Сунгари (глубина 250 см), от Хабаровска до Комсомольска (350 см) и от Комсомольска до Николаевска (425 см) относительный рост глубин будет также очень незначительный: 7 – 10 см выше Хабаровска и 10 – 14 см на нижнем Амуре.

Увеличение среднегодовой температуры воздуха на 2° может привести к удлинению навигации на несколько дней.

Заключение

Таким образом, в разных регионах России глобальные изменения климата по-разному скажутся на навигационной обстановке судоходных рек: от увеличения ее продолжительности и повышения глубин в маловодную фазу режима (Север ЕТР, бассейны средней и нижней Оби, бассейны среднего и нижнего Енисея) до отрицательных последствий из-за снижения водности рек (юг ЕТР). Остальные бассейны занимают промежуточное положение: в них положительный эффект незначителен (в пределах точности измерения глубин) или практически не проявляется.

Полученные результаты и используемые в статье методы расчетов рекомендуется использовать при прогнозах заторных явлений и при проведении мероприятий по снижению ущербов от наводнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеоиздат. 1980.
2. Внутренние водные пути РСФСР. М.: Главводпуть МРФ РСФСР. 1986.
3. Водные пути бассейна Лены. М.: МИКИС. 1995.
4. Глобальное потепление. Доклад Гринпис. Под ред. Дж. Деггета. М.: МГУ. 1993.
5. Гришанин К.В. Теория руслового процесса. М.: Транспорт. 1972.
6. Маккавеев Н.И. Русловой режим рек и трассирование прорезей. М.: Речиздат. 1949.
7. Основы геоэкологии. Под ред. Морачевского В.Г. СПб.: изд-во СПбГУ. 1994.
8. Рулева С.Н., Сурков В.В., Чалов Р.С. Создание современной судоходной трассы на реке Оби и ее состояние при резком сокращении дноуглубительных работ //Наука и техника на речном транспорте. Информационный сборник. 2001. №5.
9. Седых А.И., Чернышов Ф.М., Кабанов А.В. Путевые работы на свободных реках. М.: Транспорт. 1978.
10. Чалов Р.С. Русловые процессы и воднотранспортные проблемы больших рек России //Наука и техника на речном транспорте. Информационный сборник. 2000. №12.
11. Lacey G. Stable channels in alluvion //Proceeding of the Institution of Civil Engineers. London. 1929 – 1930. Vol. 239.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ - СОВРЕМЕННЫЙ ИНСТРУМЕНТ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РЕЧНОЙ ГИДРАВЛИКИ. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАВОДКОВ В ПРОЕКТЕ «ВОЛГА-РЕЙН»

Бритвин С.О., кандидат техн. наук, Беликов В.В., кандидат физ-мат. наук, Милитеев А.Н., Прудовский А.М., доктора техн. наук, Родионов В.Б., канд. техн. наук (ОАО «НИИЭС»)

Речная сеть Европы столетия обеспечивает различные нужды жителей европейских стран. Берега рек густо заселены, и наряду с обеспечением хозяйственных нужд реки могут являться источником опасности при различных техногенных и естественных событиях. Политическая обстановка в Европе в последние годы способствует укреплению многостороннего и двустороннего экономического сотрудничества европейских стран. Одним из примеров такого сотрудничества является осуществление проекта «Вол-

га-Рейн», выполняемого специалистами Германии и России. Обмен опытом эксплуатации водотоков Европы, играющих решающие роли в жизни двух крупнейших европейских стран, в частности должен обеспечить повышение качества их эксплуатации и защиту прибрежных областей от аварийных естественных и антропогенных воздействий.

Одной из важнейших задач, решаемых при разработке проекта «Волга-Рейн», является разработка методологии определения параметров нестационарных явлений в реках и использование такой методологии при решении ряда задач, таких как регулирование режима каскада ГЭС, управление режимом водотоков в интересах различных областей экономики (водозаборы, рыбное хозяйство, судходство, рекреация и т.д.). Особое место занимает здесь прогнозирование параметров паводков и разработка мероприятий по защите от них хозяйственных объектов и населения. Особое внимание к проблеме паводков в проекте «Волга-Рейн» привлечено событиями на реках Европы в 2002 г., имеющими тяжелые последствия.

Последствия наводнений существенно зависят от достаточной точности их прогнозирования и принятия соответствующих защитных мер, а также от эффективности руководства и действий оперативного персонала и специальных сил спасения в условиях чрезвычайных ситуаций.

Большую пользу в организации этих мероприятий в настоящее время могут дать гидравлические модели бассейнов рек, которые позволяют заблаговременно произвести прогноз прохождения по реке паводка как естественной, так и техногенной природы и оценить его последствия.

Период разработки проекта «Волга-Рейн» совпадает со временем бурного развития компьютерного моделирования.

Область моделирования гидравлических явлений характеризуется в настоящее время совместным использованием физического и численного моделирования. Употребление численного моделирования позволяет в наши дни решать задачи, которые относительно недавно невозможно было решать традиционными (в частности с использованием физического моделирования) методами. При моделировании бассейнов рек, имеющих большую протяженность и разветвленность, что характерно для Волги и Рейна, лабораторные исследования в целом бассейнов рек в сколь-либо приемлемых геометрических масштабах принципиально невозможно, и численное моделирование является единственно приемлемым по достоверности и реальной осуществимости путем решения задачи.

В настоящее время на смену термину «численное моделирование» приходит термин «компьютерное моделирование». Под компьютерным моделированием понимается как расчет на основании той или иной численной модели, так и сбор и подготовка исходных данных и представление результатов исследований с применением компьютерных технологий.

Так, для получения высокоточного рельефа русл рек применяются эффективные методы эхолотирования с использованием систем спутникового позиционирования (GPS), позволяющие получать абсолютные отметки дна русла в виде компьютерных файлов непосредственно в одной из глобальных координатных систем. Эти данные с использованием интенсивно развивающихся в последнее время ГИС-технологий, представляющих сведения не только о топографическом строении рассматриваемого бассейна реки, но и о растительности, застройке, коммуникациях, других экономико-географических и социальных данных, могут быть непосредственно включены в слои электронной топографической карты требуемого масштаба.

Методология использования ГИС-технологий достаточно полно разработана и используется в ОАО «НИИЭС» и на географическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова. Электронные карты должны не только облегчать подготовку исходных данных и повышать их точность, участвовать в отображении результатов численного моделирования, но и составить единое целое с расчетной программой, обеспечивая взаимодействие картографической и расчетной информации и возможность внесения изменений в данные и анализ результатов непосредственно в процессе моделирования.

Характерной чертой нашего времени является быстрый рост мощности и быстродействия персональных компьютеров при существенном падении цены на них, что дает возможность эффективно пользоваться вычислительной техникой большинством организаций при решении весьма сложных задач, в том числе связанных с паводками, использовать ее эксплуатационным персоналом ГЭС для решения задач в реальном масштабе времени.

Основой компьютерного моделирования являются математические модели и алгоритмы, которые должны адекватно отражать рассматриваемое явление. Можно ответственно утверждать, что некоторые математические модели и алгоритмы в сфере инженерной гидравлики открытых потоков, разработанные российскими учеными, во многих случаях по качеству превосходят таковые, используемые в других развитых странах. Среди ряда

российских ученых, внесших существенный вклад в разработку гидравлических математических моделей, чьи работы указаны в списке литературы, сопровождающем данную статью [1...8], имеется плеяда сотрудников ОАО «НИИЭС», таких как В.М. Лятхер, А.Н. Милитеев, В.В. Беликов, Б.Л. Историк, А.М. Прудовский, С.Я. Школьников и др. Разработанные ими модели и алгоритмы были подвержены тестированию при решении многих задач с использованием лабораторных и натуральных данных.

На основании работ сотрудников института разработаны, зарегистрированы Российским Агентством по патентам и товарным знакам и многократно использованы в инженерной практике следующие компьютерные программы:

«FLOOD» — для расчета течений в системе русл с деформируемым дном и затапливаемой поймой;

«БОР» — для расчета бурных потоков и волн прорыва напорных фронтов;

«RIVER» — для расчета течений в межени и паводки в протяженной и разветвленной системе русл;

«GIVVER» — для подготовки исходных данных и отображения результатов расчетов на гибридных сетках с использованием электронных карт.

Компьютерное моделирование паводков дает возможность получить долговременные и краткосрочные прогнозы прохождения паводков, связанных как с метеорологическими условиями, так и с разрушением гидроузлов, получить границы затапливаемых территорий, глубины воды в их пределах, скорости и уровни воды в районах мостов, дорожных насыпей, дамб обвалования и других инженерных сооружений, оценить воздействие паводковых волн на объекты, расположенные в зонах возможного затопления, определить параметры берегозащитных и ограждающих сооружений, оценить переформирования русла, связанные с прохождением паводка, дать рекомендации по разработке системы оповещения и эвакуации населения и т.д.

Прогнозы параметров паводков дают возможность минимизировать негативные последствия паводков (в частности обеспечить сохранность напорных фронтов гидроузлов), обеспечить сохранность ответственных народохозяйственных объектов (особенно тех, повреждение которых связано с выходом в окружающую среду опасных компонентов). Эти прогнозы могут содействовать оперативному руководству в реальном масштабе

времени осуществлении мероприятий, обеспечивающих минимальные отрицательные последствия паводков и особенно защите от них населения.

Компьютерное моделирование позволяет произвести экономическую оценку последствий паводков, что особенно важно при разработке противопаводковых мероприятий и является основой производства страхования ответственности за последствия паводков.

Использование компьютерного моделирования при изучении нестационарных течений в нормальных условиях эксплуатации гидротузлов (в том числе при прохождении через них естественных паводков) дает возможность оптимизировать работу ГЭС, входящих в каскады, с точки зрения повышения выработки электроэнергии, обеспечения нормального судоходства, интересов рыбного хозяйства, водоснабжения, ирригации и т.д.

Последние разработки, выполненные в ОАО «НИИЭС» по компьютерному моделированию с использованием ГИС-технологий, позволяют уже в настоящее время создать численные гидравлические модели бассейнов рек, наиболее подверженных наводнениям, в том числе рек Волжско-Камского бассейна. Используемые при этом математические модели основываются на одномерных и двумерных уравнениях мелкой воды (уравнениях Сен-Венана) для расчета течений в руслах и на поймах, обеспечивающих в том числе квазипространственное представление о паводковых потоках, и уравнениях диффузионной волны для расчета формирования склоновой и фильтрационной боковой приточности в областях водосборов.

При создании численной гидравлической модели Волжско-Камского каскада ГЭС необходимо разработать полную модель бассейна Волги от верхневолжских водохранилищ до участка Каспийского моря, примыкающего к дельте Волги, включая все основные притоки (Каму, Оку и др.).

Модель следует построить на базе электронных топографических карт в масштабах 1:1000000, 1:200000 при возможности использовать в отдельных случаях для решения локальных задач карт в более крупных масштабах.

В модель должны быть включены модули прогнозного расчета стока во время паводков (боковой приточности) со всего водосбора.

Одномерная схематизация потока может быть применена только для отдельных участков долины. Для изучения течений в широких водохранилищах, в дельте и на затапливаемых поймах требуется применение двумерной или двумерной двуслойной численной модели.

Компьютерная модель должна обеспечивать расчет как длинных паводковых волн, так и суточных колебаний, связанных с работой ГЭС.

Модель должна позволять оптимизировать схему включения ГЭС каскада в единую энергетическую систему с учетом потребностей пользователей электроэнергии и воды.

При современном состоянии разработки численных моделей каскадов ГЭС ОАО «НИИЭС» имеет возможность выполнить эту работу для Волжско-Камского каскада с привлечением наиболее квалифицированных коллективов России и Германии за относительно короткий срок (примерно 2...3 года).

ЛИТЕРАТУРА

1. Историк Б.Л., Лятхер В.М. Распространение волны прорыва в призматическом русле. Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа, 1975. № 1.
2. Лятхер В.М., Милитеев А.Н. Гидравлические исследования численными методами. //»Водные ресурсы». 1981. № 3.
3. Лятхер В.М., Прудовский А.М. Гидравлическое моделирование. М., Энергоатомиздат, 1984.
4. Беликов В.В., Милитеев А.Н. Двухслойная математическая модель катастрофических паводков. //В сб. «Вычислительные технологии», т.1. № 3. Новосибирск: 1992.
5. Школьников С.Я. К вопросу о конструировании конечно-разностных схем для дифференциальных уравнений неустановившегося течения в непризматическом русле //«Гидротехническое строительство». 1998. № 5.
6. Беликов В.В., Милитеев А.Н., Прудовский А.М., Родионов В.Б. Расчет параметров волн прорыва с использованием стандартизированных компьютерных ГИС-технологий для ввода исходных данных и представления результатов. //Тр. Междунар. Симп. МАГИ «Гидравлические и гидрологические аспекты надежности и безопасности гидротехнических сооружений». С.-Петербург: 2002, докл. на CD-ROM.
7. Прудовский А.М., Пономарчук К.Р. Исследование формирования прорана в грунтовой плотине при прорыве напорного фронта. //Тр. Междунар. Симп. МАГИ «Гидравлические и гидрологические аспекты надежности и безопасности гидротехнических сооружений». С.-Петербург: 2002. докл. на CD-ROM.
8. Беликов В.В., Милитеев А.Н. Комплекс программ для расчета речных течений «FLOOD» //Российское Агентство по патентам и товарным знакам. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610941. М.: 2002.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЧНОГО БАССЕЙНА — ОСНОВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УЩЕРБОВ НАРОДНОМУ ХОЗЯЙСТВУ ОТ НАВОДНЕНИЙ

*Беликов В.В. ; кандидат физ.-мат. наук,
Милитеев А.Н., Прудовский А.М., доктора техн. наук,
Родионов В.Б., кандидат техн. наук (ОАО «НИИЭС»)*

Исследование распространения паводка (наводнения) в сложной речной системе при наличии поймы является важной практической задачей. Катастрофические паводки и наводнения могут возникать как от непосредственного воздействия природных факторов (интенсивного снеготаяния, циклонов с обильным выпадением осадков, ветровых нагонов), так и в результате разрушения напорных фронтов гидротехнических сооружений, вызванного размывами, землетрясениями, оползнями и другими природными явлениями. В обоих случаях следствиями прохождения паводковой волны являются затопление территорий, разрушение плотин, дамб, промышленных и гражданских зданий, человеческие жертвы.

В последние годы компьютерное моделирование и прогнозирование широко используются как универсальный и эффективный инструмент для оценки зон затопления и динамических воздействий на сооружения. Результаты численного моделирования могут быть применены в качестве основы для:

оценки ущербов народному хозяйству, находящемуся в зоне затопления;

определения режимов оптимального планирования предупредительных и защитных мероприятий, включая предотвращение ущербов от затоплений в чрезвычайных природных ситуациях при катастрофических паводках.

1. Математическая модель распространения паводка в сложной системе русл

Распространение паводка в долинах рек с меандрирующими руслами при затопленной пойме имеют весьма сложную структуру. Направления движения руслового и пойменного потоков часто не совпадают, происходит перетекание воды из русла на пойму и обратно. Наличие дорог, пересекающих пойму, и других сужений потока приводит к концентрации расходов в руслах с последующим интенсивным поступлением потока на пойму. Криволинейные очертания русл и границ поймы в плане, не-

обходимость учета притоков, существенное различие в размерах русловых и пойменных участков создают дополнительные трудности при разработке адекватных численных алгоритмов. При этом следует иметь в виду, что размеры расчетной области для таких задач обычно составляют десятки и сотни километров, ширина пойм измеряется километрами и десятками километров, а ширина русл — сотнями метров.

Очевидно, что стандартные двумерные уравнения мелкой воды не могут быть непосредственно применены для описания рассматриваемого класса задач, поскольку не позволяют учитывать (в силу осреднения по всей глубине потока) разные направления скорости течения ниже и выше бровок русла. Поэтому необходимо либо использовать трехмерные уравнения гидродинамики (что является общим, но весьма трудоемким и дорогостоящим подходом), либо разрабатывать специальные математические модели, с одной стороны учитывающие особенности изучаемого явления, а, с другой, допускающие возможность численного моделирования реальных объектов. Одна из моделей такого рода (так называемая «камерная» двумерная модель русло-пойменного потока) достаточно подробно описана в [1]. В работе [2] предложена другая схематизация потока, в соответствии с которой граница раздела руслового и пойменного потоков располагается горизонтально в поперечном направлении на уровне бровок русла, причем касательные напряжения на границе раздела принимаются пропорциональными разности скоростей в верхнем и нижнем слоях.

Авторам настоящей работы удалось развить этот подход, построив замкнутую двухслойную систему уравнений без привлечения каких-либо новых эмпирических констант [3]. Математическая модель и эффективный численный алгоритм, учитывающий специфику паводковых течений, апробированы в лабораторных экспериментах, на ряде натуральных объектов (Приморье, Европейский север, Западная Сибирь, полуостров Ямал) и показали высокую экономичность и точность расчетов.

По вертикали область течения разделяется на два слоя: слой воды над поймой и над руслом выше бровок и слой воды в русле ниже бровок. Кроме того, принимается такой масштаб пространственного осреднения, что течение в русле может быть описано в одномерной постановке, а течение на пойме — в двумерной. Исходная математическая модель состоит из верхних (осредненных по глубине) уравнений движения для верх-

него слоя (1), одномерного уравнения движения для нижнего слоя (2) и общего уравнения неразрывности (3):

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} + \frac{\partial q_i u_i}{\partial x_i} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} = \tau_{Fi} - \tau_{Si} + \tau_{wi}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QU}{\partial S} + g\omega \frac{\partial \zeta}{\partial S} = (\tau_{S_i} B + \tau_{R_i} \chi) S_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial (UH)}{\partial S} = q_0. \quad (3)$$

В этих уравнениях $i, j = 1, 2$; по повторяющимся индексам производится суммирование; t — время; x_i — декартовы координаты в плане; $\vec{q} = (q_1, q_2)$ — вектор удельных расходов воды в верхнем слое; h — толщина верхнего слоя; $\vec{u} = \vec{q}/h$ — вектор средней по глубине скорости в верхнем слое; g — ускорение свободного падения; ζ — уровень свободной поверхности воды; $\vec{\tau}_S, \vec{\tau}_F, \vec{\tau}_R, \vec{\tau}_W$ — векторы касательных напряжений на границе раздела верхнего и нижнего слоев, на поверхности поймы, на дне русла и на свободной поверхности воды (ветровые напряжения) соответственно, причем $\vec{\tau}_S = 0$ вне русла, $\vec{\tau}_F = 0$ вне поймы; Q — полный расход в бровках русла; S — координата вдоль русла; $\vec{S} = (S_1, S_2)$ — единичный вектор вдоль русла; ω — площадь поперечного сечения русла в бровках; $U = Q/\omega$ — средняя скорость воды в бровках русла; ($\vec{U} = U\vec{S}$); B — ширина русла в бровках; χ — смоченный периметр русла в бровках; $H = \omega/B$ — средняя глубина русла в бровках; q_0 — осадки. Подчеркнем, что последнее слагаемое в левой части уравнения неразрывности (3) отлично от нуля только в границах русла, а величины H, ω становятся зависящими от ζ при падении отметок свободной поверхности в русле ниже его бровок.

Неизвестными в уравнениях (1) — (3) являются четыре функции q_1, q_2, Q, ζ . Все остальные переменные величины выражаются через них, так что для замыкания системы достаточно определить касательные напряжения на верхних и нижних поверхностях каждого из двух слоев. Касательные напряжения на дне русла, на поверхности поймы и на свободной поверхности воды принимают

ся в соответствии с квадратичным законом сопротивления:

$$\bar{\tau}_R = -\lambda_R \bar{U} |\bar{U}| / 2, \quad \bar{\tau}_F = -\lambda_F \bar{u} |\bar{u}| / 2, \quad \bar{\tau}_W = \lambda_W \bar{W} |\bar{W}| / 2, \quad (4)$$

где \bar{u} — вектор скорости ветра, а коэффициенты гидравлических сопротивлений вычисляются по формулам

$$\lambda_R = 2gn_R^2 R^{-1/3}, \quad \lambda_F = 2gn_F^2 h^{-1/3}, \quad \lambda_W = 5,6 \cdot 10^{-7}, \quad (5)$$

в которых n_R, n_F — коэффициенты шероховатости русла и поймы соответственно; $R = \omega / \chi$ — гидравлический радиус потока в бровках русла.

Для определения касательных напряжений между слоями 1 и 2 заметим, что в двухслойной схеме единственный вектор, не связанный с движением координат — это разность скоростей в верхнем и нижнем слое. Поэтому на поверхности раздела

$$\bar{\tau}_s = \lambda_s \bar{V} |\bar{V}| / 2; \quad \bar{V} = \bar{u} - \bar{U}; \quad (6)$$

где коэффициент гидравлического трения между слоями λ_s однозначно определяется из требования совпадения гидравлических характеристик прямолинейного равномерного потока при расчете по двухслойной и однослойной схемам:

$$\lambda_s = \lambda_R \frac{\chi}{B} \left(\frac{h}{h+H} \right)^3 \left(\sqrt{\frac{\lambda_R}{\lambda_s}} - 1 \right)^{-2}, \quad (7)$$

где $\lambda_s = 2gn_s^2 R_s^{-1/3}$, $R_s = R(1+h/H)$.

Анализ этих формул показывает, что при условии $h \ll H$

$$\lambda_s \approx 36\lambda_R \frac{\chi}{B} \frac{h}{H} \quad (8)$$

и, следовательно, касательные напряжения на границе раздела стремятся к нулю при глубине верхнего слоя, стремящейся к нулю. При условии $h \gg H$ коэффициент трения между слоями равен

$$\lambda_s \approx \lambda_s \frac{\chi}{B} \quad (9)$$

и в пределе отношение $h/H \rightarrow \infty$ также стремится к нулю.

Система уравнений (1) ... (3) и замыкающих соотношений (4) ... (7) с учетом начальных и граничных условий на расходы и уровни воды позволяет в результате ее решения каким-либо численным методом определить скорости руслового и пойменного

потоков и отметки свободной поверхности во всей области течения. В целях повышения эффективности вычислительной процедуры вводится допущение о малости влияния локальных ускорений на динамику потока для рассматриваемого класса течений, которое справедливо при выполнении условий

$$\lambda_r L/h \gg 1, \lambda_r L/H \gg 1, \quad (10)$$

где L — характерный линейный размер задачи. Пренебрегая в уравнениях движения (1), (2) полными производными по времени и переходя в целях удобства дальнейшего изложения к векторной форме записи с применением дифференциального оператора Гамильтона $\bar{\nabla}$ и операции скалярного умножения, получим систему уравнений

$$gh\nabla\zeta = \bar{\tau}_f + \bar{\tau}_w - \bar{\tau}_s, \quad (11)$$

$$g\omega\bar{S} \cdot \nabla\zeta = (\bar{\tau}_s B + \bar{\tau}_r \chi) \cdot \bar{S}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{q} + \bar{U}H) = q_0, \quad (13)$$

которая, как и (1) ... (3), дополняется соотношениями (4) ... (7).

Покажем, что эту систему можно свести к одному уравнению в частных производных относительно ζ . Умножая векторное уравнение (11) скалярно на $B\bar{S}$, складывая с (12) и меняя порядок следования входящих в уравнение членов, получим с учетом (4)

$$\lambda_r \chi U \frac{|U|}{2} = B\bar{S} \cdot \bar{\tau}_w - g(Bh + \omega) \frac{\partial \zeta}{\partial S}, \quad (14)$$

откуда можно выразить скорость в русле ниже бровок в виде

$$U = \frac{1}{h+H} \left(E_R - D_R \frac{\partial \zeta}{\partial S} \right), \quad (15)$$

$$\text{где } E_R = (h+H) \frac{\bar{S} \cdot \bar{\tau}_w}{\gamma_R}; D_R = \frac{g(h+H)^2}{\gamma_R}; \gamma_R = \sqrt{\frac{\lambda_r \chi}{2B} \left| \bar{S} \cdot \bar{\tau}_w - g(h+H) \frac{\partial \zeta}{\partial S} \right|}.$$

Рассмотрим теперь верхний слой над руслом. Из (11), (4), (6) получим

$$\lambda_s \bar{V} \frac{|\bar{V}|}{2} = \bar{\tau}_w - gh\nabla\zeta. \quad (16)$$

Находя из последнего уравнения \vec{v} и учитывая равенство $\vec{u} = \vec{v} + \vec{U}$, получим выражение для вектора удельного расхода в верхнем слое над руслом:

$$\vec{q} = h\vec{U} + \vec{E}_s - D_s \nabla \zeta, \quad (17)$$

где $D_s = gh^2 / \gamma_s$; $\vec{E}_s = \vec{\tau}_w / \gamma_s$; $\gamma_s = \sqrt{\frac{\lambda_s}{2} |\vec{\tau}_w - gh \nabla \zeta|}$.

Аналогично для вектора удельного расхода над поймой из (11), (4), (6) имеем

$$\vec{q} = \vec{E}_f - D_f \nabla \zeta, \quad (18)$$

где $D_f = gh^2 / \gamma_f$; $\vec{E}_f = \vec{\tau}_w / \gamma_f$; $\gamma_f = \sqrt{\frac{\lambda_f}{2} |\vec{\tau}_w - gh \nabla \zeta|}$.

Теперь с использованием выражений (15), (17), (18) уравнение неразрывности (13) можно привести к виду

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\vec{E} - D \nabla \zeta + \vec{S} \left(E_r - D_r \frac{\partial \zeta}{\partial S} \right) \right] = q_0, \quad (19)$$

где слагаемое в круглых скобках отлично от нуля только в границах русла, величины D, \vec{E} над руслом берутся по (17), а над поймой — по (18).

Уравнение (19) в частных производных второго порядка параболического типа относительно отметки свободной поверхности является обобщением известного диффузионного приближения для уравнений мелкой воды на случай двухслойного русло-пойменного потока, причем коэффициенты уравнения являются нелинейными функциями ζ и ее производной.

Уравнение (19) требует постановки граничных условий на всех границах области течения. На части границы может быть задан уровень воды, а на другой части — удельный расход воды (условию непротекания через твердую границу соответствует нулевой расход). Таким образом, граничные условия записываются в виде:

$$\zeta \Big|_{\sigma_1} = \zeta_1; \left[\vec{E} \cdot \vec{N} - D \frac{\partial \zeta}{\partial N} + \vec{S} \cdot \vec{N} \left(E_r - D_r \frac{\partial \zeta}{\partial S} \right) \right] \Big|_{\sigma_2} = q_N, \quad (20)$$

где σ_1, σ_2 — части границы $\sigma = \sigma_1 \cup \sigma_2$ области течения в плане; q_N — суммарный (включая русло) удельный расход воды по нормали к границе.

Для решения (19) должно быть также задано начальное условие

$$\zeta(x_1, x_2, t = 0) = \zeta_0(x_1, x_2) \quad (21)$$

В результате решения определяются отметки водной поверхности в любой точке плана течения в любой момент времени. Скорости течения в русле и на пойме находятся дифференцированием с использованием формул (15), (17), (18).

Для решения уравнений верхнего слоя в случае относительно медленно протекающих (природных) наводнений применяется неявная по времени схема метода конечных объемов, эффективная для течений с небольшими числами Фруда [3]. Для расчета волн прорыва при разрушении гидротехнических сооружений применяются алгоритмы решения уравнений мелкой воды, основанные на явных методах (методе конечных объемов [4] и методе распада разрыва [5]), которые обеспечивают моделирование бурных потоков, гидравлических прыжков и течений по сухому дну сквозным образом без возникновения численных осцилляций и отрицательных глубин.

Расчеты могут проводиться на смешанных треугольно-четыреугольных сетках, имеющих нерегулярную топологическую структуру, что весьма удобно для расчетов в областях сложной формы при необходимости сильных сгущений (например, вблизи отверстий мостов). Такие сетки также легко «привязать» к извилистым руслам и особенностям рельефа.

2. Математическое моделирование образования наводкового стока

В рамках решения поставленной задачи о гидравлическом расчете русловой сети наряду со сбросными расходами из водохранилищ, которые считаются известными, требуется определение так называемой боковой приточности, т.е. расходов воды, поступающих в основное русло с незарегулированных территорий.

Процедура расчета приточности делится на три части.

Первая часть состоит в определении количества влаги, попадающей на единицу поверхности водосбора, а также ее доли, проникающей вглубь почвы. Здесь мы придерживаемся в основном существующих подходов и методик [6 ... 8]. Учитываются осадки, испарение, снеготаяние и инфильтрация. Первые две величины, а также запас воды в снеге и среднесуточные температуры принимаются по данным метеостанций, расположенных на соответствующих территориях, либо по долгосрочному прогнозу гидрометеослужбы. Снеготаяние принимается пропорциональным среднесуточным положительным температурам воздуха, причем коэффициент пропорциональности для поля и леса отличается

примерно в два раза [8]. Коэффициенты лесистости территории определяются по гидрологическим ежегодникам и по электронной топографической карте. Инфильтрация при весеннем половодье обычно незначительна, так как грунт в подповерхностном слое является промерзшим. Процесс промерзания и оттаивания грунта не рассматривается. Для дождевых паводков инфильтрация сильно зависит от степени водонасыщенности грунта, которая приблизительно может определяться по отношению предпаводочного расхода в реке к минимальному меженному расходу. Для высоких дождевых паводков характерна высокая водонасыщенность грунта и, как следствие этого, незначительная инфильтрация. При большой инфильтрации точность расчетов сильно снижается из-за плохой изученности фильтрационных свойств грунтов и водоносных слоев на всей площади водосбора. Именно поэтому мы говорим о модели паводкового, а не круглогодичного стока, причем с ростом интенсивности половодья точность расчетов увеличивается, ибо уменьшается влияние второстепенных и малоизученных факторов.

Вторая часть расчета заключается в моделировании склонового стока. Поверхность водосбора реки представляется в виде так называемой «раскрытой книги»: весь водосбор делится на непересекающиеся между собой участки в форме двух прямоугольных наклонных плоскостей, примыкающих к соответствующему участку русла по правому и левому берегу. Осредненные уклоны и коэффициенты шероховатости каждого участка поверхности водосбора берутся по картографическим данным и гидрологическим ежегодникам. Масштаб пространственного осреднения (т.е. размеры участков) должен быть таким, чтобы длина участков вдоль русла существенно превосходила их ширину в перпендикулярном руслу направлении. С другой стороны, протяженность участков должна быть ограничена сверху, чтобы в пределах одного участка происходило не очень сильное изменение осредненных характеристик водосбора, параметров русла и климатических условий. На каждом из участков водосбора склоновый сток описывается одномерным (в поперечном к руслу направлении) уравнением диффузионной волны, фильтрационный сток — одномерным уравнением продольной фильтрации. В отличие от применяемых в расчетах склонового стока уравнений кинематической волны, часто приводящих к образованию разрывных решений (гидравлических прыжков), диффузионная модель лишена подобных недостатков. Для численного решения уравнений склонового стока построен новый оригинальный алгоритм (отличающийся от [9]), теорети-

чески гарантирующий невозможность появления в процессе счета отрицательных глубин потока в процессе осушения склона при любых его уклонах. В результате решения автоматически получают параметры склоновой волны: переменная по длине склона толщина слоя, время добегающего до русла, расход воды в слое. Параллельно решается и уравнение продольной фильтрации, причем инфильтрационный расход вычисляется в зависимости от переменной во времени водонасыщенности грунта. Суммарный поверхностный и фильтрационный сток дают суммарный расход, поступающий к руслу на соответствующем участке (он считается равномерно распределенным по длине участка).

Третья часть расчета состоит в моделировании течения в руслах и на пойме. Для каждого участка русла (на которые оно было разбито при формировании модели водосбора) задается расход воды во входном створе и линейно распределенная по длине русла боковая приточность. Обе величины являются переменными во времени и получаются из расчетов течения на вышележащем участке и склонового стока соответственно. Течения в русле и на пойме описываются двумя уравнениями диффузионной волны с различными параметрами (ширина, глубина, уклон, коэффициент шероховатости), взаимодействие руслового и пойменного потоков описывается специально разработанной моделью перетекания воды, численная реализация которой обеспечивает устойчивый счет при любых параметрах течения. Результатами расчета для каждого участка являются гидрографы расходов и глубин на нижней (выходной) границе участка, которые используются в качестве граничных условий при расчете основной русловой сети.

3. Применение электронных карт

Применение электронных карт совместно с использованием представленных алгоритмов позволяют формализовать процесс подготовки исходных данных и улучшить наглядность представления результатов. Процедура подготовки данных, проведения расчетов и представления результатов с использованием электронных карт состоит в следующем:

на электронной карте заданного масштаба выделяется расчетная область, ограниченная горизонталями земной поверхности, априори не затопляемыми прорывным паводком;

на карте выделяется основное русло, притоки и задаются их характеристики (поперечники, коэффициенты шероховатости);

в расчетной области автоматически строится либо четырехугольная, либо треугольная, либо смешанная сетка;

производится автоматическая интерполяция рельефа с горизонталями электронной карты в узлы расчетной сетки;

на карте выделяются области повышенной шероховатости поймы (лесные массивы, плотная застройка) и производится пересчет коэффициентов шероховатости в узлы сетки;

задаются начальные и граничные условия задачи (уровень верхнего бьефа водохранилища, расходы основного русла и притоков и т.п.);

если исследуется распространение волны прорыва, то задается сценарий разрушения плотины (мгновенное, по блокам, или постепенное увеличение прорана);

если исследуется распространение паводка, вызванного неблагоприятными метеоусловиями, то задаются условия, оговоренные в п.2 настоящей статьи;

производится расчет паводка на основе численного решения нестационарных уравнений Сен-Венана, причем в процессе счета в разработанной графической среде можно наблюдать за динамикой распространения паводка (графики изменения параметров в заданных точках и на линиях, фрагменты плана течения);

кроме вышеперечисленных результатов, по окончании счета на экран монитора или принтер выводятся максимальные отметки затопления в горизонталях, максимальные глубины затопления в изобатах либо в цветовой заливке, максимальные скорости в изотахах либо в виде векторного поля, изохроны добегания фронта и гребня волны, а также время затопления;

при наличии в слоях электронной карты характеристик населенных пунктов (количества жителей, строений, их этажности, промышленных объектов) производится оценка возможного ущерба, наносимого разрушением плотины.

4. Программное обеспечение

Для определения катастрофических затоплений при прохождении паводков целесообразно использовать следующие сертифицированные в России программы:

FLOOD — предназначена для расчёта распространения паводка в разветвленной системе русел при наличии поймы с учетом дорожных, гидротехнических и других сооружений (имеется свидетельство об официальной регистрации Российского Агентства по патентам и товарным знакам (№ 2002610941));

BOR — предназначена для расчёта волны прорыва, возникающей при разрушении плотин, и ледовых заторов (свидетельство № 2001610638);

RIVER — предназначена для расчётов развития паводков в системе русл с учетом дождевого стока и снеготаяния (свидетельство № 2002610938);

GIVER — предназначена для визуализации расчётов на гибридных сетках с применением электронных топографических карт (свидетельство № 20026109400).

5. Примеры расчетов

Адаптация компьютерной модели на примере бассейна р. Москвы

После завершения строительства четырех водохранилищ в верховьях р. Москвы и на ее притоках — Можайского, Истринского, Рузского и Озернинского — вероятность наводнений в пределах г. Москвы снизилась. Однако в очень многоводные годы, даже при незначительном превышении отметок нормального подпорного уровня (НПУ) и не снижающемся притоке к водохранилищам, для предотвращения угрозы их переполнения, перелива воды через плотины и т.д. в соответствии с правилами эксплуатации затворы водосбросов должны быть полностью открыты. При этом становится вполне реальной опасность выхода р. Москвы из берегов как на подходе, так и в черте города.

На рис.1 дано сопоставление фактического (черная линия) и рассчитанного двумя способами гидрографа расходов в створе Петрово-Дальнее для двухпикового половодья 2001 года, характеризующегося малыми сбросными расходами (боковой приток являлся определяющим при формировании паводковой волны). Аналогичные сопоставления были выполнены и для других створов (Звенигород, Рублево, Павловская Слобода), а также для половодий других лет (1994, 1998, 1999). В большинстве случаев фактическая кривая в основном расположена между двумя расчетными или близко к ним, что позволяет достаточно достоверно осуществлять краткосрочный гидрологический прогноз.

Исследования пропуска паводка в долине р. Туры в районе г. Тюмень

В задачу исследований входил анализ прохождения высоких паводков на р. Туры в районе г. Тюмень с целью получения данных о характеристиках потока, уровнях воды и границах затопления поймы в рассматриваемом районе в естественных условиях и с учетом проектируемого водоотводного канала. Моделировалась гидрологическая обстановка на участке р. Туры протяженностью около 13 км в пределах г. Тюмень, включая пойму. Этот участок характеризуется наличием двух крутых излучин, берегозащитными дамбами обвалования, тремя мостовыми переходами и проектируемым во-

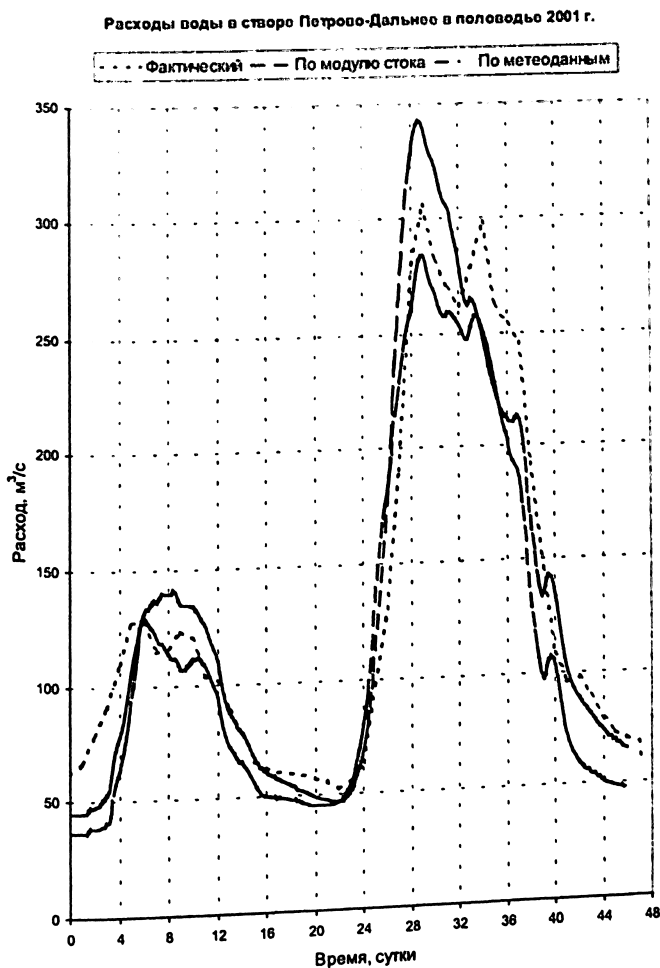


Рис. 1. Рассчитанные и фактические гидрографы расходов в створе Петрово-Дальнее в половодье 2001 г.

доотводным каналом, в силу чего правильная оценка гидрологической ситуации при помощи стандартных методик расчета весьма затруднительна.

На рис.2 показана сетка, используемая для расчетов, а также результаты расчетов поля скоростей для естественных условий (отсутствие канала) и для проектных (с водоотводным каналом). Как видно из этих рисунков, предложенная модель позволяет проводить расчеты для сложных условий, когда пойму пересекают многочисленные сооружения. Для существующих ситуационных условий результаты расчетов на ЭВМ хорошо согласуются

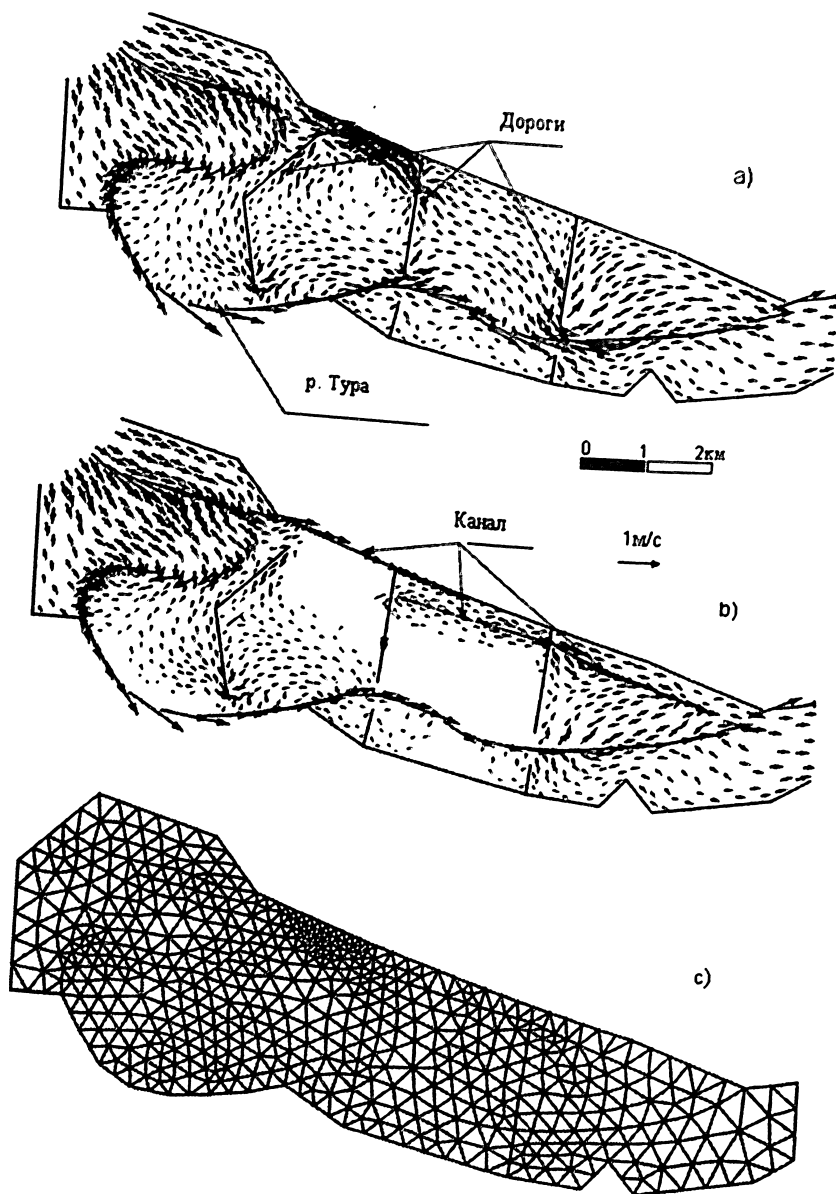


Рис. 2. Результаты расчетов пропуска паводков на р. Тура
а — течение в естественных условиях;
б — течение в проектных условиях; с — расчетная сетка.

с имеющимися натурными данными. При расходах обеспеченностью 1% и 5% на входной границе, которые составляют соответственно 3580 м³/с и 2160 м³/с, и уровнях на водпосту на нижней границе соответственно 57,2 м и 56,5 м уровни на водпосту на верхней границе по расчету получились равными соответственно 57,91 м и 57,01 м. По натурным данным, эти уровни составили соответственно 57,92 м и 57,02 м.

*Моделирование паводка в районе Бованенковского
газо-конденсатного месторождения на полуострове Ямал*

Авторы в течение нескольких лет исследовали прохождение паводков в бассейне рек Морда-Яха, Се-Яха, Надуй-Яха на полуострове Ямал, где имеются крупные месторождения газоконденсата. Характерной особенностью этого бассейна является малая ширина русл рек и большая ширина затопляемых пойм, которые на два порядка больше ширины русл. Обустройство любого месторождения связано с наличием большого количества автодорог и мостовых сооружений, которые сильно сжимают поток. В качестве примера на рис. 3 приводится поле скоростей в паводок 10% обеспеченности в районе Бованенковского ГКМ, которое расположено в междуречье рек Се-Яха и Морды-Яха.

Развитие паводка при разрушении земляной плотины

В качестве примера расчета с применением электронных карт приведем результаты моделирования прорывного паводка в долине небольшой реки. Расчетная область (рис. на цветной вкладке) включала водохранилище и участок долины от плотины до устья протяженностью по руслу 62 км. Высота плотины около 18 м, долина на всем протяжении пересечена большим числом мостовых переходов с высотой насыпей подхода до 10 – 15 м.

На расстоянии 17 км от плотины находится город, являющийся районным центром. На рис. на цветной вкладке приведен фрагмент рассчитываемой области с нанесенной треугольной расчетной сеткой, покрывающей, в том числе, и городские районы. Полное число ячеек сетки во всей области около 60000, сетка сгущается к отверстиям мостов и особенностям рельефа местности. На рис. на цветной вкладке изображены векторное поле скоростей течения и горизонталы водной поверхности в районе мостового перехода через 2 ч после начала паводка. Просматриваются раздвоенный фронт волны прорыва, уходящей вверх по долине притока, и водоворотная зона с низовой части мостового перехода. Виден значительный перепад уровней вод-

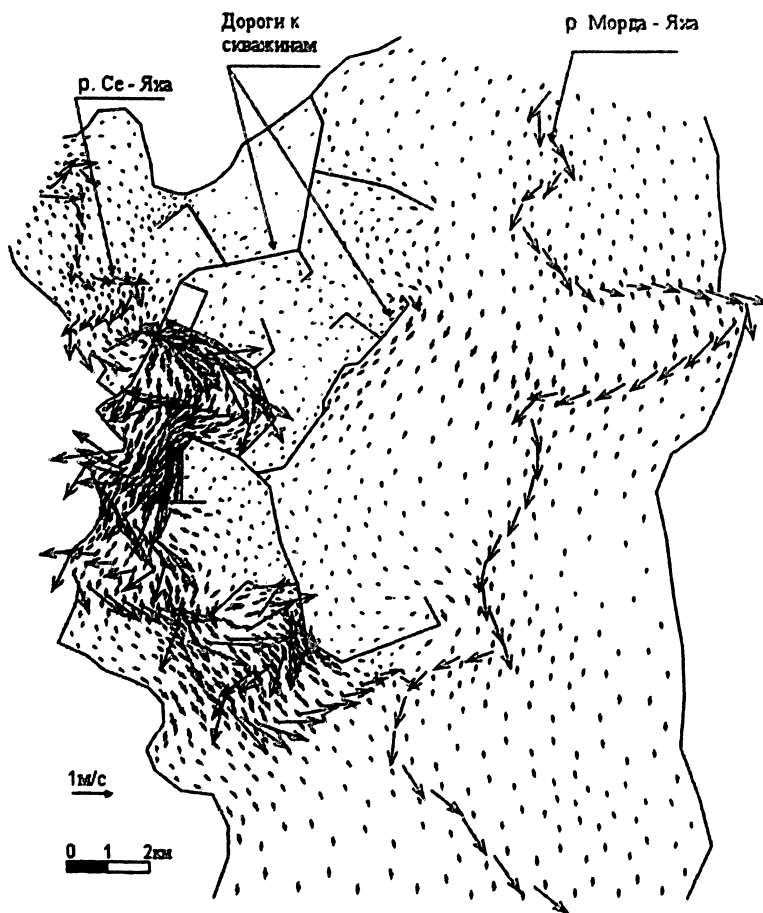


Рис.3. Поле скоростей во время прохождения паводка 10% обеспеченности в районе Бованенковского месторождения

ной поверхности и большие скорости течения (до 8 м/с) в отверстиях моста. На рис. на цветной вкладке приведены максимальные значения скоростей и уровней водной поверхности в районе города за все время паводка. Видно, что перед мостом максимальные уровни на 3 м выше, чем на момент времени 2 ч, что свидетельствует о важности правильного учета в расчетах мостовых переходов. Обращает на себя внимание и тот факт, что максимальное падение уровней водной поверхности (10 м или больше половины высоты плотины) наблюдается в не-

посредственной близости от разрушившегося напорного фронта. Визуализация производилась средствами картографического редактора «Нева», дополненного рядом специально разработанных программ. Приведенный пример демонстрирует достоинства методики расчета паводков, основанной на сочетании применения электронных топографических карт и математического моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cunge G. A., Holly F. M., and Verway A. Practical Aspects of Computational River Hydraulics. Pitman Publishing LTD, London, 1980.
2. Шеренков И.А., Каневский З.И., Ляшенко А.Л. Динамическое взаимодействие руслового и пойменного потоков. //Труды 5 Всесоюзного Гидрологического Съезда. т.10. кн.2. Л.: Гидрометеиздат. 1988.
3. Беликов В.В., Милитеев А.Н. Двухслойная математическая модель катастрофических паводков. //В сб. «Вычислительные технологии». т.1. №3. Новосибирск. 1992.
4. Милитеев А.Н., Сладкевич М.С. Разностная схема для решения плановых уравнений мелкой воды. //Деп. в ВИНТИ. Депонированные рукописи. Вып. 3. 1983.
5. Беликов В.В., Семенов А.Ю. Построение численных методов распада разрыва для решения уравнений теории мелкой воды. //«Вычислительная гидродинамика природных течений». М.: Наука. Физматлит. Тр. ИОФАН. Т.53. 1997.
6. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. М.:Наука. 1983..
7. Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Капотова Н.И., Ливанова Н.А. Опыт разработки и применения математических моделей бассейнов малых рек. Л.:Гидрометеиздат. 1985.
8. Руководство по гидрологическим прогнозам. Выпуск 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л., Гидрометеиздат, 1989, 246с.
9. Маханов С.С., Семенов А.Ю. Устойчивый численный алгоритм для расчетов течения жидкости в открытом русле. //Ж. Вычисл. Матем. и Матем. Физики. т.34. №1.1994.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПАВОДКА НА ГТС С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА *НАНСОСК* НА РЕГУЛЯРНОЙ СЕТКЕ

*Прокофьев В.А., кандидат техн. наук
(ОАО «ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева»)*

Существенную роль в обеспечении безопасной эксплуатации существующих и проектируемых гидротехнических сооружений (ГТС) играет прогнозирование аварийных ситуаций в случае прорыва напорного фронта, в частности точность расчёта параметров волны прорыва и зоны возможного затопления. Наиболее вероятно возникновение таких ситуаций при пропуске через ГТС максимальных расчётных паводков, а также при возведении заградительных дамб уже во время прохождения паводка. На сегодняшний день для такого прогноза существует большое количество программных комплексов (ПК), основанных как на одномерной, так и на двумерной (2-D) постановке задачи. В данной работе рассматривается разработанный в ОАО «ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева» 2-D программный комплекс, базирующийся на эффективной и простой в реализации явной численной схеме *Нансоск*. Данная схема в последние годы широко применяется за рубежом [1, 2, 3] совместно с различной формой записи приближённых решений задачи Римана (Riemann). В России этот алгоритм (как и приближённые решения задачи Римана) используется для гидравлических задач пока сравнительно редко [4, 5, 6].

Явная схема *Нансоск* может применяться на нерегулярных расчётных сетках, причём сетка может быть криволинейной, четырёхугольной, треугольной, смешанной [1, 4]. Однако в большинстве практических случаев вполне достаточным и к тому же более простым в реализации и в использовании является вариант алгоритма на регулярной криволинейной сетке четырёхугольных контрольных объёмов (КО). Именно такой вариант метода представлен в данной работе, причём его возможности и точность расширены за счёт автоматического отключения КО вне расчётной области (например, на незатопляемых островах и берегах), а также за счёт применения усечённых границами КО. По сравнению с 2-D методами для расчёта параметров волны прорыва, построенных на нерегулярных сетках, представленная модификация метода *Нансоск* заметно упрощает подготовку исходных данных для расчёта: процедуру разбиения расчётной области на контрольные объёмы и постановку граничных условий.

Основные уравнения. Дивергентная форма 2-D системы уравнений мелкой воды (УМВ) в декартовой системе координат (x, y) имеет вид [7] (вязкие слагаемые и источники массы для сокращения записи опущены):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S, \quad (1)$$

где векторы переменных, потоков и источников записываются в виде:

$$Q = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}; \quad E = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + gh^2/2 \\ huv \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hu^2 + gh^2/2 \end{bmatrix}; \quad S = \begin{bmatrix} 0 \\ ghS_{0x} - S_{fx} + hfv + \tau_x/\rho \\ ghS_{0y} - S_{fy} - hfu + \tau_y/\rho \end{bmatrix}.$$

Здесь: g — ускорение свободного падения; h — глубина, u и v — компоненты вектора U осреднённой по глубине скорости в декартовой системе координат; S_{0x} , S_{0y} — компоненты уклона дна; $f = 1,458 \times 10^{-4} \sin(\varphi)$ — параметр Кориолиса, φ — географическая широта; τ_x , τ_y — составляющие касательного напряжения ветра на свободной поверхности; ρ — плотность жидкости. Компоненты вектора силы трения на дне можно определить по формуле Маннинга (n — коэффициент трения в ней):

$$S_{fx} = C_f(h)hu|U|; \quad S_{fy} = C_f(h)hv|U|; \quad |U| = \sqrt{u^2 + v^2}; \quad C_f(h) = \frac{gn^2}{h^{4/3}}. \quad (2)$$

Если раскрыть в (1) производные по времени и координатам, а затем использовать уравнение сохранения массы воды, можно перейти к недивергентной форме записи УМВ [8].

Численный алгоритм: Predictor. Алгоритм Hancock представляет собой явный двухшаговый (Predictor-Corrector) метод, являющийся разновидностью метода Рунге-Кутты по времени для системы гиперболических уравнений [4]. При использовании технологии MUSCL-реконструкции [1, 3, 8] для физических переменных он обеспечивает 2-й и выше порядок точности по пространству и 2-й порядок по времени.

На первом шаге этого метода (Predictor) может быть использована «примитивная» (недивергентная) форма записи УМВ [8]. Для её применения необходимо определить компоненты градиентов u , v , h , Z (Z — отметка дна) в декартовых координатах по известным значениям этих переменных во всех узлах расчётной сетки на предыдущем слое по времени (этот слой помечен индексом «old»). Приращения декартовых координат расчётных узлов

вдоль линий регулярной сетки i, j определяются выражениями:

$$\Delta_i x = \frac{x_{i+1,j} - x_{i-1,j}}{2}; \quad \Delta_j x = \frac{x_{i,j+1} - x_{i,j-1}}{2}; \quad \Delta_i y = \frac{y_{i+1,j} - y_{i-1,j}}{2}; \quad \Delta_j y = \frac{y_{i,j+1} - y_{i,j-1}}{2}.$$

Приращения физических переменных u, v, h, Z рассчитываются с использованием ограничителей, подавляющих нефизичные пульсации решения. В частности, для u :

$$\Delta_i u = \text{Limiter}(u_{i+1,j}^{\text{old}} - u_{i,j}^{\text{old}}, u_{i,j}^{\text{old}} - u_{i-1,j}^{\text{old}}); \quad \Delta_j u = \text{Limiter}(u_{i,j+1}^{\text{old}} - u_{i,j}^{\text{old}}, u_{i,j}^{\text{old}} - u_{i,j-1}^{\text{old}}). \quad (3)$$

Здесь в качестве ограничителя **Limiter** могут использоваться функции [3,4]:

$$\text{MinMod}(a,b) = \begin{cases} a, & |a| < |b| \\ b, & |b| < |a| \end{cases}; \quad \text{VanAlbada}(a,b) = \frac{ab^2 + ba^2}{a^2 + b^2}; \quad \text{VanLeer}(a,b) = \frac{a|b| + b|a|}{|a| + |b|}$$

$$\text{SuperBee}(a,b) = \text{sign}(a) \max[\min(|a|, \varphi|b|), \min(\varphi|a|, |b|)]; \quad 1 \leq \varphi \leq 2,$$

при $ab \leq 0$ все ограничители следует приравнять нулю. Приращения физических переменных вдоль линий сетки i, j связаны с их производными по x, y алгебраическими соотношениями:

$$\Delta_i u = \frac{\partial u}{\partial x} \Delta_i x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta_i y; \quad \Delta_j u = \frac{\partial u}{\partial x} \Delta_j x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta_j y. \quad (4)$$

Решение этой системы уравнений 2×2 даёт аппроксимации для производных $du/dx, du/dy$ на временном слое old. Производные v, h, Z вычисляются аналогичным образом. Шаг Predictor представляет собой переход на промежуточный временной слой (далее он помечается индексом «pre»). Используя для каждого сеточного узла i, j (номер узла опускаем) недивергентную форму записи УМВ, получим:

$$\begin{aligned} u^{\text{pre}} &= u^{\text{old}} - \frac{\Delta t}{2} \left(g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial Z}{\partial x} + u^{\text{old}} \frac{\partial u}{\partial x} + v^{\text{old}} \frac{\partial u}{\partial y} + v^{\text{old}} + \frac{\tau_x}{\rho h^{\text{old}}} - u^{\text{pre}} C_f(h^{\text{old}}) |U^{\text{old}}| \right); \\ v^{\text{pre}} &= v^{\text{old}} - \frac{\Delta t}{2} \left(g \frac{\partial h}{\partial y} + g \frac{\partial Z}{\partial y} + u^{\text{old}} \frac{\partial v}{\partial x} + v^{\text{old}} \frac{\partial v}{\partial y} - u^{\text{old}} + \frac{\tau_y}{\rho h^{\text{old}}} - v^{\text{pre}} C_f(h^{\text{old}}) |U^{\text{old}}| \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Отметим, что компоненты вектора силы трения (последние слагаемые в (5)) записаны в линеаризованном виде. Такая линеаризация по сравнению с расчётом вектора силы трения только по слою времени old повышает устойчивость алгоритма при больших n . Из несвязанных друг с другом линейных уравнений (5) в каждом

узле i, j определяются u^{pre}, v^{pre} , что проще решения квадратного уравнения для задач с большим трением, как это сделано в [8,9].

Чтобы записать уравнение баланса массы воды на шаге Predictor, используем процедуру MUSCL-реконструкции компонент скорости и глубин [7,8] из сеточного узла i, j вдоль линий сетки. Введём обозначения для удельных расходов: $Q_x = uh$; $Q_y = vh$ и для их приращений (удвоенных) вдоль линий расчётной сетки:

$$\begin{aligned} \Delta_i Q_x &= (u^{old} + \Delta_i u)(h^{old} + \Delta_i h) - (u^{old} - \Delta_i u)(h^{old} - \Delta_i h); \\ \Delta_j Q_x &= (u^{old} + \Delta_j u)(h^{old} + \Delta_j h) - (u^{old} - \Delta_j u)(h^{old} - \Delta_j h). \end{aligned}$$

Аналогично записываются приращения расходов $\Delta_i Q_y, \Delta_j Q_y$. Решив две линейные алгебраические системы, подобные (4), нетрудно перейти от найденных приращений расходов вдоль линий сетки к аппроксимациям их производных: $\partial Q_x / \partial x, \partial Q_y / \partial y$. С использованием этих аппроксимаций глубина в узле i, j определяется из уравнения баланса массы:

$$h^{pre} = \max \left[h_{min}, h^{old} - \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right) \right]. \quad (6)$$

Чтобы исключить появление нулевых и отрицательных глубин, здесь минимальное значение глубины ограничено параметром h_{min} [8]. Этот параметр выбирается в пределах $10^{-6} - 10^{-12}$ м, причём таким же тонким слоем воды (в рамках технологии сквозного счёта) заливаются участки суши, например острова, попавшие в расчётную область.

Поскольку компоненты скорости u^{pre}, v^{pre} вычисляются на шаге Predictor непосредственно из недивергентной записи УМВ (5), а не путём деления удельных расходов на глубину, эти компоненты даже при малых глубинах не могут быть бесконечно большими. Заметим, что использование ограничителей в формулах (3) для шага Predictor принципиально. Можно применять на этом шаге вместо упрощённой дискретной записи УМВ (недивергентной) такую же консервативную запись, как на шаге Corrector (см. ниже). Это сведёт алгоритм Napsock к обычной схеме Рунге-Кутты по времени [10]. Однако тестирование показало, что такая модификация менее эффективна.

Численный алгоритм: Corrector. Второй шаг (Corrector) алгоритма Napsock консервативен, причём при записи потоков для него используются значения неизвестных на полушаге по времени, полученные на шаге Predictor. Алгоритм в целом оказывается консервативным и обладающим 2-м порядком точности по времени.

Четырёхугольный контрольный объём для сеточного узла i, j показан на рис. 1: n^k — векторы единичных нормалей к граням, t^k — тангенциальные векторы на гранях, A^k — длины граней ($k=1,2,3,4$), Ω — площадь КО. Решение на новом слое по времени (индекс «new») определяется суммой потоков по граням КО и источниками S в (1):

$$\begin{aligned} Q_x^{\text{new}} &= Q_x^{\text{old}} - \Delta t \left(\frac{1}{\Omega} \sum_{k=1}^4 A^k \left[n_x^k (F_n^k + R^k) - n_y^k F_t^k \right] + \int Q_y^{\text{pre}} + \frac{\tau_x}{\rho} - S_{fx} \right); \\ Q_y^{\text{new}} &= Q_y^{\text{old}} - \Delta t \left(\frac{1}{\Omega} \sum_{k=1}^4 A^k \left[n_y^k (F_n^k + R^k) + n_x^k F_t^k \right] - \int Q_x^{\text{pre}} + \frac{\tau_y}{\rho} - S_{fy} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где компоненты силы трения на дне записываются в линеаризованном виде:

$$\begin{aligned} S_{fx} &= C_f \left(h^{\text{pre}} \left(Q_x^{\text{new}} |u^{\text{old}}| + Q_x^{\text{old}} \left(|U^{\text{pre}}| - |u^{\text{pre}}| \right) \right) \right); \\ S_{fy} &= C_f \left(h^{\text{pre}} \left(Q_y^{\text{new}} |v^{\text{old}}| + Q_y^{\text{old}} \left(|U^{\text{pre}}| - |v^{\text{pre}}| \right) \right) \right). \end{aligned}$$

Такая запись сил трения не нарушает 2-го порядка схемы по времени и повышает её устойчивость при больших n . Если учёт трения в (7) меняет знак компоненты расхода, эту компоненту следует занулить [9]. В (7) введены следующие обозначения: F_n , F_t — нормальная к грани КО и тангенциальная составляющие потока импульса; R — горизонтальная составляющая силы реакции дна, обусловленная его уклоном.

Глубины на новом слое по времени рассчитываются по условию баланса потоков массы через грани КО. Причём в данной работе эти потоки определяются двумя способами: расчётом диссипативных добавок к ним (см. ниже) по глубинам h (величины помечены символом \sim) и по отметкам свободной поверхности воды H , так что в каждом узле i, j рассчитываются две глубины:

$$\tilde{h}^{\text{new}} = h^{\text{old}} - \frac{\Delta t}{\Omega} \sum_{k=1}^4 A^k \tilde{M}^k \quad ; \quad h^{\text{new}} = h^{\text{old}} - \frac{\Delta t}{\Omega} \sum_{k=1}^4 A^k M^k. \quad (8)$$

Здесь M и \tilde{M} — потоки массы через грани КО. Глубины \tilde{h}^{new} используются только для пересчёта компонент скорости:

$$u^{\text{new}} = Q_x^{\text{new}} / \tilde{h}^{\text{new}} \quad ; \quad v^{\text{new}} = Q_y^{\text{new}} / \tilde{h}^{\text{new}},$$

что обеспечивает ограниченность компонент скорости в задачах

с осушением дна и обтеканием препятствий. По глубинам h^{new} рассчитываются новые отметки свободной поверхности: $H^{\text{new}} = Z + h^{\text{new}}$ для визуализации результатов, и эти же глубины используются на следующем шаге по времени для расчёта силы давления. Более подробное описание представленной здесь технологии учёта разрывов дна («ступенек») и её тестирования на аналитических решениях (оно проводилось) выходит за рамки настоящей работы и, видимо, заслуживает отдельной публикации. Отметим лишь, что данная технология позволяет с высокой точностью воспроизводить результаты экспериментов, в которых волна прорыва взаимодействует с препятствиями [5,6], причём рассчитанные скорости потока и связанные с ними шаги по времени изменяются практически монотонно (без скачков и провалов во времени). При этом удаётся получить статическое решение задачи при любом профиле дна.

Расчёт потоков. Перейдём к расчёту потоков массы M и \tilde{M} , потоков импульса F_n , F_t и вклада силы реакции дна R для балансовых соотношений (7), (8) шага Corrector. Рассмотрим для примера грань «1» КО, показанного на рис. 1. Значения физических параметров потока на внутренней поверхности грани (значок «L») определяются линейной MUSCL-реконструкцией (экстраполяцией) из узла i, j в сторону грани:

$$u_L = u_{i,j} + \Delta_i u / 2; \quad v_L = v_{i,j} + \Delta_i v / 2; \quad h_L = h_{i,j} + \Delta_i h / 2; \quad Z_L = Z_{i,j} + \Delta_i Z / 2,$$

а их значения на наружной поверхности грани (значок «R») определяются линейной MUSCL-реконструкцией из узла, расположенного «через грань» (для грани «1» - это узел $i+1, j$):

$$u_R = u_{i+1,j} - \Delta_i^+ u / 2; \quad v_R = v_{i+1,j} - \Delta_i^+ v / 2; \quad h_R = h_{i+1,j} - \Delta_i^+ h / 2; \quad Z_R = Z_{i+1,j} - \Delta_i^+ Z / 2.$$

Здесь ограниченные градиенты вычисляются в узле $i+1, j$, например:

$$\Delta_i^+ u = \text{Limiter}(u_{i+1,j}^{\text{old}} - u_{i,j}^{\text{old}}, u_{i+2,j}^{\text{old}} - u_{i+1,j}^{\text{old}}).$$

Компоненты скорости в декартовых координатах на каждой поверхности грани с помощью очевидных соотношений пересчитываются в нормальные к грани и тангенциальные составляющие вектора скорости:

$$u_L^n = n_x^1 u_L + n_y^1 v_L; \quad u_L^t = n_x^1 v_L - n_y^1 u_L; \quad u_R^n = n_x^1 u_R + n_y^1 v_R; \quad u_R^t = n_x^1 v_R - n_y^1 u_R.$$

Сразу отключим потоки, выходящие из «сухих» КО: при $h_R \leq h_{\min}$

положим $u_L^n = \max(0, u_L^n)$, а при $h_L \leq h_{\min}$ положим $u_R^n = \min(0, u_R^n)$.

Перед тем как выписывать потоки импульса для грани КО, необходимо сделать ряд замечаний относительно расчёта силы дав-

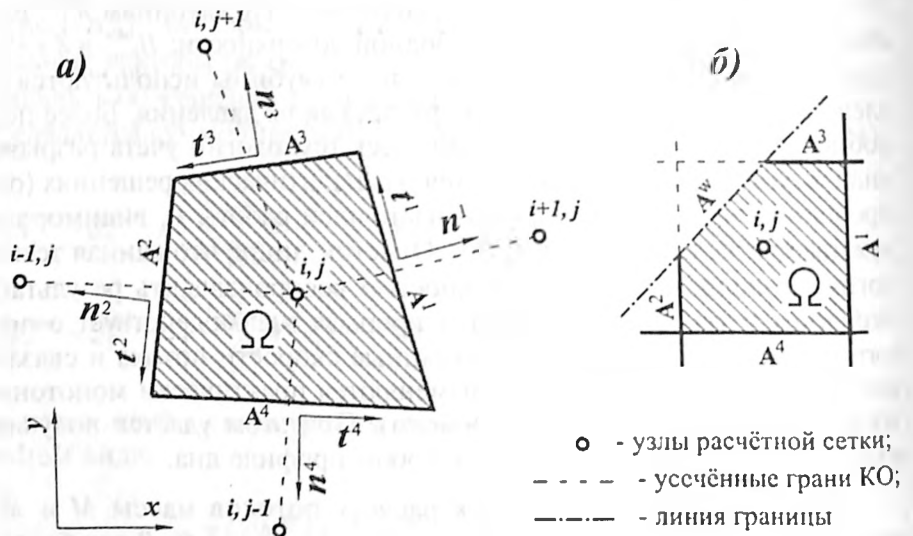


Рис.1. Контрольные объёмы на регулярной сетке:

- а — расположение узлов, нормалей и касательных к граням;
- б — «усечённый» контрольный объём вблизи границы

ления и реакции дна. Дискретная запись этих сил должна обеспечивать баланс сил в статике, в том числе, если КО ограничен вертикальной «ступенькой» на дне (на рис.2 участки дна и свободной поверхности показаны горизонтальными за счёт искажения масштабов, на самом деле они могут иметь уклон). В то же время из физических соображений ясно, что сухие участки вертикальной стенки (D_L на рис. 2 а) не должны давать вклада в баланс сил, действующих на КО. И, наконец, третье условие — существование предельного перехода. Пусть справа от отмеченного символами «КО» на рис. 2 а контрольного объёма сначала «сухо» ($h_R = h_{\min}$), а затем начинает появляться слой воды конечной толщины. Тогда дискретная запись силы давления на правую (на рис. 2) грань КО не должна давать скачка этой силы во времени. В литературе существуют различные рекомендации по записи силы давления и реакции дна при наличии разрывов его профиля [4, 10], в том числе ряд авторов для получения статического решения над искривлённым дном вообще предлагает выносить слагаемое $g \nabla H$ из решения задачи Римана [10], т.е. при расчёте потоков. Как показало тестирование, такой подход не обеспечивает точного решения даже простых задач, например даёт осцилляции на фронте 1-D волны прорыва (аналитическое решение Стокера)

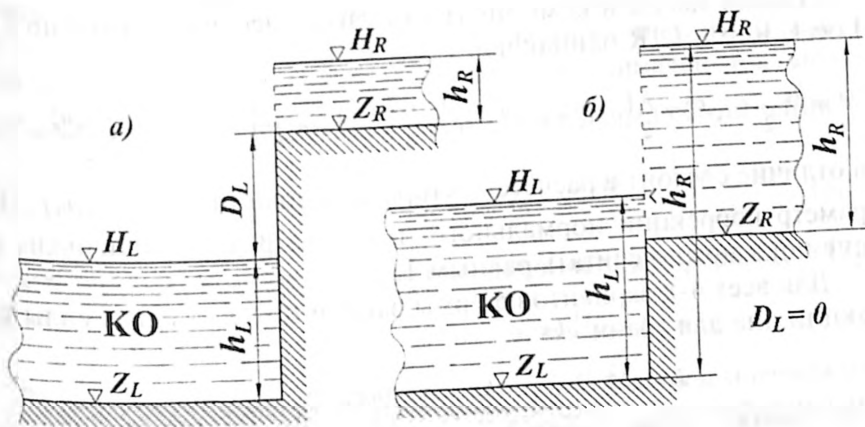


Рис.2. Условные обозначения для расчёта потоков через грань КО, примыкающего к «ступеньке» на дне:
 а — есть «сухая» грань D_L ; б — «ступенька» полностью под водой

при соотношении начальных глубин 10:1. Простая замена в одной из форм записи решений задачи Римана глубин на отметки свободной поверхности тоже, очевидно, не обеспечит выполнения трёх сформулированных условий. Удовлетворить им можно, если при расчёте вклада в поток F_n силы давления использовать в известных приближённых решениях задачи Римана (их можно найти, например, в [1, 4, 11]) вместо глубины на наружной (R) поверхности грани её модифицированное значение (оно помечено \wedge) — с удалением «сухого» участка вертикальной стенки:

$$\tilde{h}_r = \max(0, H_r - D_L - Z_L), \quad (9)$$

где $D_L = \max(0, \bar{Z}_R - H_L)$; $\bar{Z}_R = Z_R + h_{\min}$; $D_R = \max(0, \bar{Z}_L - H_R)$; $\bar{Z}_L = Z_L + h_{\min}$

При вычислении потоков через грань КО в настоящей работе применяется приближённое решение задачи Римана в одном из 4-х вариантов: в форме Лакса-Фридрикса (LF-Local), Рое (Roe), Куран-Итаксона-Риса (CIR), Хартена-Лакса-ван Лира (HLLE). Ниже формулы расчёта потоков для всех 4-х вариантов приведены в развёрнутом виде, что удобнее для их программной реализации по сравнению с компактной матрично-векторной записью, приведённой в [4, 5, 7]. Введём обозначения для расходов и волновых скоростей:

$$q_L = h_L u_L^n ; \quad q_R = h_R u_R^n ; \quad \varphi_L = \sqrt{g h_L} ; \quad \varphi_R = \sqrt{g h_R} ;$$

$$q_{\Sigma} = q_L + q_R ; \quad \Delta q^n = q_R - q_L ; \quad \Delta q^t = h_R u_R^t - h_L u_L^t .$$

Потоки массы и компонент импульса рассчитываются по LF-Local, Roe и CIR одинаково:

$$M = \frac{q_x - \varepsilon_H}{2}; F_n = \frac{\beta}{2} (q_L u_L^n + q_R u_R^n - \varepsilon_n) + \frac{g}{4} [(h_L)^2 + (\bar{h}_R)^2]; F_t = \frac{q_L u_L^t + q_R u_R^t - \varepsilon_t}{2},$$

а отличие состоит в расчёте вектора диссипации $\varepsilon = \langle \varepsilon_H, \varepsilon_n, \varepsilon_t \rangle$. Параметр коррекции нормального импульса β для «ступеньки» на дне пока можно считать равным 1.

Для всех 4-х вариантов формы записи потоков вклад силы реакции дна для грани «k»:

$$R = gh_{CL}^2/2; \quad h_{CL} = \max(h_{\min}, Z_c + h_c - Z_L),$$

где отметка Z_c дна и глубина h_c берутся в центре КО (для R^k и Z_L^k верхний индекс здесь тоже не пишем). При такой записи силы реакции дна R и вклада силы давления в F_n их баланс в статике обеспечивается при любой форме дна, в том числе на криволинейной сетке [4].

Для расчёта диссипативных слагаемых в потоках массы введём обозначения для перепадов отметок и глубин свободной поверхности между двумя поверхностями грани КО:

$$\Delta H = \max(H_R, \bar{Z}_L) - \max(H_L, \bar{Z}_R); \quad \Delta h = h_R - h_L. \quad (10)$$

А) Для формы записи потоков **LF-Local** (эта форма наиболее простая, но уступает в точности остальным) компоненты вектора диссипации:

$$\varepsilon_H = S_{\max} \Delta H; \quad \varepsilon_n = S_{\max} \Delta q^n; \quad \varepsilon_t = S_{\max} \Delta q^t, \quad (11)$$

где максимальное волновое число определяется локально (т.е. для данной грани КО):

$$S_{\max} = \max(|u_L^n - \phi_L|, |u_L^n + \phi_L|, |u_R^n - \phi_R|, |u_R^n + \phi_R|). \quad (12)$$

Б) Для расчёта диссипативных слагаемых в записи потоков по Roe, введём обозначения для вспомогательных параметров, основанные на известном осреднении Roe:

$$\phi_s = \sqrt{g \frac{h_L + h_R}{2}}; \quad u_s^n = \frac{u_L^n \phi_L + u_R^n \phi_R}{\phi_L + \phi_R}; \quad u_s^t = \frac{u_L^t \phi_L + u_R^t \phi_R}{\phi_L + \phi_R}; \quad \lambda^- = u_s^n - \phi_s; \quad \lambda^+ = u_s^n + \phi_s.$$

Модули собственных чисел λ^-, λ^+ должны вычисляться с учётом энтропийной коррекции, например в виде [9,11]

$$\eta^- = \max(|\lambda^-|, |\lambda^- - u_L^R + \phi_L|, |u_R^n - \phi_R - \lambda^-|); \quad \eta^+ = \max(|\lambda^+|, |\lambda^+ - u_L^R - \phi_L|, |u_R^n + \phi_R - \lambda^+|)$$

Такая форма записи энтропийной коррекции симметрична относительно смены L-R, что важно для консервативности схемы. Для расчёта шага по времени (см. ниже) определим максимальный из модулей волновых чисел: $S_{\max} = \max(\eta^-, \eta^+)$. Введя ещё ряд обозначений:

$$L_1 = \eta^- \frac{\lambda^+ \Delta H - \Delta q^n}{2\phi_s}; \quad L_2 = |u_s^n| \left(\Delta q^t - u_s^t \Delta H \right); \quad L_3 = \eta^+ \frac{\Delta q^n - \lambda^- \Delta H}{2\phi_s}, \quad (13)$$

можем записать компоненты вектора диссипации в форме Roe [7]:

$$\varepsilon_H = L_1 + L_3; \quad \varepsilon_n = \lambda^- L_1 + \lambda^+ L_3; \quad \varepsilon_t = u_s^t (L_1 + L_3) + L_2.$$

В) Для расчёта диссипативных слагаемых в записи потоков по CIR, определим вспомогательные параметры по другим формулам:

$$\phi_s = \max(\phi_L, \phi_R); \quad u_s^n = \frac{u_L^n + u_R^n}{2}; \quad u_s = \frac{|u_L^n| + |u_R^n|}{2}; \quad (14)$$

$$\lambda^- = |u_s^n - \phi_s| - u_s; \quad \lambda^+ = |u_s^n + \phi_s| - u_s;$$

$$\Delta H^{\text{CIR}} = \frac{u_s^n \Delta H - \Delta q^n}{\phi_s}; \quad a_1 = \frac{\lambda^-}{2} (\Delta H + \Delta H^{\text{CIR}}); \quad a_2 = \frac{\lambda^+}{2} (\Delta H - \Delta H^{\text{CIR}}). \quad (15)$$

С использованием этих обозначений компоненты вектора диссипации в форме CIR [4]:

$$\varepsilon_H = u_s \Delta H + a_1 + a_2; \quad \varepsilon_n = u_s \Delta q^n + u_s^n (a_1 + a_2) - \phi_s (a_1 - a_2);$$

$$\varepsilon_t = u_s \Delta q^t + (a_1 + a_2) (u_L^t + u_R^t) / 2.$$

Максимальное волновое число S_{\max} , необходимое для вычисления шага по времени, определяется для CIR по формуле (12), как и для LF-Local. Помимо (14) возможны иные варианты осреднения для параметров ϕ_s , u_s^n , u_s . По крайней мере, с осреднением (14) запись потоков по CIR менее надёжна по сравнению с тремя остальными при расчёте обтекания препятствий.

Г) Высокую точность обеспечивает запись потоков массы и импульса в форме HLLE [1, 2, 4, 5, 6], для которой введём следующие обозначения волновых скоростей:

$$S_L = \min(0, u_L^n - \phi_L, u_s - \phi_s); \quad S_R = \max(0, u_R^n + \phi_R, u_s + \phi_s); \quad S_{\max} = \max(|S_L|, |S_R|),$$

$$\text{где: } u_s^n = \frac{u_L^n + u_R^n}{2} + \phi_L - \phi_R; \quad \phi_s = \frac{\phi_L + \phi_R}{2} + \frac{u_L^n - u_R^n}{4}.$$

Потоки массы и компонент импульса рассчитываются по LF-Local, Roe и CIR одинаково:

$$M = \frac{q_x - \varepsilon_H}{2}; F_n = \frac{\beta}{2} (q_L u_L^n + q_R u_R^n - \varepsilon_n) + \frac{g}{4} [(h_L)^2 + (\tilde{h}_R)^2]; F_t = \frac{q_L u_L^t + q_R u_R^t - \varepsilon_t}{2},$$

а отличие состоит в расчёте вектора диссипации $\varepsilon = \langle \varepsilon_H, \varepsilon_n, \varepsilon_t \rangle$. Параметр коррекции нормального импульса β для «ступеньки» на дне пока можно считать равным 1.

Для всех 4-х вариантов формы записи потоков вклад силы реакции дна для грани «k»:

$$R = gh_{cl}^2/2; \quad h_{cl} = \max(h_{min}, Z_c + h_c - Z_L),$$

где отметка Z_c дна и глубина h_c берутся в центре КО (для R^k и Z_L^k верхний индекс здесь тоже не пишем). При такой записи силы реакции дна R и вклада силы давления в F_n их баланс в статике обеспечивается при любой форме дна, в том числе на криволинейной сетке [4].

Для расчёта диссипативных слагаемых в потоках массы введём обозначения для перепадов отметок и глубин свободной поверхности между двумя поверхностями грани КО:

$$\Delta H = \max(H_R, \tilde{Z}_L) - \max(H_L, \tilde{Z}_R); \quad \Delta h = h_R - h_L. \quad (10)$$

А) Для формы записи потоков *LF-Local* (эта форма наиболее простая, но уступает в точности остальным) компоненты вектора диссипации:

$$\varepsilon_H = S_{max} \Delta H; \quad \varepsilon_n = S_{max} \Delta q^n; \quad \varepsilon_t = S_{max} \Delta q^t, \quad (11)$$

где максимальное волновое число определяется локально (т.е. для данной грани КО):

$$S_{max} = \max(|u_L^n - \phi_L|, |u_L^n + \phi_L|, |u_R^n - \phi_R|, |u_R^n + \phi_R|). \quad (12)$$

Б) Для расчёта диссипативных слагаемых в записи потоков по Roe, введём обозначения для вспомогательных параметров, основанные на известном осреднении Roe:

$$\phi_s = \sqrt{g \frac{h_L + h_R}{2}}; \quad u_s^n = \frac{u_L^n \phi_L + u_R^n \phi_R}{\phi_L + \phi_R}; \quad u_s^t = \frac{u_L^t \phi_L + u_R^t \phi_R}{\phi_L + \phi_R}; \quad \lambda^- = u_s^n - \phi_s; \quad \lambda^+ = u_s^n + \phi_s.$$

Модули собственных чисел λ^-, λ^+ должны вычисляться с учётом энтропийной коррекции, например в виде [9,11]

$$\eta^- = \max(|\lambda^-|, |\lambda^- - u_L^R + \phi_L|, |u_R^n - \phi_R - \lambda^-|); \quad \eta^+ = \max(|\lambda^+|, |\lambda^+ - u_L^R - \phi_L|, |u_R^n + \phi_R - \lambda^+|).$$

Такая форма записи энтропийной коррекции симметрична относительно смены L-R, что важно для консервативности схемы. Для расчёта шага по времени (см. ниже) определим максимальный из модулей волновых чисел: $S_{\max} = \max(\eta^-, \eta^+)$. Введя ещё ряд обозначений:

$$L_1 = \eta^- \frac{\lambda^+ \Delta H - \Delta q^n}{2\phi_s}; \quad L_2 = |u_s^n| (\Delta q^t - u_s^t \Delta H); \quad L_3 = \eta^+ \frac{\Delta q^n - \lambda^- \Delta H}{2\phi_s}, \quad (13)$$

можем записать компоненты вектора диссипации в форме Roe [7]:

$$\varepsilon_n = L_1 + L_3; \quad \varepsilon_n = \lambda^- L_1 + \lambda^+ L_3; \quad \varepsilon_t = u_s^t (L_1 + L_3) + L_2.$$

В) Для расчёта диссипативных слагаемых в записи потоков по CIR, определим вспомогательные параметры по другим формулам:

$$\phi_s = \max(\phi_L, \phi_R); \quad u_s^n = \frac{u_L^n + u_R^n}{2}; \quad u_s = \frac{|u_L^n| + |u_R^n|}{2}; \quad (14)$$

$$\lambda^- = |u_s^n - \phi_s| - u_s; \quad \lambda^+ = |u_s^n + \phi_s| - u_s;$$

$$\Delta H^{\text{CIR}} = \frac{u_s^n \Delta H - \Delta q^t}{\phi_s}; \quad a_1 = \frac{\lambda^-}{2} (\Delta H + \Delta H^{\text{CIR}}); \quad a_2 = \frac{\lambda^+}{2} (\Delta H - \Delta H^{\text{CIR}}). \quad (15)$$

С использованием этих обозначений компоненты вектора диссипации в форме CIR [4]:

$$\varepsilon_n = u_s \Delta H + a_1 + a_2; \quad \varepsilon_n = u_s \Delta q^n + u_s^n (a_1 + a_2) - \phi_s (a_1 - a_2);$$

$$\varepsilon_t = u_s \Delta q^t + (a_1 + a_2) (u_L^t + u_R^t) / 2.$$

Максимальное волновое число S_{\max} , необходимое для вычисления шага по времени, определяется для CIR по формуле (12), как и для LF-Local. Помимо (14) возможны иные варианты осреднения для параметров ϕ_s , u_s^n , u_s . По крайней мере, с осреднением (14) запись потоков по CIR менее надёжна по сравнению с тремя остальными при расчёте обтекания препятствий.

Г) Высокую точность обеспечивает запись потоков массы и импульса в форме HLLC [1, 2, 4, 5, 6], для которой введём следующие обозначения волновых скоростей:

$$S_L = \min(0, u_L^n - \phi_L, u_s - \phi_s); \quad S_R = \max(0, u_R^n + \phi_R, u_s + \phi_s); \quad S_{\max} = \max(|S_L|, |S_R|),$$

$$\text{где: } u_s^n = \frac{u_L^n + u_R^n}{2} + \phi_L - \phi_R; \quad \phi_s = \frac{\phi_L + \phi_R}{2} + \frac{u_L^n - u_R^n}{4}.$$

Определив вспомогательные параметры, делающие запись потоков массы и компонент импульса в форме HLLC более компактной:

$$\lambda^- = \frac{s_L}{s_R - s_L} ; \quad \lambda^+ = \frac{s_R}{s_R - s_L} ; \quad \omega = \frac{s_L s_R}{s_R - s_L} ,$$

можем представить эти потоки в виде:

$$M = \lambda^+ q_L - \lambda^- q_R + \omega \Delta H ; \quad F_1 = \lambda^+ q_L u_L^1 - \lambda^- q_R u_R^1 + \omega \Delta q^1 ; \quad (16)$$

$$F_n = \beta (\lambda^+ q_L u_L^n - \lambda^- q_R u_R^n + \omega \Delta q^n) + g \frac{\lambda^+ (h_L)^2 - \lambda^- (h_R)^2}{2} .$$

Как показали численные эксперименты автора и как отмечено в [1], эта форма записи по точности близка к Roe и CIR, а по эффективности 2-D алгоритма превосходит их.

Вернёмся к расчёту потока массы \tilde{M} и параметра корректировки импульса β для разрывного профиля дна. Поток массы \tilde{M} записывается аналогично потоку массы M , но при этом в формулах (11), (13), (15), (16), т.е. при расчёте диссипативных слагаемых, вместо ΔH используется Δh — см. (10). Параметр β , выбираемый в диапазоне [0..1], был введён, чтобы *в какой-то мере* учесть местные потери импульса при прохождении потока в районе «ступеньки» на дне. В простейшем случае его можно принять равным 1, а в более общем — определять на основе эмпирических зависимостей для местных потерь. В данной работе *только* для входящего в КО потока ($q_\Sigma < 0$) этот коэффициент принимался равным $\beta = h_R / \max(h_R, Z_L - Z_R)$. При таком определении он отличен от 1 при $Z_L > H_R$, т.е. когда существует участок «сухой стенки»: $D_R > 0$. Отметим, что принятая выше модификация глубины (9) физически соответствует полной потере импульса падающей с высоты D_L струи. Эти потери импульса можно было бы определить точнее *эмпирически*, поскольку случай падения струи, очевидно, не укладывается в рамки теории мелкой воды и требует привлечения дополнительных гипотез. Для непрерывного профиля дна ($Z_L = Z_R$) приведённые выше формулы дают: $\tilde{M} = M$; $\beta = 1$, т.е. потоки массы и импульса записываются по «традиционным» формулам LF-Local, Roe, CIR или HLLC без модификации (9) и коррекции входящего импульса — предельный переход есть.

Поскольку алгоритм Napsock относится к явным схемам, его устойчивость обеспечивается при выполнении условия Куранта-

Фридрихса-Леви, которое записывалось в виде:

$$\Delta t < 2Cr / \max_{i,j} \left(\frac{1}{\Omega} \sum_{k=1}^4 A^k S_{\max}^k \right). \quad (17)$$

Формулы вычисления на грани « k » максимальной по модулю волновой скорости S_{\max} для каждой формы записи потоков приведены выше. Параметр Куранта Cr в тестовых расчётах выбирался в интервале 0,5... 0,9.

В заключение этого раздела следует упомянуть о модификации метода контрольного объёма, позволяющей сравнительно просто повысить точность аппроксимации границы при использовании *регулярной декартовой сетки*. Метод заключается в «отсечении» части площади и длин граней КО линией границы (рис. 1 б) взамен использования в приграничной области целых (для декартовой сетки — прямоугольных) КО со ступенчатой аппроксимацией границы. Перспективность такого подхода отмечается в [1] и в доступном через Internet описании известного ПК «*STAR-CD*». В одном из представленных ниже примеров такой подход использовался, причём значения на внутренней поверхности дополнительной грани A^w брались пока из ближайшего узла i, j (аппроксимация 1-го порядка у границы, см. рис. 1 б).

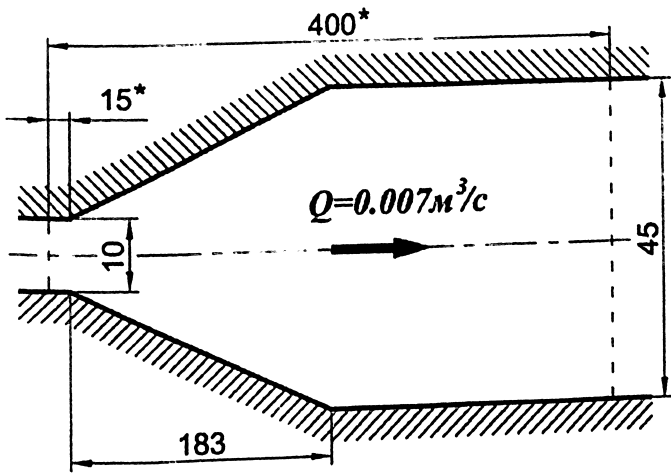
Программная реализация. На базе представленного алгоритма в ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» был разработан ПК для ОС *Windows*[®], имеющий все необходимые элементы современного интерфейса пользователя. В состав ПК входит блок оцифровки сканированных топографических карт на основе триангуляции Делоне с дальнейшим переносом отметок местности (или глубин) на регулярную расчётную сетку. Размеры последней ограничены только объёмом оперативной памяти: на персональном компьютере выполнялись расчёты на сетках более 2 млн. ячеек, что позволяет очень подробно описать рельеф местности, дна, геометрию инженерных сооружений. Вся исходная информация хранится во встроенной в ПК базе данных (БД), реализованной на основе *Borland InterBase-6.5*. В интерфейсе доступа к таблицам этой БД имеются средства контроля корректности вводимой информации, причём большие объёмы информации (например, карты дна) хранятся в виде ссылок на их файлы. Графическая поддержка реализована в виде графиков для контрольных точек (например, гидрографов), цветных карт местности (в частности, зон затопления с указанием глубин), трёхмерной

визуализации поверхности воды и дна со световыми эффектами на основе *OpenGL*-графики и т.д. В процессе расчётов (для подробных сеток они могут занимать несколько часов) пользователь имеет возможность отслеживать параметры прорывного потока в цифровом и графическом (включая 3D) виде. Кроме того, информация сохраняется в файлах для просмотра и анализа после расчётов, в частности по данным расчётов ПК выполняет запись «видеофильмов» в формате *AVI* с видео-компрессией (2D и 3D проекции) и со звуковым сопровождением.

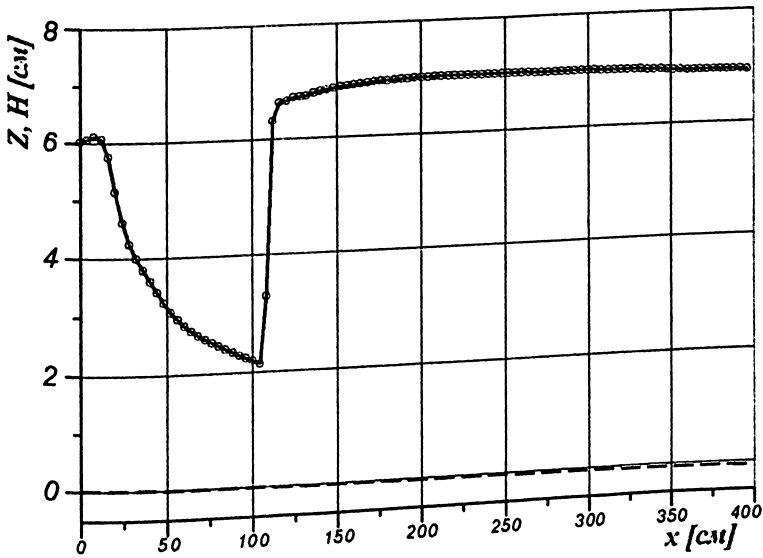
Примеры расчётов. Представленный алгоритм и ПК тестировались, по крайней мере, на 35 аналитических решениях и результатах экспериментов, а также применялись в ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» для решения практических задач. Ниже приведены результаты расчётов для трёх тестовых задач, отражающих особенности применения *регулярных криволинейных* сеток для сложной геометрии расчётной области. Эти тестовые расчёты выполнялись с записью потоков в форме HLLC, Roe или CIR с ограничителями для реконструкции Van Leer или Van Albada. Поскольку то и другое крайне мало сказывается на результатах расчётов, ниже для каждого примера выбор конкретной формы записи потоков и ограничителей не оговаривается. Параметр Куранта $Cr = 0,8$ для всех примеров.

Первый пример — стационарный гидравлический прыжок в канале с линейным расширением (рис.3 а) — описан в работах [12,13]. Помимо указанного на рисунке расхода на левой границе фиксирована глубина 6 см, а на правой границе поддерживается глубина 7 см. Этим параметрам соответствует число Фруда на входной границе 1,52, а на выходной $Fr = 0,27$. Уклон дна равен 0,00017, коэффициент шероховатости дна $n = 0,015$. Результаты расчёта продольного профиля свободной поверхности на адаптированной к границам криволинейной сетки 100 x 50 представлены на рис.3 б. Этот профиль идентичен приведённому в [12]. Данный пример интересен сложностью получения устойчивого профиля гидравлического прыжка, если вместо криволинейной сетки [13] применяется даже весьма подробная (300 x 200) декартова сетка со ступенчатой аппроксимацией границ.

Второй пример представляет собой распространение волны прорыва из прямоугольного резервуара по каналу с вертикальными стенками, имеющему в плане U-образную форму (рис.4). Экспериментальные данные для этой задачи для коэффициентов шероховатости дна канала $n = 0,0165$ и $n = 0,04$ приведены в [14,15]. Дно резервуара имеет два горизонтальных участка: при $x < 69,8$ см от-



a)



b)

Рис.3. Гидравлический прыжок в канале с линейным расширением:
 а — схема (размеры в сантиметрах; пунктиром показаны границы расчётной области);
 б — рассчитанный продольный профиль на оси канала
 - - - - дно канала ; —○— — свободная поверхность и расчётные узлы

метка дна равна 103 см, далее она составляет 8,9 см; в канале отметка дна нулевая. Таким образом, имеются две «ступеньки» на дне: при $x = 69,8$ см и на входе в канал, что позволяет протестировать и описанную выше процедуру учёта разрывов профиля дна. Эксперименты проводились для различных комбинаций начальных отметок уровней воды в резервуаре и канале. В [14] приведены результаты для начального уровня в резервуаре 26,6 см при начальном уровне в канале 7,62 см (Test 21 и Test 21N), а также для начального уровня в резервуаре 21,6 см при изначально «сухом» канале (Test 2 и Test 2N). Индекс «N» соответствует повышенной шероховатости дна канала: $n = 0,04$; без него $n = 0,0165$. Расчёты для всех 4-х вариантов выполнялись на криволинейной сетке 500 x 200 (в данном случае она ортогональна), границы которой частично показаны пунктиром на рис. 4. Чтобы упростить построение сетки, резервуар по сравнению с [14] был зеркально отображён относительно оси канала, что, очевидно, не может существенно повлиять на результаты. На рис.4 обращает на себя внимание большая площадь ограниченной пунктиром расчётной области (сверху и справа она отсечена размерами рисунка) по сравнению с площадью, где происходит излив. Это никоим образом не снижает быстродействия алгоритма, поскольку участки расчётной области, для которых задано условие затопления автоматически отключаются: потоки массы и импульса между ними не считаются, компоненты скорости зануляются, отметки воды не пересчитываются. Все граничные условия ставятся непосредственно по границам расчётной области (вдоль пунктирной линии на рис.4). Это заметно упрощает их постановку и является особенностью использования регулярной сетки и применения метода сквозного счёта. Некоторые результаты расчётов и их сопоставление с экспериментальными данными [14] показаны на рис.5. Для Test 21, Test 21N отмечается хорошее совпадение как времени прихода фронта волны в контрольные точки, так и динамики её уровней (рис.5, P4,P8). Для примеров с распространением волны по сухому каналу совпадение несколько хуже (рис. 5, P2): в некоторых контрольных точках расчётный фронт волны запаздывает по сравнению с экспериментальным на 0,3 – 0,5 с при удовлетворительном совпадении глубин затопления. Строилась также 3D-визуализация (*OpenGL*) свободной поверхности, в том числе на повороте канала в различные моменты времени. Для всех случаев она хорошо совпадает с фотографиями, приведёнными в [14].

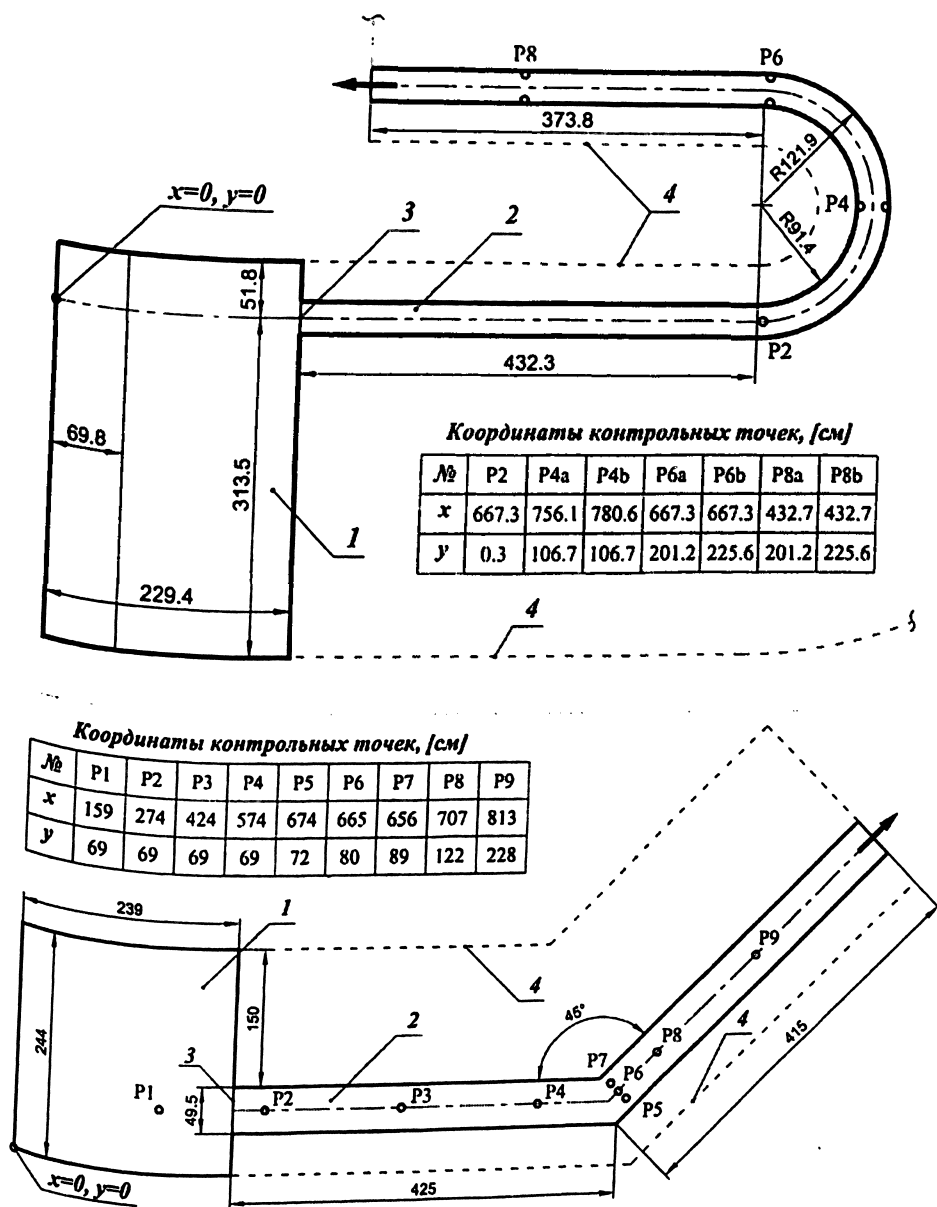


Рис. 4. Схемы экспериментов с распространением волны прорыва из прямоугольного резервуара по каналу с поворотом (размеры в сантиметрах): U-образный канал [14] — наверху; канал с поворотом на 45° [16] — внизу.. 1 — резервуар ; 2 — канал ; 3 — убираемая перегородка ; 4 — граница расчётной области.

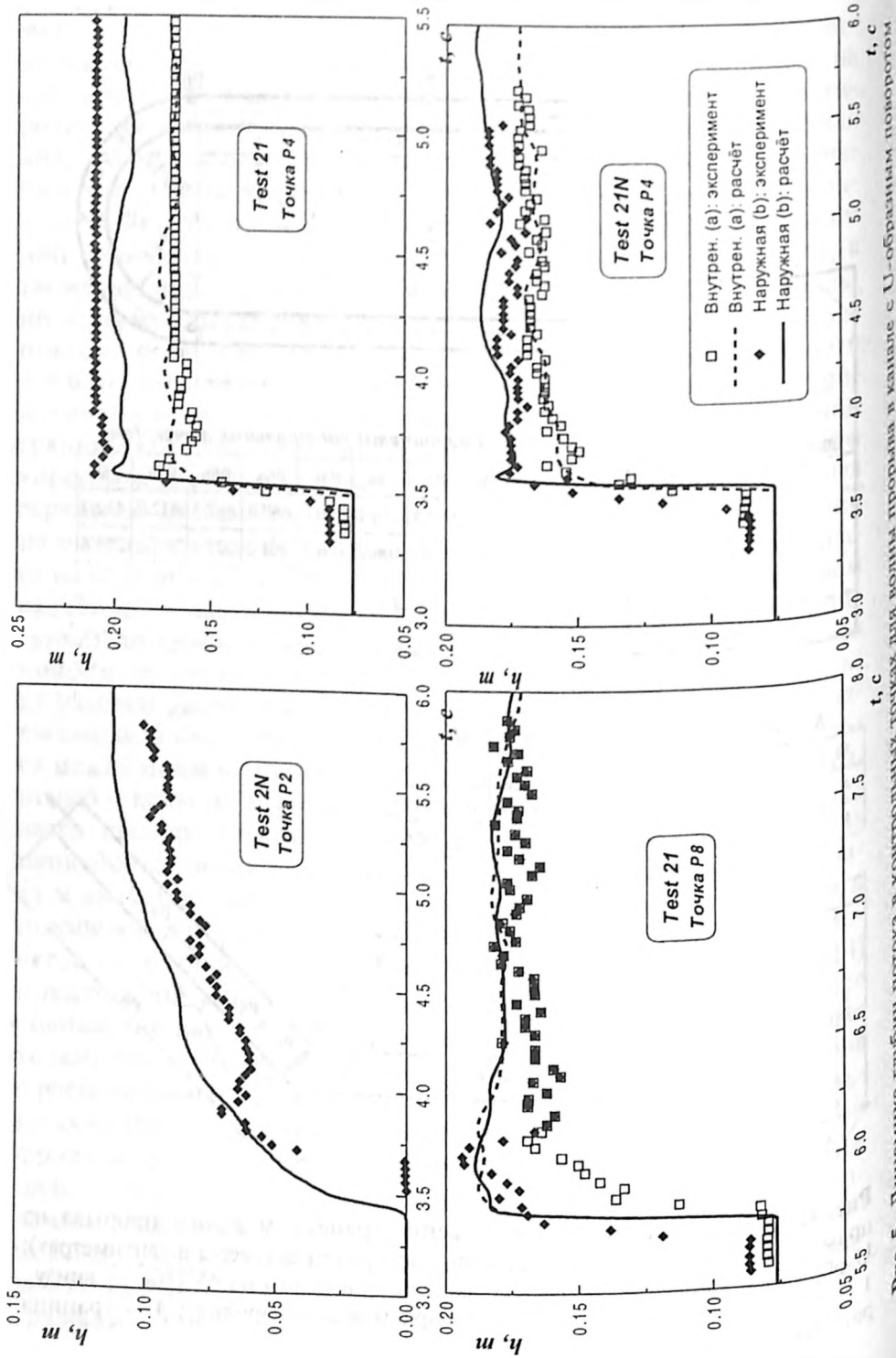


Рис. 5. Динамика глубины потока в контрольной точке для волны прорыва в канале в канале с U-образным поворотом

Третий пример относится к дальнейшему развитию методологии моделирования распространения волны в каналах прямоугольного сечения с *резким* поворотом. Экспериментальные данные для канала с поворотом на 90° и на 45° приведены в [16]. Результаты расчётов по представленному здесь алгоритму для канала с поворотом на 90° [5,6] практически идеально совпадают с экспериментальными данными. Ниже представлены только результаты численного моделирования для канала с поворотом на 45° (рис.4). Уровень дна в резервуаре равен 33 см, в канале он нулевой, т.е. в этом примере, как и в предыдущем (U-канале), есть скачок дна («ступенька») на стыке резервуара с каналом. С учётом указанных в [16] коэффициентов шероховатости дна (0,009) и стенок (0,0195) в расчётах использовался осреднённый коэффициент шероховатости $n = 0,012$. Начальный уровень в резервуаре равен 0,25 м, а в канале в начальный момент воды нет. В выходном сечении канала обеспечивается свободное истечение воды без отражения волны - течение «под горку». Расчёты выполнялись тремя способами: на криволинейной четырёхугольной сетке 250×98 (её границы показаны пунктиром на рис.4), на декартовой равномерной сетке 500×195 со ступенчатой аппроксимацией границ для развёрнутой под 45° части канала и на декартовой равномерной сетке 500×195 с усечёнными под 45° КО на границах развёрнутой части канала. Результаты расчётов в сравнении с экспериментальными данными представлены на рис. 6. Ранее уже отмечалось [6], что на повороте канала (точка P7) требуется очень подробная декартова сетка для удовлетворительной аппроксимации границы в районе отрывной зоны за поворотом, в противном случае совпадение с экспериментом для декартовой сетки неудовлетворительно (рис.5, P7, P8). Во всех точках наблюдения (в том числе, не представленных здесь) хорошее совпадение с экспериментом обеспечивает криволинейная сетка. Пробные расчёты для декартовой сетки с усечёнными КО на границах (см. рис.1б) привели к обнадёживающим результатам: для всех точек, в том числе P7, при размере сетки 500×195 (почти квадратные ячейки) динамика свободной поверхности практически совпадает с расчётами на криволинейной сетке.

Заметим, что во втором и третьем примере описание «ступенек» на дне не парой расчётных узлов, а 3 – 5 никак не сказывалось на результатах, что подтверждает принятую схему учёта разрывов профиля дна.

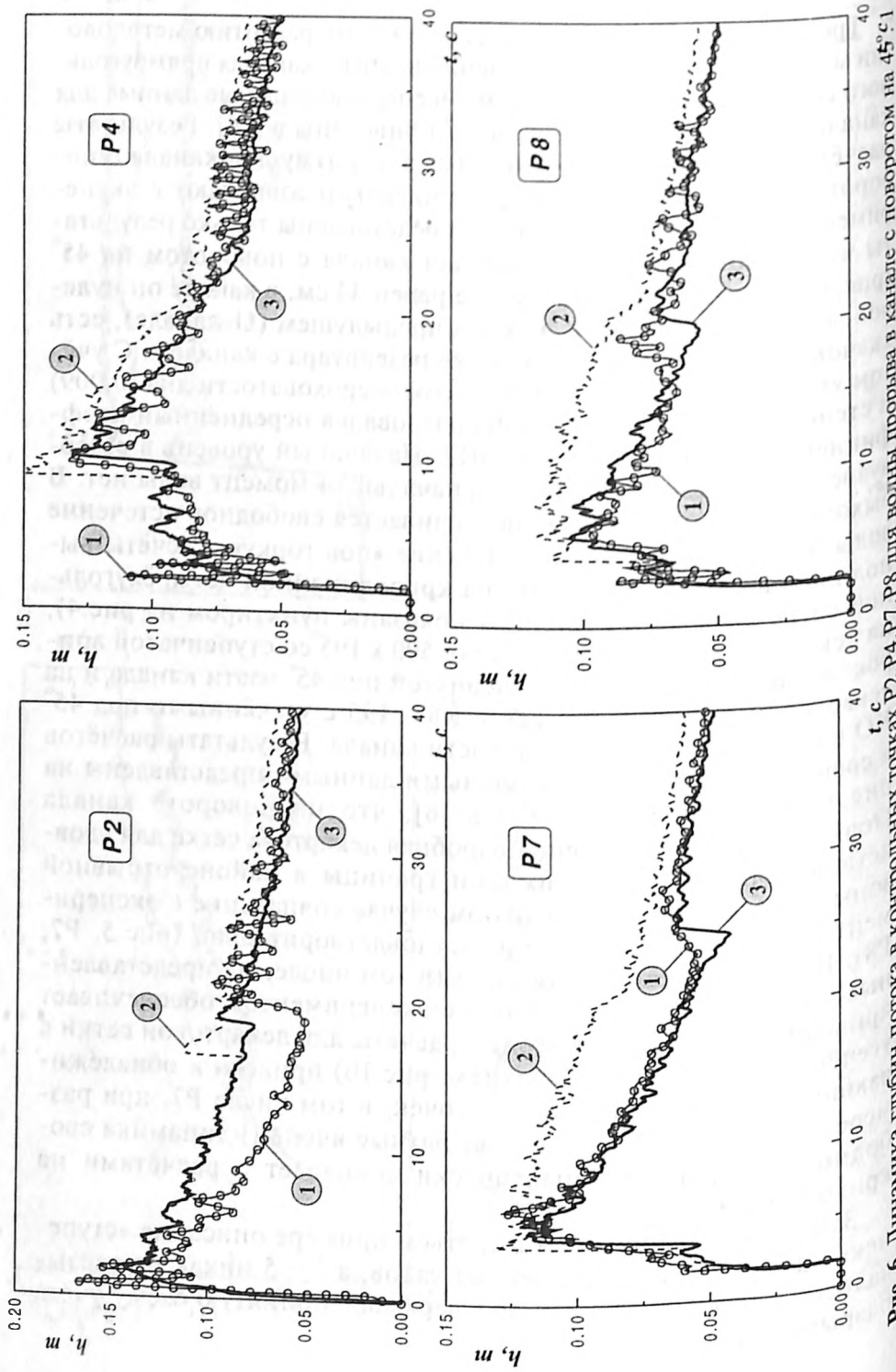


Рис. 6. Динамика глубины потока в контрольных точках P2, P4, P7, P8 для волны прорыва в канале с поворотом на 45° : 1 — эксперимент (УГН-2); 2 — расчёт на декартовой сетке 500×195 ; 3 — расчёт на криволинейной сетке 250×98

Рисунки на цветной вкладке — трансформация бора в плавном сужении/расширении русла [1] и истечение воды через проран для экспериментальных данных [2] — демонстрируют графические возможности ПК. Эти и другие тестовые примеры, допускающие варьирование в определённых пределах исходных данных и параметров расчётного алгоритма, доступны в демо-версии ПК, которую можно заказать в ОАО «ВНИИГ им.Б.Е.-Веденеева» (ProkKlim@Hydro.Vniig.ru).

Заключение. Данная работа посвящена в основном описанию расчётного алгоритма и примерам его применения. Однако, как показывает практика, на сегодняшний день центр тяжести работы по созданию современного ПК для расчёта параметров волны прорыва сместился от разработки эффективных численных схем в сторону их программной реализации. В частности, несмотря на сравнительную простоту адаптации рассматриваемой схемы (или другой схемы на основе метода КО) на треугольную или смешанную сетку, такая адаптация фактически бесполезна для практических задач без эффективной программной реализации: автоматизации и хранения исходной информации, генерации сетки, графической поддержки и визуализации результатов. В то же время, применение простых в реализации и использовании явных алгоритмов высокой точности на регулярных сетках большой размерности даёт возможность решать широкий круг гидравлических задач, связанных с взаимодействием паводков и ГТС. Упрощение процедуры подготовки исходных данных позволяет не только моделировать параметры волны прорыва при составлении деклараций безопасности, но и оперативно выполнять экспресс-расчёты для принятия решения при ликвидации последствий катастрофических паводков.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mingham C.G., Causon D.M.** Calculation of unsteady bore diffraction using a high resolution finite volume method. //Journal of Hydraulic Research. Vol. 38. 2000. №1.
2. **Fracarollo L., Toro E.F.** Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems. //Journal of Hydraulic Research. Vol. 33. 1995. №6.
3. **Manzini M., Ticca A., Zanetti G.** Numerical methods for 1D compressible flows, an interactive book. / <http://tis.ihed.ras.ru/books/NumericalMethods/>
4. **Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семёнов А.Ю.** Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. М.: Физматлит. 2001.

5. Прокофьев В.А. Современные численные схемы на базе метода контрольного объёма для моделирования бурных потоков и волн прорыва. //Гидротехническое строительство. 2002. №7.
6. Прокофьев В.А. Применение различных модификаций метода контрольного объёма для моделирования открытых потоков. //Труды международного симпозиума IAHR «Гидравлические и гидрологические аспекты надёжности и безопасности ГТС». С10. С.Петербург. 2002 (CD-ROM).
7. Zuhua C., Guangqian W., Zhishi W. Numerical solution of the two-dimensional unsteady depth-averaged flow and solute transport. //Proceedings of XXIX IAHR Congress, Theme-E, Beijing, 2000.
8. Sanders B.F. High resolution and non-oscillatory solution of St.Venant equations in non-rectangular and non-prismatic channels. //Journal of Hydraulic Research, 2001, vol. 39, №3.
9. Brufau P., Garcia-Navarro P., Ghilardi P., Natale L., Savi F. 1D Mathematical modelling of debris flow. //Journal of Hydraulic Research. Vol. 38. 2000. №6.
10. Nujic' M. Efficient implementation of non-oscillatory schemes for the computation of free- surface flows. //Journal of Hydraulic Research. Vol. 33. 1995. №1.
11. Delis A.I., Skeels C.P., Ryrie S.C. Evaluation of some approximate Riemann solvers for transient open channel flows. //Journal of Hydraulic Research, 2000, vol. 38, №3.
12. Bhallamudi S.M., Chaudhry M.H. Computation of flows in open-channel transitions. //Journal of Hydraulic Research, 1992, vol. 30, №1.
13. Rahman M., Chaudhry M.H. Computation of flow in open-channel transitions. //Journal of Hydraulic Research, 1997, vol. 35, №2.
14. Bell W.S. Elliot R.C., Chaudhry M.H. Experimental results of two-dimensional dam-break flows. //Journal of Hydraulic Research, 1992, vol. 30, №2.
15. Molls T., Chaudhry M.H. Depth-averaged open channel flow model. //Journal of Hydraulic Engineering, June 1995.
16. Frazao S.S., Zech Y. Effects of a sharp bend on dam-break flow.//Proceeding of XXVIII IAHR Congress, GRAZ, 1999.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЖДЕВОГО ПАВОДКА, ПРИВЕДШЕГО К РАЗРУШЕНИЮ ПЛОТИНЫ (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ДЮРСО ПОД НОВОРОССИЙСКОМ)

Беликов В.В., кандидат физ.-мат. наук (ОАО «НИИЭС»)

Разработанная в ОАО «НИИЭС» математическая модель связи ущербов с локальными параметрами волны прорыва (скоростью, глубиной и временем затопления) была проверена на реальном объекте — р. Дюрсо под Новороссийском. В августе 2002 г. там произошло катастрофическое наводнение, причинившее серьезный ущерб. Дождевой паводок, усиленный смерчем, привел к переполнению водохранилища в верховьях реки и частичному разрушению грунтовой плотины.

В сентябре 2002 г. была организована рекогносцировочная поездка в район р. Дюрсо, в ходе которой была собрана информация о характере и степени разрушений, характере причиненного ущерба, а также уточнены топография местности, параметры плотины и степень ее разрушения. В настоящей статье приведены сведения о прошедшем наводнении на р. Дюрсо, описана подготовка исходных данных и результаты расчетов для двух сценариев, строятся карты ущербов в баллах и производится их анализ.

1. Описание объекта исследования

Небольшая горная речка Дюрсо впадает в Черное море недалеко от г. Новороссийска (рис. на цветной вкладке). Ее длина около 15 км, площадь водосбора около 60 км². Уклоны реки и долины составляют 5 ... 7 м/км, ширина реки в среднем течении (в районе плотины) 3 ... 4 м, вблизи устья 8 ... 10 м, ширина поймы от 100 до 200 м. Пойма реки плоская, либо с небольшим уклоном в сторону русла, преимущественно односторонняя, так как русло прижимается то к левому, то к правому склону долины. Склоны долины гористые, крутые (до 40%), полностью заросшие густым лесом.

В средней части долины сооружена плотина трапецидального поперечного сечения из глинистых материалов. Длина плотины поверху 215 м, ширина поверху 4 м, высота 24 м, верховой откос (1 : 2,5) укреплен бетонными плитами толщиной 0,1 м, низовой откос (1 : 2) задернован. Водосброс плотины — поверхностный в виде двухступенчатого быстрого потока — расположен на левом берегу. Для сброса экстремально высоких расходов под гребнем плотины расположены две трубы диаметром 1 м. Плотина образует небольшое водохранилище длиной 1,5 км и объемом 6 млн. м³.

В августе 2002 г. в долине реки произошло катастрофическое наводнение, в результате которого был причинен серьезный ущерб сельхозугодьям (виноградникам), а также имели место разрушения жилых домов, мостов и человеческие жертвы. В течение нескольких дней шли сильные дожди (суммарное количество осадков превысило 150 мм), что привело к переполнению водохранилища, причем в ходе наводнения водосбросные отверстия на гребне плотины сильно засорились.

В день пика паводка в дополнение к дождям над долиной реки прошел смерч. Начался перелив воды через гребень плотины в нижний бьеф, что привело к частичному (на глубину до 3 м на ширине 150 м) разрушению грунтовой плотины (рис. на цветной вкладке). Частичный смыв тела плотины объясняется главным образом наличием в области ее гребня железобетонных плит. Образовавшаяся волна прорыва наложилась на большой естественный дождевой паводок, что привело практически к полному затоплению поймы реки в нижнем бьефе по всей ширине, разрушению некоторых расположенных на пойме домов (рис. на цветной вкладке), полной или частичной гибели виноградных плантаций, нескольким человеческим жертвам. По приблизительным подсчетам, ущерб только от гибели 60 га виноградников оценивается более чем в 300 млн. рублей. Если бы плотина разрушилась полностью, последствия были бы куда более серьезными, что показали проведенные ниже расчеты.

2. Подготовка данных для проведения расчетов

Исходные данные для построения компьютерной модели следующие:

- цифровая электронная карта местности в масштабе 1:200000;
- параметры русла и поймы (батиметрия, растительность и др.), уточненные в результате рекогносцировочной поездки;
- параметры грунтовой плотины и водохранилища;
- информация об осадках (в том числе полученная косвенным путем по объему притока к водохранилищу и оз. Абрау).

При построении компьютерной модели речного бассейна производилось формирование цифрового рельефа местности для всей поверхности водосбора. При этом использовалась цифровая электронная топографическая карта (рис. на цветной вкладке). На отдельных участках русла и поймы дно было уточнено по результатам обследования на местности. Для каждого варианта расчета формировался соответствующий единый файл рельефа в виде набора точек в декартовых координатах X , Y , Z . После этого отмет-

ки рельефа интерполировались в центры ячеек соответствующей расчетной сетки (см. ниже) при помощи специального алгоритма [1–3]. На рис. на цветной вкладке представлен рельеф земной поверхности в цветовой заливке.

С целью отображения динамики прохождения паводковой волны на плане расчетной области было выбрано положение контрольных точек, в которых производилась выдача отметок водной поверхности, глубин и скоростей течения во времени. Точка 1 расположена в верхнем бьефе плотины, точка 2 — в нижнем бьефе вблизи плотины, остальные точки в порядке возрастания номеров вниз по течению до моря. При численном моделировании использовалась модификация известной в газовой динамике схемы С.К. Годунова, которая делает ее пригодной для расчета уравнений Сен-Венана [4...8]. Применялись треугольные сетки нерегулярной структуры [9]. Такие сетки хорошо адаптируются под плановые очертания расчетной области и особенности течения. Для их построения применялась специально разработанная двухшаговая методика. На первом шаге расчетная область разбивалась на несколько подобластей (зон), определяемых геометрической формой расчетной области, рельефом, плановым положением притоков, местоположением плотины и т.п. В каждой из этих зон строилась базовая сетка нулевого приближения, причем размеры ячеек выбирались исходя из достижения максимальной точности расчета в рамках приближения мелкой воды, когда размер ячейки не имеет смысла делать меньшим глубины потока в данном месте.

На втором шаге все зоны объединялись и производилось сглаживание сетки по специальному алгоритму минимизации гармонического функционала. В итоге была построена сетка, фрагмент которой представлен на рис. на цветной вкладке. Реальные размеры ячеек составили от 10 м до 100 м, их общее число — около 23 тысяч. На таких сетках в расчетах хорошо воссоздаются все особенности течения (отрывные зоны, гидравлические прыжки и т.п.).

3. Результаты расчетов волны прорыва для наблюдавшейся ситуации и для гипотетического случая полного разрушения плотины

Расчеты производились по модифицированной схеме С.К. Годунова для уравнений мелкой воды сквозным образом. Были выполнены две серии расчетов: для реальной ситуации (сценарий 1) и для гипотетического случая полного разрушения плотины (сценарий 2). Во всех расчетах коэффициент шероховатости поймы в

формуле Маннинга принимался равным 0,06 (вся пойма плотно засажена виноградниками), коэффициент шероховатости дна водохранилища принимался равным 0,03.

В обоих сценариях расчет начинался с момента, когда уровень верхнего бьефа достигал отметки гребня плотины и начинался перелив воды через гребень плотины. Боковая приточность формировалась в результате расчета установившегося склонового стока при постоянной интенсивности выпадающих осадков 20 мм/ч. При таких условиях в течение 2 ч формировался практически установившийся расход через плотину, равный 130 м³/с. После этого в сценарии 1 производилось моделирование разрушения напорного фронта плотины равномерно на высоту 3 м на ширине 150 м за 10 мин. с последующей стабилизацией гребня плотины.

В сценарии 2 моделировалось полное разрушение плотины до отметки поймы за 1 ч (с 2 до 3 ч) на ширине 150 м. Далее до момента времени 4 ч в обоих сценариях рассчитывалось взаимодействие волны прорыва и дождевого стока, а с 4 ч до 6 ч боковая приточность занулялась, и рассчитывалось течение на спаде паводка. На рис. на цветной вкладке представлены максимальные глубины затопления для 2-го сценария. Площади затопления для двух сценариев отличаются не очень сильно, однако глубины затопления и скорости течения во втором случае значительно больше. Это хорошо видно на графиках скоростей течения в контрольных точках (рис. 1). Существенно различаются также расходы и объемы излива из водохранилища (рис. 2).

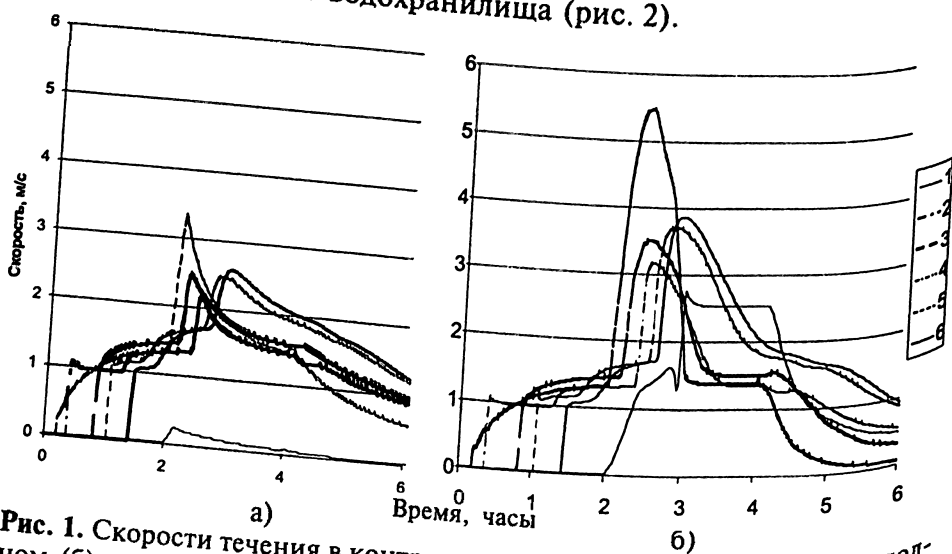


Рис. 1. Скорости течения в контрольных точках при частичном (а) и полном (б) разрушении плотины

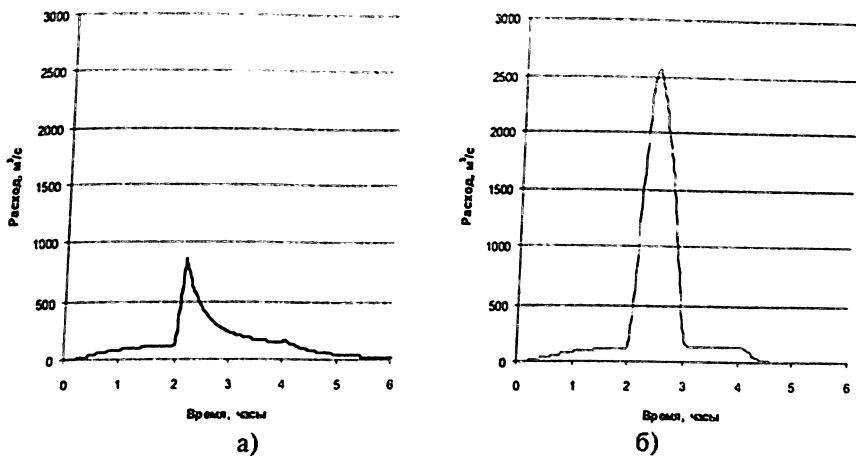


Рис. 2. Расход излива через проран при частичном (а) и полном (б) разрушении плотины

Следует отметить, что скорости течения и глубины затопления, полученные в расчетах по сценарию 1, достаточно близки к наблюдавшимся в натуральных условиях.

4. Построение и анализ карт ущербов в балльной системе

По результатам проведенных расчетов с использованием разработанного программного интерфейса были построены карты ущербов в балльном выражении. На рис. на цветной вкладке изображены фрагменты карты ущербов для сценариев 1 и 2 в цветовой заливке, где каждый цвет соответствует определенному баллу согласно легенде. Видно, что значительная часть пойменной территории подвержена сильным разрушениям, особенно в случае реализации сценария 2 (полное разрушение плотины). Следует отметить, что несмотря на кажущуюся одномерность рассматриваемой задачи (ввиду вытянутости области течения вдоль русла), зоны максимальных ущербов концентрируются вблизи русла, а на удаленных от русла участках поймы балльность невелика. Это хорошо иллюстрирует рис. на цветной вкладке, где расположенные ближе к руслу дома (в районе селения Дюрсо) полностью разрушены, а более удаленные были лишь подтоплены. Таким образом, при наличии достаточно точной топографии поймы и батиметрии русла при использовании двумерной методики расчета можно оценить возможный ущерб при прохождении волны прорыва в зависимости от удаления от русла. Степень конкретных разрушений можно оценить, используя шкалу балльности разрушений, приводимую в работе [10].

Заключение

Построена математическая модель и проведены совместные расчеты стокового течения и волны прорыва при различных сценариях разрушения плотины на р.Дюрсо под Новороссийском.

Проведены расчеты и построены карты ущербов в балльном выражении. Сопоставление параметров рассчитанного и реального паводка показало достаточно хорошее совпадение глубин, скоростей течения и зон разрушений.

Для более точного расчета распространения волн прорыва и оценки ущербов при разрушении грунтовых плотин следует провести теоретические и экспериментальные исследования разрушения плотин из глинистых материалов и плотин с укрепленными плитами верховыми откосами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беликов В.В., Иванов В.Д., Канторович В.К. и др. Несибсоновская интерполяция — новый метод интерполяции значений функции на произвольной системе точек. //Ж. Вычисл. Матем. и Матем. Физики 37. 1997. №1.
2. Беликов В.В., Иванов В.Д., Канторович В.К. и др. Геометрический анализ несибсоновской интерполяции. В кн. «Вычислительная гидродинамика природных течений». М.: Наука. Физматлит. 1997. Тр. ИОФАН. Т.53.
3. Belikov V., Semenov A. Non-Sibsonian interpolation on arbitrary system of points in Euclidean space and adaptive isolines generation. //Appl. Numer. Math. 32. 2000. № 4.
4. Беликов В.В., Семенов А.Ю. Метод Годунова с модификацией Колгана для численного решения двумерных уравнений мелкой воды. В сб. Труды 10-ой конф. молодых ученых МФТИ. 23 мар. — 7 апр. 1985. ч. 1. №. 5983-85 Деп,179-214, деп. в ВИНТИ, Москва
5. Беликов В.В., Семенов А.Ю. Численный метод распада разрыва для решения уравнений теории мелкой воды. //Ж. Вычисл. Матем. и Матем. Физики 37. 1997. №8.
6. Беликов В.В., Семенов А.Ю. Построение численных методов распада разрыва для решения уравнений теории мелкой воды. В кн. «Вычислительная гидродинамика природных течений». М.: Наука. Физматлит. 1997. Тр. ИОФАН; Т.53.
7. Belikov V.V. and Semenov A.Yu. A Godunov's Type Method Based on an Exact Solution to the Riemann Problem for the Shallow-Water Equations. //Proc. 4 Eur. Comp. Fluid Dyn. Conf. (ECCOMAS 98). WILEY, New York, V.1, Part 1, 1998.
8. Беликов В.В., Милитеев А.Н., Кочетков В.В. Комплекс программ для расчета волн прорыва «Бор». Российское агентство по патентным и товарным знакам. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2001610638. М. 2001.

9. Беликов В.В. Вычислительный комплекс TRIANA — генератор сеток треугольных конечных элементов в произвольных плоских областях. ГосФАП СССР. П007705. 1984.

10. Беликов В.В., Кочетков В.В., Милитеев А.Н., Прудовский А.М., Родионов В.Б. Использование электронных топографических карт для оценки ущерба от катастрофических паводков. //Научно-технический и производственный сборник «Безопасность энергетических сооружений». М.: ОАО «НИИЭС». вып. 11. 2003.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПАВОДКИ ВОДНЫХ ПОТОКОВ В УЗЛЕ СЛИЯНИЯ РЕК СУХОНЫ И ЮГА

Крыленко И.Н., инженер (МГУ им. М.В. Ломоносова)

Данное исследование является частью комплекса работ, направленных на обоснование мер по предупреждению затопления и подтопления г. Великий Устюг, расположенного на левом берегу р. Сухоны и на террасах и пойме р. Малой Северной Двины непосредственно ниже слияния рек Сухоны и Юга. Затопление города связано с уровенным режимом рек в узле слияния, а уровенный режим рек, в свою очередь, определяется взаимодействием водных потоков рек Сухоны и Юга: изменение уровней воды на одной из сливающихся рек вызывает формирование на другой реке выше слияния кривой подпора или спада водной поверхности, в весенний период взаимодействие потоков осложняется заторными повышениями уровней воды. Во время экстремально высоких уровней воды, связанных с заторными явлениями в период половодья, затапливается около половины площади застройки города и ближайшие деревни. Последнее крупное наводнение наблюдалось в мае 1998 г. Затор, возникший во время весеннего ледохода ниже слияния Сухоны и Юга, обусловил повышение уровня в реке, в результате которого значительная часть городской и прилегающей территории оказалась под водой в течение длительного времени.

Основные зависимости, используемые при моделировании

При математическом моделировании взаимодействия потоков в узле слияния рек Сухоны и Юга использовалась одномерная гидравлическая схематизация, движение потоков принималось плавнoизменяющимся, установившимся, неравномерным. Осно-

вой гидравлических расчетов неравномерного движения речных потоков является расчет кривой свободной поверхности. При слиянии одного потока с другим, на котором наблюдаются более высокие уровни (например, из-за прохождения волны паводка), наблюдается подъем уровней, течение замедляется, а свободная поверхность принимает форму кривой подпора. При образовании заторов на участке реки выше них также формируется подпорная кривая. Построение кривых свободной поверхности позволяет найти все необходимые величины, характеризующие гидравлику потока на любом профиле в пределах охваченной расчетом части реки.

Уравнение неравномерного движения речного потока записывается в виде:

$$I = \frac{d}{dx} \left(\frac{\alpha v_{\text{cp}}^2}{2g} \right) + \frac{v_{\text{cp}}^2}{C^2 H_{\text{cp}}}, \quad (1)$$

где I — уклон водной поверхности; α — корректив Кориолиса; v_{cp} — средняя скорость; C — коэффициент Шези; H_{cp} — средняя глубина; g — ускорение свободного падения.

Уклон водной поверхности можно выразить через разность отметок $\Delta \xi$ водной поверхности в двух створах, находящихся на расстоянии Δx друг от друга, т.е.

$$I = - \frac{\Delta \xi}{\Delta x}. \quad (2)$$

Уравнение неравномерного движения для участка реки длиной Δx приобретает вид:

$$-\Delta \xi = \frac{\alpha}{2g} \Delta (v_{\text{cp}}^2) + \Delta x \frac{v_{\text{cp}}^2}{C^2 H_{\text{cp}}}. \quad (3)$$

Предполагается, что последний член уравнения учитывает как линейные, так и местные потери напора. Местные потери, обусловленные чередованием сужений и расширений русла, могут быть учтены (хотя не всегда в полной мере) путем использования соответствующих значений коэффициента шероховатости n в формуле Маннинга [6]. Местные потери напора в месте слияния потоков, в общем случае, превышают потери напора на бесприточных участках и могут быть учтены путем введения дополнительных коэффициентов к значению коэффициента гидравлического сопротивления λ ($\lambda = C^2/2g$), учиты-

вающего потери напора на трение и на присоединение расхода воды [1]. Тогда коэффициент Шези будет вычисляться по формуле:

$$C = \frac{\sqrt{\mu}}{n} H_{\text{ср.}}^{1/6}, \quad (4)$$

где μ — поправочный коэффициент для учета местных потерь напора при слиянии потоков.

Для основного русла: $\mu_p = \exp(0,37 - 0,19 \cos \alpha) \left(\frac{U_{\text{пр}}}{U_p}\right)^{0,51} \frac{m}{1,58m - 0,58}, \quad (5)$

для притока: $\mu_{\text{пр}} = \exp(1,35 - 0,3 \cos \alpha) \left(\frac{U_p}{U_{\text{пр}}}\right)^{0,63} (0,3 - 1,05 \ln m), \quad (6)$

где α — угол слияния потоков; $U_{\text{пр.р}}$ — средние скорости течения притока реки; m — морфометрический параметр, равный отношению площади живого сечения суммарного потока к сумме площадей живых сечений основного русла и притока.

Во многих случаях при построении кривой свободной поверхности для упрощения расчетов не учитывают изменение кинетической энергии по длине потока, исходя из того, что на протяжении расчетного участка длиной Δx происходит заметное изменение отметок свободной поверхности, а относительное изменение кинетической энергии оказывается небольшим даже в условиях неравномерного движения. Тогда уравнение (1) принимает вид:

$$I = \frac{v_{\text{ср}}^2}{C^2 H_{\text{ср}}} = \frac{Q^2}{K^2}, \quad (7)$$

где K — расходная характеристика, определяемая формулой:

$$K = \omega_{\text{ср}} C_{\text{ср}} \sqrt{H_{\text{ср}}}, \quad (8)$$

где $\omega_{\text{ср}}, C_{\text{ср}}, H_{\text{ср}}$ — средние значения площади поперечного сечения, коэффициента Шези и глубины на участке реки длиной Δx . Уравнение (7) используется как основное в практике построения кривых свободной поверхности речных потоков, оно решается итерационным методом, так как входящие в него величины $\omega_{\text{ср}}, C_{\text{ср}}$ являются функцией среднего уровня на участке $H_{\text{ср}}$, также входящего в это уравнение.

Разработка программы для расчета кривых свободной поверхности на основе итерационного метода решения уравнения неравномерного движения воды

В основу алгоритма программы положен метод расчета кривых свободной поверхности речных потоков [3], [4], [6], заключающийся в решении уравнения неравномерного движения воды методом последовательных приближений. Текст программы написан на языке Fortran.

Для построения кривых свободной поверхности русло реки делится на расчетные участки. В пределах каждого такого участка кривая свободной поверхности считается прямой линией. Для каждого расчетного участка находится осредненный типовой поперечный профиль и измеряется длина участка Δx . Средний поперечный профиль считается отнесенным к середине расчетного участка, где значения уровня считаются средними для участка.

Таким образом, для расчета кривых свободной поверхности используются следующие основные исходные данные:

средние для участка поперечные профили. Для каждого профиля задается номер профиля, число вертикалей; для каждой вертикали — абсолютная отметка дна, расстояние от постоянного начала, коэффициент шероховатости дна;

длины расчетных участков Δx ;

расходы воды в реках;

уровень воды в конце нижнего по течению расчетного участка.

Расчетная часть программы состоит из двух основных блоков — в первом рассчитываются морфометрические характеристики, коэффициенты Шези, модули сопротивления для каждого профиля в зависимости от уровня воды (с интервалом 20 см), во втором — кривые свободной поверхности.

В программе предусмотрена возможность получения набора кривых в назначенном диапазоне изменения уровней в замыкающем створе.

Подготовка исходных данных для расчета кривых свободной поверхности

Для подготовки поперечных профилей русел и продольного профиля дна использовались планы русел рек Малой Сев. Двины, Сухоны и Юга в масштабе 1:10000, составленные в 2000 г. Изобаты на этих планах проведены через 0,5 м. Для описания пойменной части профилей использовалась топографическая карта масштаба 1:25000 с сечением горизонталей 2,5 м, для профилей в районе г. В. Устюг — карта затопления масштаба 1:25000 с сечением горизонталей 0,5 м, составленная по результатам ландшафтной съемки 2000 г.

Расчеты проводились для участка р. Сухоны, створ в 3 км выше д. Ястреблево (22 км от устья), и р. Малой Сев. Двины, пережат Нижний Боровниковский (13,5 км от слияния рек Сухоны и Юга). В пределах выбранного участка русло было разбито на 28 расчетных участков (рис. 1). Расчетные участки выбирались таким образом, чтобы каждый из них был более или менее однородным в отношении поперечных сечений, шероховатости, уклонов свободной поверхности при отсутствии подпора.

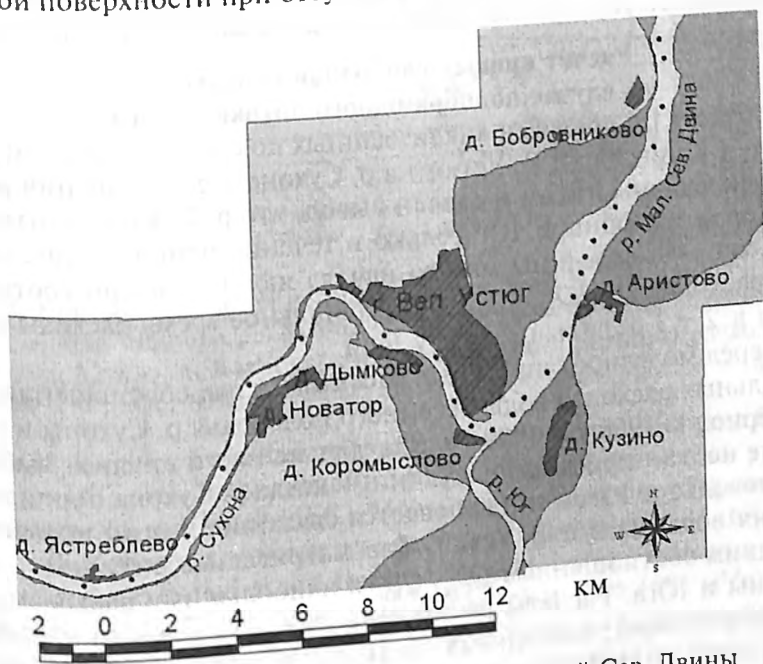


Рис. 1. Схема участка рек Сухоны и Малой Сев. Двины для расчета кривых свободной поверхности

Перед проведением основных расчетов было выполнено специальное исследование по оценке вклада составляющей уравнения неравномерного движения (3), учитывающей изменение уклонов водной поверхности при изменении скоростного напора по длине потока в общем изменении уклонов на участке. Выяснилось, что величина этого вклада в целом для рассматриваемого участка рек Сухоны и Малой Сев. Двины невелика. Так, например, при расходе воды р. Сухоны $300 \text{ м}^3/\text{с}$, Юга — $200 \text{ м}^3/\text{с}$ общее падение на участке от в/п В. Устюг до переката Н. Боровниковский составляет $3,1 \text{ м}$, в том числе за счет изменения скоростного напора на указанном участке — $0,02 \text{ м}$. При

расходах р. Сухоны 3900 м³/с и р. Юг 1500 м³/с падение уровней составило, соответственно, 3,68 м и 0,14 м. В случае изменения отметок водной поверхности при подпорном повышении уровней на 2 м на перекате Н.Бобровниковский при таких же расходах воды общее падение уровня на указанном участке составило 2,13 м, а за счет изменения скоростного напора — 0,12 м. Учитывая столь небольшой вклад изменения уровней воды за счет изменения скоростного напора по длине потока, в дальнейшем для расчетов использовалось упрощенное уравнение движения воды (7).

Расчет кривых свободной поверхности в случае подпора одного потока другим

В работе [5] проведен анализ данных по соответствующим уровням г/п Каликино и В. Устюг на р. Сухоне и соотношений расходов рек Сухоны и Юга и сделан вывод, что р. Сухона испытывает подпор со стороны р. Юг только в течение непродолжительного периода — с середины мая до начала июня — и при соотношении расходов $Q_{\text{Сух}}/Q_{\text{Юг}} < 1 - 1,2$. В остальное время расходы р. Сухоны в 2 — 3 раза выше, чем у Юга.

Перед моделированием был рассмотрен ряд соотношений максимальных расходов воды весеннего половодья р. Сухоны и р. Юг за период с 1966 по 1989 гг. Для дальнейшего анализа выбраны самые неблагоприятные ситуации — когда р. Сухона подпирается в половодье р. Югом и наблюдается связанное с этим повышение уровня воды на в/п В. Устюг. Рассматривались ситуации с наименьшим соотношением $Q_{\text{Сух}}/Q_{\text{Юг}}$ и наибольшими расходами рек Сухоны и Юга. Расчеты выполнены для двух реально наблюдавшихся ситуаций, выбранных по указанному выше принципу:

с расходом 1160 м³/с на р. Сухоне и 2050 м³/с на р. Юге ($Q_{\text{Сух}}/Q_{\text{Юг}} = 0,57$) 18.05.87 г;

с расходом 2440 м³/с на р. Сухоне и 3220 м³/с на р. Юге ($Q_{\text{Сух}}/Q_{\text{Юг}} = 0,75$) 13.05.68 г.

Для сравнения результатов моделирования были построены кривые с расходами по р. Сухоне, равными наблюдаемым, а на р. Юг расходы принимались меньшими, чем наблюдаемые, т.е. задавались безподпорные условия.

На 18.05.87 г. расчетный уровень по в/п В. Устюг составил 425 см¹ (53,59 м БС) при значении реально наблюдавшегося уровня 395 см (53,29 м БС). Повышение подпорного уровня ΔH на в/п В. Устюг по результатам расчетов составило 1,16 м, при этом выклинивание подпора происходит за д. Ястреблево (на 21-ом км от устья Сухоны) (рис.2).

¹ Здесь и ниже приводится уровень по в/п В. Устюг в см над нулем графика поста, а в скобках в абсолютных отметках. Ноль графика в/п г. В. Устюг -49,34 м БС, принятый проектный уровень +35 см

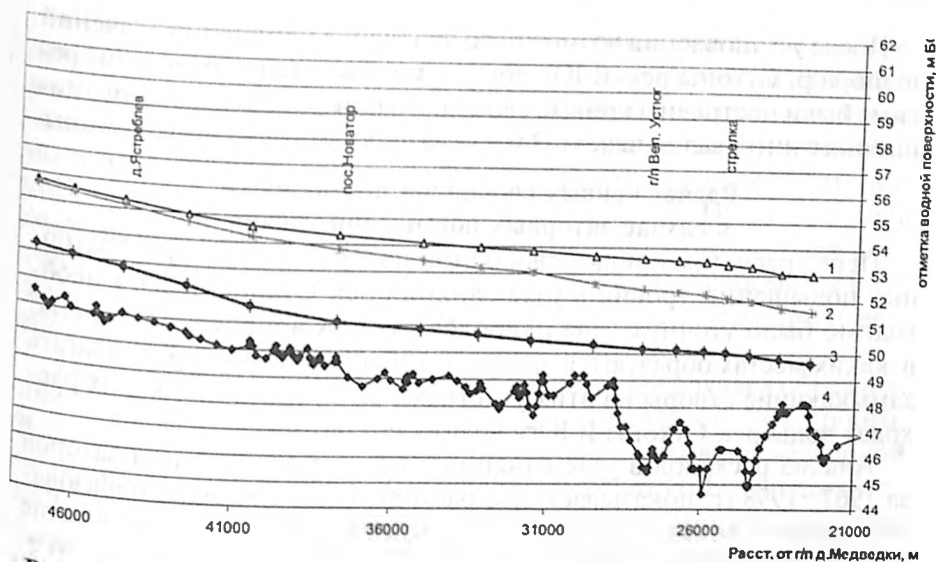


Рис. 2. Кривые свободной поверхности рек Малой Сев. Двины и Сухоны: 1 — при подпоре р. Сухоны рекой Югом — (расход воды Сухоны $1160 \text{ м}^3/\text{с}$, Юга — $2050 \text{ м}^3/\text{с}$); 2 — при отсутствии подпора (расход воды Сухоны $1160 \text{ м}^3/\text{с}$, Юга — $800 \text{ м}^3/\text{с}$); 3 — меженный урез; 4 — дно.

На 13.05.68 г. расчетный уровень по в/п В. Устюг составил 602 см ($55,36 \text{ м БС}$), при этом значение реально наблюдавшегося уровня равнялось 595 см ($55,29 \text{ м БС}$). Повышение подпорного уровня ΔH по в/п В. Устюг по результатам расчетов составило $1,31 \text{ м}$.

По этой же схеме рассмотрено взаимодействие потоков и при меньших расходах рек: Сухоны ($289 \text{ м}^3/\text{с}$) и Юга ($591 \text{ м}^3/\text{с}$). При соотношении расходов $Q_{\text{Сух}}/Q_{\text{Юг}} = 0,49$, одном из наименьших для рассматриваемого периода наблюдений, повышение подпорного уровня ΔH на в/п В. Устюг по результатам расчетов составило $0,81 \text{ м}$, выклинивание подпора происходит за д. Новатор (15 км от устья р. Сухоны). Это позволяет заключить, что в период межени повышение уровня ΔH по в/п В. Устюг в результате подпора р. Сухоны р. Югом составляет не более 1 м , а распространяется подпорное повышение не далее 15 км от устья Сухоны.

Таким образом, при расчетах кривых свободной поверхности при подпоре одного потока другим погрешность расчета составляет в среднем $20 - 30 \text{ см}$; повышение подпорного уровня ΔH по в/п В. Устюг в результате подпора р. Сухоны р. Югом при соотношениях и значениях расходов, наблюдавшихся в период 1966 — 1989 гг., не превышает $1,5 \text{ м}$, а повышение подпорного уровня может распространяться до д. Ястреблево (выше 21-го км от устья Сухоны).

После установления возможного диапазона изменения значений подпора р. Сухоны рекой Юг при различном гидрологическом режиме были построены кривые свободной поверхности для этого диапазона с интервалом через 0,2 м для различных расходов р. Сухоны.

Расчет кривых свободной поверхности в случае заторных повышений уровня

Перед расчетом кривых свободной поверхности в случае заторных повышений уровня в узле слияния рек Сухоны и Юга необходимо было уточнить два наиболее важных вопроса: во-первых, в каких местах образуются заторы (чтобы при расчете располагать замыкающие створы на этих участках), во-вторых, при каких расходах воды рек Сухоны и Юга возникают заторы.

Анализ расходов в узле слияния в период образования заторов за 1967–1998 гг. показывает, что расходы воды в момент образования заторов не достигают максимальных за половодье, что вполне объяснимо в рамках общих представлений о формировании заторов на реках. Расходы р. Сухоны при образовании заторов за рассматриваемый период изменяется в больших пределах — от 612 до 4370 м³/с, Юга — от 368 до 1690 м³/с. В дни максимального заторного повышения уровней в узле слияния расходы р. Юг за рассматриваемый период ни разу не превысили расходы р. Сухоны.

Места образования заторов могут быть определены путем анализа морфологии русл и пойм в узле слияния [2], а также анализа данных натуральных наблюдений (таблица).

Таблица

Информация Северодвинского управления водных путей о местах образования заторов за период 1959–1998 гг.

Год	Дата затора	Место образования затора	Наивысший уровень в период заторов по в/п В.Устюг, см	
1959	22-27.04	в районе д.Бобровниково и выше	779	25.04
	23-27.04	в районе стрелки рек Сухоны и Юга		
1960	21.04	в районе д.Бобровниково	627	21.04
	21.04	в районе стрелки рр. Сухоны и Юга		
1971	24.04-1.05	Аристовские перекаты	678	25.04
1989	19-21.04	у д.Коромыслово	591	20.04
1990	12.04	у д.Бобровниково, д.Аристово	576	
1991	15-16.04	пер.Шабурный, Голодаевские	920	15.04
1992	17-22.04	Аристовские перекаты	763	21.04
1998	4.05-6.05	в районе д.Бобровниково и в районе стрелки рек Сухоны и Юг	980	5.05

При выборе замыкающих створов расчетных участков была предусмотрена возможность при моделировании разместить в любом месте условную «заторную плотину». Основной сложностью при моделировании взаимодействия потоков узла слияния рек Сухоны и Юга при заторных повышениях уровня является то, что высота «заторных плотин» при заторах неизвестна. Из-за этого при моделировании приходится действовать от обратного — для фактически наблюдавшихся заторов рассматривать, какая могла быть высота заторного повышения уровней в районе затора при известной величине уровня на водомерном посту.

Были проведены имитационные расчеты для случаев образования заторов на различных участках русла р. Малой Сев. Двины. В качестве замыкающих створов (створов с условной «заторной плотиной») были выбраны следующие: пережат Н. Бобровниковский, ухвостье острова Коневецкие Пески, пережат Средний Аристовский, пережат В. Аристовский, пережат В. Голодаевский, пережат Шабурный, стрелка рек Сухоны и Юга.

Повышение уровней воды в районе г. В. Устюг при заторах зависит от расходов воды в этот период и от места образования заторов. Например, при расходе воды р. Сухоны 3500 м³/с, р. Юг — 1000 м³/с в случае образования затора в районе Бобровниковских пережатов уровень воды по в/п В. Устюг при высоте заторного повышения уровней 4 м составил по результатам расчетов 712 см над нулем графика поста (56,46 м БС) (рис. на цветной вкладке). В аналогичной ситуации при заторе в районе стрелки рек Сухоны и Юга уровень воды по в/п г. В. Устюг составил по результатам расчетов 915 см над нулем графика поста (58,49 м БС).

При больших значениях расходов рек Сухоны и Юга повышение заторного уровня по в/п В. Устюг даже при заторе на достаточно удаленных от места слияния участках русла р. Малой Сев. Двины, например в районе Бобровниковских пережатов, может превышать 1,2 м, что будет достаточно ощутимой (с точки зрения затопления г. В. Устюг) прибавкой к стоковой составляющей уровня.

Также были рассмотрены реально наблюдавшиеся ситуации. Так, например, при моделировании ситуации в период весеннего половодья 1971 г., когда по информации Северодвинского управления водных путей ледяной затор формировался в районе Аристовских пережатов, в качестве створа с условной плотиной был выбран В. Аристовский пережат. В результате построения кривых свободной поверхности р. Малой Сев. Двины и

р. Сухоны по данным о расходах за 25.04.71 г. выяснено, что для того чтобы уровень на в/п В. Устюг достиг наблюдаемого — 676 см над нулем графика или 56,1 м БС — повышение заторного уровня должно было составить 3,0 м.

Аналогичным образом были проанализированы кривые свободной поверхности для затора 5.05.1998 г. в районе стрелки рек Сухоны и Юга. Результаты расчетов показывают, что при высоте «заторной плотины» более 4 м уровень по в/п В.Устюг мог превысить отметку 900 см над нулем графика.

Результаты расчетов заторных повышений уровня по в/п В. Устюг в случае заторов в районе Аристовских перекатов и в случае заторов в районе стрелки рек Сухоны и Юга при разных расходах рек Сухоны и Юга были обобщены в виде номограмм (рис. 3). Данные номограммы могут использоваться при соотношении расходов воды рек Сухоны и Юга $1 < Q_{\text{Сух}} / Q_{\text{Юг}} < 4$, так как другие соотношения расходов в случае образования заторов редко встречаются за имеющийся период наблюдений и не включались в расчеты для построения номограмм.

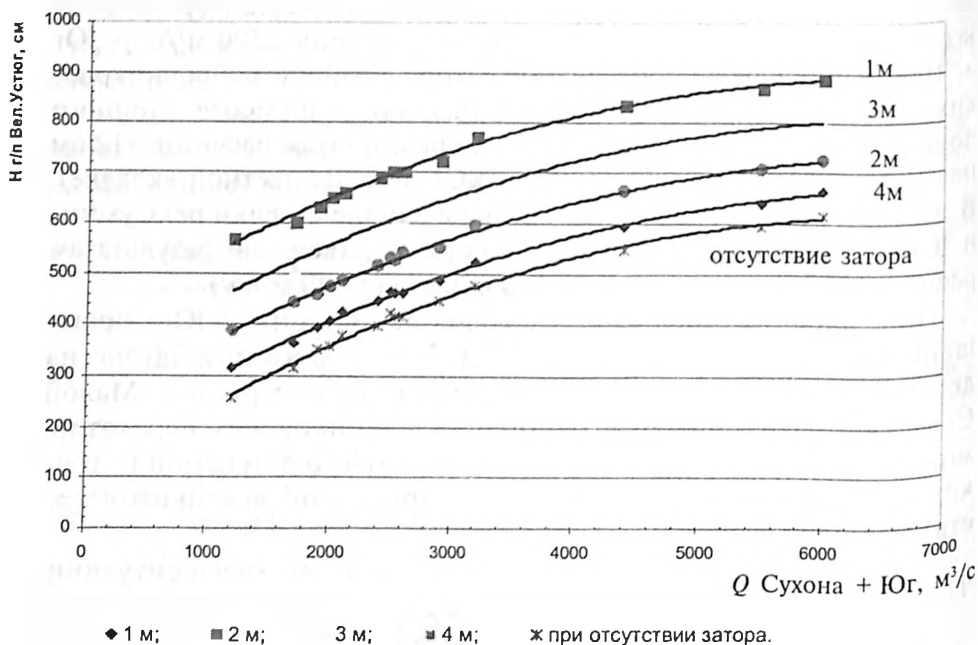


Рис. 3. Уровень по гидрологическому посту Великий Устюг при различной высоте заторного повышения уровня на перекате В. Аристовский (у оголовка острова Коневецкие пески) в зависимости от расхода р. Малой Сев. Двины

Заключение

Построенные в результате имитационных расчетов кривые свободной поверхности рек Сухоны и Малой Сев. Двины дают представление о возможных значениях отметок водной поверхности для отдельных участков узла слияния рек Сухоны и Юга при различных вариантах взаимодействия потоков в узле слияния. За счет использования подробных данных о морфометрии долин расчеты на основе гидравлической схематизации позволяют получить близкие к реальным отметки водной поверхности. Разработанная программа для построения кривых свободной поверхности может применяться для оценки возможных значений уровней воды в г. В. Устюг при возникновении заторов ниже города. Удачным вариантом обобщения результатов расчетов могут быть номограммы, отражающие величину уровня по в/п В. Устюг в зависимости от расхода воды р. Малой Сев. Двины при разных повышениях заторного уровня в местах формирования заторов.

На следующем этапе работ возможно получить более детальную картину взаимодействия потоков в узле слияния рек Сухоны и Юга и затопления пойм на основе моделей, использующих двумерную схематизацию потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ванявичус А.Ю.** Местные сопротивления и кинематика открытого потока в местах соединения. Авторефер. дис. канд. техн. наук. Л. 1986.
2. **Исследования** ледотермического режима и русловых процессов в устьях Сухоны, Юга, а также по Мал. Северной Двине для обоснования противопаводковой защиты г. Великий Устюг (1 этап). Информационный отчет кафедры гидрологии суши МГУ. М. 2000.
3. **Караушев А.В.** Речная гидравлика. Л.: Гидрометеониздат. 1969.
4. **Кумсиашвили Г.П.** Гидравлика и основы гидротехники. М.: Изд.-во МГУ. 1998.
5. **Никитина Н.А.** Русловые процессы в узлах слияния рек. Дис. канд. техн. наук. М. 1989..
6. **Чугаев Р.Р.** Гидравлика. Л.: Энергоиздат. 1982.

НАВОДНЕНИЯ НА РЕКЕ ЛЕНЕ: ПРИЧИНЫ И ПУТИ СМЯГЧЕНИЯ

Асариин А.Е., доктор техн. наук (ОАО «Институт Гидропроект»)

Общие сведения

Давно известная проблема наводнений на р. Лене и ее притоках [1, 2, 3, 4, 5, 7, 9] резко обострилась в последние годы, когда весной 1998 и особенно 2001 года страна напряженно следила за надвигающимся, а затем наступившим затоплением г. Ленска и чудом не состоявшимся наводнением в столице Якутии.

Интенсивно обсуждавшиеся по горячим следам (летом 2001 г.) причины случившегося и пути предотвращения или смягчения последствий наводнений в будущем требуют обстоятельного и профессионального анализа. В числе первоочередных задач обширного комплекса необходимых проектных работ и научных исследований следует указать современную оценку максимальных расчетных расходов и уровней воды Лены и ее притоков, применительно к которым должны рассчитываться и проектироваться защитные или противопаводковые мероприятия. Необходимость опережающих гидрологических исследований может быть иллюстрирована на примере печально известного затопления г. Ленска. Согласно данным ведущих специалистов Государственного гидрологического института (ГГИ) [6], при разработке в 1991 г. генерального плана города максимальный расчетный уровень воды 1%-й обеспеченности был определен равным 170,07 м БС. В катастрофическое наводнение в мае 2001 г. уровень воды у г. Ленска достиг отметки 172,58 м БС. По расчетам ГГИ отметка максимального уровня 1%-й обеспеченности, применительно к которой должна быть запроектирована и построена дамба для защиты г. Ленска, равна 171,87 м*.

В подобном анализе, завершающемся установлением максимальных расчетных уровней, отбивкой зон возможного затопления на топографических картах и передачей этих сведений администрации разного уровня нуждаются многие участки Лены и ее притоков, где должна быть обеспечена безопасность населения и хозяйства.

Подобная информация, которая должна стать, по меньшей мере, общедоступной, а лучше массово распространяемой среди населения региона, позволит выявить населенные места (или их участки) и хозяйственные объекты, подверженные затоплению и подтоплению, а также недостатки существующих сооружений инженерной защиты.

*Эта отметка практически совпадает с последней оценкой 1%-го уровня воды, данной специалистами Якутского управления Росгидромета, — 171,91 м.

Как указывалось выше, затопления значительных территорий в долинах крупных рек Якутии, связанные, в частности, со специфическим ледовым режимом этих рек, известны с первых лет освоения Восточной Сибири. Так, наводнения на р. Лене у г. Киренска в девятнадцатом столетии происходили в 1820, 1841, 1843, 1845, 1848, 1852, 1875 гг. [9]. Все эти наводнения сформировались в результате заторов льда и принесли значительные убытки. Например, в 1841 г. «деревушку в четыре дома ниже г. Киренска унесло со льдом и 23 человека тоже; люди были пойманы около Витима. По разным деревням скота водою вынесено несть числа». Значительная часть г. Киренска была затоплена весной 1915 г. При этом подъем воды над зимней меженью в некоторых пунктах достигал 15 м. В результате этого наводнения было разрушено свыше 30 селений, причем «у некоторых из них льдом были совершенно снесены не только строения, но и плодородные слои земли на пашнях и огородах». Город Киренск в течение 44-х лет наблюдений затоплялся 28 раз. В двадцатом веке он подвергался значительному затоплению при заторах льда в мае 1930 и 1966 гг.

По данным наблюдений почти за 200 лет, г. Якутск подвергался значительному затоплению более 15 раз. Наводнения были в 1807, 1809, 1830, 1848 и в другие годы. Особенно большим было наводнение весной 1864 г.: 25 мая в результате затора уровень воды поднялся над его зимним положением более чем на 13 м. Затопление города проходило при сильном ветре, в результате чего на улицы города были занесены огромные массы льда. В г. Якутске остались незатопленными только некоторые наиболее возвышенные места, а отдельные дома оказались в воде до крыш. С конца девятнадцатого века по настоящее время большие наводнения, вызванные заторами льда в г. Якутске, наблюдались 12 раз: в 1894, 1902, 1904, 1907, 1913, 1917, 1924, 1933, 1958, 1966, 1998 и 2001 гг. Из них самым выдающимся было наводнение 1933 г., которое уступало только наводнению 1864 г. При образовании мощных заторов льда редкой повторяемости затоплению подвергается и ряд других населенных пунктов, расположенных по берегам Лены. Так, в 1915 г. при заторе льда очень сильно был затоплен пос. Мухтуя (г. Ленск). В 1966 г. город Ленск подвергся также значительному затоплению, когда под водой оказалось 2/3 территории города, а отдельные дома, расположенные на берегу, были разрушены льдом. Город был существенно разрушен в результате заторного наводнения весной 1998 г. и практически полностью снесен во время весеннего ледохода 2001 г.

Мощные заторы льда на р. Лене ниже г. Якутска образуются реже, чем на верхнем ее участке. Сведений о значительных затоплениях населенных пунктов в нижнем течении р. Лены мало, так как долины реки слабо обжиты, а в прошлом вообще наблюдалось отсутствие поселений или относительно высокое расположение имеющихся селений.

В 1949 и 1963 гг. при заторе льда на устьевом участке р. Олекмы было полностью затоплено с. Куду-Кель, при этом отдельные дома в нем были затоплены до окон и выше их. В 1949 г. остались незатопленными только магазин, склады и медпункт. В 1950, 1958, 1959, 1966 гг. этот поселок подвергся затоплению в меньших размерах.

Иногда при образовании заторов льда на устьевом участке р. Алдана сильно затапливаются пос. Хара-Алдан (1963, 1966 гг.) и с. Батамай (1958 г.).

В 1978 г. образование мощных заторов льда отмечалось в среднем и нижнем течении р. Лены. Основной причиной заторообразования на р. Лене следует считать относительно раннюю весну в верхнем ее течении и затяжную в среднем и нижнем течении. Ледяной покров, сохраняющий в таких случаях большую прочность, взламывается под механическим воздействием сформировавшейся волны половодья в верховьях (относительно невысокой в этом году: вскрытие на Средней Лене началось практически при низких уровнях воды), что привело к образованию мощных заторов льда.

Вскрытие Лены до впадения Олекмы происходило раньше обычных сроков на 4 – 5 дней. По мере продвижения волны вскрытия вниз по течению процесс замедлился, встречая на своем пути более толстый и плохо подготовленный лед. Заторы стали формироваться чаще и увеличилась их мощность.

Мощные заторы льда сформировались на р. Лене у населенных пунктов Саньяхтата, Намцы, Сангар, Косюра. При этом, максимальные уровни, отмеченные весной 1978 г., превысили исторические уровни, тоже заторного происхождения.

Катастрофических масштабов наводнения на реках бассейна р. Лены достигли в 1998 г. [3,9]. Резкое повышение температуры воздуха привело к интенсивному вскрытию рек Лены, Алдана, Олекмы, Амги и образованию на них ледяных заторов. От г. Ленска до с. Жиганска на расстоянии 1754 км из-за множественных заторов уровни весеннего половодья существенно превысили отметки бровок берега, что привело к повсеместным затоплениям прибрежных населенных пунктов, а на Алдане, Амге, на всем протяжении, и в низовьях Вилюя уровни были экстре-

мально высокими. В 10 пунктах указанных рек были на 100 – 166 см превышены уровни, ранее считавшиеся рекордными.

Из-за образования мощного затора в районе Наторинского и Батамайского островов, где толщина паковых льдов доходила до 17 м при площади ледовых полей более 10 км², был затоплен на 95% город Ленск. При этом уровень воды превысил критическую отметку почти на 3 м.

Во время наводнений 1998 г., по данным МЧС России, в зоне затопления и подтопления находилось 23 улуса, 203 населенных пункта, в которых проживают более 500 тыс. человек. Были затоплены 15403 жилых дома (483 — разрушены), 934 административных здания, 438 объектов соцкультбыта, разрушен 341 мост, 280 опор ЛЭП, размыты 2559 км дорог и 234 защитных дамбы, уничтожено 38780 га сельхозугодий. От наводнения пострадало 96821 человек, были эвакуированы 51595 жителей, 15 человек погибли. Суммарный ущерб от наводнений по республике в 1998 г. оценивается в 242 млн. долл. [9].

Наибольшую известность, в основном усилиями средств массовой информации и, в первую очередь, телевидения, приобрело катастрофическое наводнение у г. Ленска весной 2001 г. Максимальный уровень воды 18 мая достиг отметки, превышающей на 9,5 м среднее многолетнее значение и на 6,6 м критическую отметку начала подтопления города. К числу неблагоприятных условий, вызвавших столь высокий подъем уровня, следует отнести чрезвычайно высокий уровень воды на средней Лене перед ледоставом и повышенную, против среднего многолетнего значения, толщину льда к концу зимы 2000/2001 г.: выше Ленска — 75 — 105 см, на участке г. Ленск — с. Нюя — 150 — 190 см. Все выше указанное плюс ночные понижения температуры в дни ледохода способствовало длительному сохранению высокой прочности льда и образованию заторов ниже и выше города. Первые подвижки льда начались при экстремально высоком уровне воды, и заторный подъем уровня сразу привел к затоплению части городской территории. Начатые при этом активные ледовзрывные действия ожидаемого эффекта не дали и даже «способствовали сосредоточению заторного скопления льда из трех очагов в один, обусловив катастрофический подъем уровня воды» [4].

Явления, подобные имевшему место в районе г. Ленска в мае 2001 г. и описанному выше, вызывают подавляющую часть наводнений на Лене и в устьевых зонах ее основных притоков. Лишь на Олекме и Алдане и его притоках, где максимальный сток может иметь как снеговое, так и ливневое происхождение (или их сочетание), имеют место наводнения, не связанные с ледовыми заторами.

На тех же реках или участках рек, где максимальные уровни воды связаны с неблагоприятным сочетанием высоких половодных расходов воды и подпором от ледовых заторов, вклад указанных факторов в подъем уровня воды и, соответственно, в масштабы наводнения может быть различным.

Так, катастрофическое наводнение 1966 г., когда крупный затор имел место на устьевом участке Алдана, масштабы ущербов от которого в бассейне Лены были превышены лишь в 1978 и 1998 гг., было результатом очень высокого половодья на самом Алдане. В то же время максимальные расходы воды весной 1966 г. составили 13 000 м³/с на Олекме и лишь 21 600 м³/с на Лене у г.п. Крестовский (несколько ниже 13 000 г. Ленска), а их обеспеченность около 3 и 25% соответственно.

В 1978 г. с еще большим и также почти повсеместным наводнением максимальные расходы воды были относительно невелики и составили 25000 м³/с у г.п. Крестовский, 7000 м³/с на Олекме и 12 000 м³/с на Витиме, что соответствует обеспеченностям порядка 8 – 10%.

Из сказанного и публикаций [3, 4, 9] следует, что высота весеннего подъема уровня воды и, соответственно, масштаб затопления прибрежных территорий зависит не только и не столько от параметров (объема и максимального расхода воды) половодья, сколько от сложившейся к концу зимы ледовой обстановки и хода температуры воздуха в начале и в течение ледохода.

Это также означает, что только уменьшение максимальных половодных расходов воды в Лене и ее притоках при создании на них водохранилищных гидроузлов не может обеспечить с должной надежностью безопасности прибрежных населенных пунктов.

Обзор проработок прошлых лет

Основные предпроектные работы по гидротехническому строительству на р. Лене и ее притоках, обладающих очень большим гидроэнергетическим потенциалом, связаны с энергетическим использованием водотоков ленского бассейна. Краткое изложение их результатов (за исключением схем энергетического использования Алдана и Вилюя, впадающих в Лену на 100 и 300 км ниже Якутска, и проработок по Нижне-Ленской ГЭС, подпорный уровень которой должен быть ниже 80 м, чтобы не подтопить г. Якутск, поскольку в нижнем течении Лены в связи с малой освоенностью территории ущербы от наводнений незначительны) приводится ниже.

Река Лена. Техничко-экономическим докладом по Схеме использования р. Лены (1968 г.) предусматривалось сооружение на ней

каскада из трех ГЭС: Мухтуйской (Ленской) с НПУ 247,0 м в Мухтуйском створе, в зону затопления которой попадал нижний участок р. Витима с подтоплением Мамаканской ГЭС, населенные пункты Витим, Пеледуй и др.; Якутской с НПУ 162,0 м в створе 130 км выше г. Якутска с затоплением «Ленских столбов», г. Олекминска и подтоплением г. Ленска; Нижне-Ленской с НПУ 91,0 м и подтоплением г. Якутска.

В более поздней Схеме 1984 г. была принята во внимание необходимость значительного уменьшения площадей затоплений на р. Лене и учета интересов других отраслей народного хозяйства. На верхнем участке реки до г. Ленска намечено две схемы использования: двухступенная с Ленской ГЭС-I (НПУ 247,0 м) в створе выше устья Витима и Ленской ГЭС-II (НПУ 180,0 м) в Мухтуйском створе; и одноступенная схема, предусматривающая строительство Ленской ГЭС с НПУ 230,0 (215,0 м) в створе несколько ниже устья р. Витима (2701,5 км от устья Лены). Двухступенная схема позволяет избежать больших затоплений в устье р. Витима, населенных пунктов Витим и Пеледуй. При одноступенной схеме энергетически используется сток р. Витима, который в этом створе в 1,5 раза превышает сток самой Лены, однако существенно возрастает ущерб от затоплений (в том числе в устьевой зоне самого Витима).

Использование среднего участка Лены также намечалось в двух ступенях. Нижняя из них — Якутская ГЭС с НПУ в 130,0 м в новом створе в 200 км выше г. Якутска — позволяет избежать затопления «Ленских столбов», сохранить ледовый покров реки в зимнее время в г. Якутске и избежать затопления ряда примыкающих к Якутску районов, а также г. Олекминска в верхнем бьефе. Верхняя ступень — Чапаевская ГЭС с НПУ 158,0 м — расположена в Олекминском створе (2214 км от устья Лены).

Ввиду сомнительной целесообразности использования ленских гидроузлов, размещаемых в слабоосвоенном и малолюдном нижнем течении реки (ниже впадения р. Вилюя), вопрос о строительстве крупных Нижне-Ленских ГЭС, предельная подпорная отметка которых из соображений неподтопления г. Якутска и прилегающих населенных пунктов не должна превышать 80 м, в настоящей работе не рассматривается.

Помимо упомянутых выше схем гидроэнергетического использования водотоков бассейна Лены, вопрос о строительстве гидроузлов на основном стволе рассматривался в разработанном в 1983 г. «ТЭО транспортного освоения Верховья р. Лены». В этой работе была показана экономическая нецелесообразность строительства

гидроузлов, включающих также ГЭС на Верхней Лене. Однако при возложении на Верхнеленское водохранилище противопаводковых функций комплексная эффективность Верхне-Ленского гидроузла может оказаться приемлемой, а выполнение углубленных проектных проработок целесообразным.

Река Олёкма. Для энергетического использования доступен участок р. Олекмы ниже пересечения ее долины БАМом, что определяет и предельную отметку НПУ водохранилища.

Кроме того, в 1983 г. в бассейне р. Олекмы организован государственный заповедник. Территория заповедника расположена на правом берегу р. Олекмы от р. Тас-Хайко до р. Бедердах и тянется вдоль реки на 130 км.

С учетом этих обстоятельств на этом участке были выявлены наиболее перспективные створы для каскада из двух ГЭС: Олекминской с основным регулирующим водохранилищем и Нижне-Олекминской — контрбьефа. Ниже границы заповедника выявлена зона распространения известняков, частично закарстованных; значительная ширина долины и неопределенность возможного подпора от гидроузлов на р. Лене практически исключают возможность размещения гидроузлов в обозримой перспективе.

Выше трассы БАМа условия для сооружения ГЭС на р. Олекме резко ухудшаются, поскольку сток реки уменьшается вдвое (т.к. ниже впадают основные притоки рек Нюкжа и Хани), долина реки широкая — более 1,5 км и неблагоприятны геологические условия — сейсмичность более 9 баллов.

Причины наводнений на Лене и ее притоках и пути уменьшения экономических и социальных потерь

Анализ причин и последствий рассматриваемого явления следует предварить его разделением на два понятия: затопление прибрежных территорий и наводнение. Первое из них есть результат выхода воды в долину реки из русла, которое не может пропустить приточные расходы воды как ввиду их экстремально высокого значения, так и из-за стеснения русла (островами, опорами и дамбами мостовых переходов или ледовым материалом). Второе — это затопление хозяйственно освоенных и населенных территорий, приводящее к экономическим (разрушение хозяйственных и жилых строений, мостов, дорог, линий электропередач и связи, смыв плодородного слоя почвы и др.) и социальным (гибель людей, потеря личной собственности и, в частности, крова, проживание с сознанием постоянной угрозы и т.п.) ущерbam.

Затопления долины Лены (и долин ее притоков) происходили в течение многих веков и происходят в наше время в экстремально высокие половодья после многоснежных зим при интенсивном снеготаянии, а также в умеренно высокие половодья, проходящие при неблагоприятных условиях вскрытия рек и течения ледохода.

Наводнения на затапливаемых землях связаны с двумя основными факторами: природными колебаниями речного стока и размещением городов и поселков (или их части) на низкорасположенных территориях, заведомо подверженных затоплению с периодичностью 10 и менее лет и лишенных инженерных систем противопаводковой защиты, главным элементом которых должны быть дамбы обвалования, недостаточная высота которых (и их прорыв при переливе воды) может усугубить последствия наводнения.

Отечественной и мировой практикой защиты от речных наводнений определен состав технических мероприятий, позволяющих решать эту задачу. Выбор наиболее эффективных решений определяется особенностями морфометрии реки, режимом паводковой волны, влиянием заторных и зажорных явлений, хозяйственным освоением прибрежных территорий и пр. Состав этих мероприятий:

- сооружение защитных дамб, обваловывающих защищаемую территорию, сопровождаемое сооружением дренажных систем, насосных станций и пр.;

- строительство противопаводковых гидроузлов с объемом водохранилищ, позволяющим осуществить срезку максимальных уровней на нижележащем участке реки;

- вынос жилой застройки и хозяйственных объектов на незатапливаемую территорию;

- создание островков безопасности обвалованием либо намывом грунта и повышением отметок поверхности используемой территории;

- дноуглубление русла реки, спрямление и расширение межостровных протоков, т.е. увеличение его пропускной способности с соответствующим снижением уровней паводковой волны;

- комбинация вышеуказанных мероприятий.

Каждое из этих решений имеет свои преимущества и недостатки, и выбор их эффективного сочетания является сложной задачей, требующей учета множества факторов как технического, так и социального характера. Например, создание обвалований территории и тем самым сужение поймы реки приведет к повышению половодных уровней воды на вышележащем участке реки. Создание противопаводковых водохранилищ, в особенности на реках с малыми ук-

лонами, может быть сопряжено с затоплением территории и ущербом, сопоставимым или даже превышающим ущерб от наводнений ниже гидроузла. Значительные проблемы может создать и переселение населения на участки, значительно удаленные от русла реки.

В бассейне р. Лены противопаводковые мероприятия до сего времени ограничивались сооружением защитных дамб на отдельных участках в районе городов Якутска и Ленска. Разработка и реализация полной программы решения проблемы, учитывая ее масштабы, потребует значительных средств и времени.

Ниже приводятся предварительные соображения лишь об одном из направлений деятельности по уменьшению ущербов от наводнений в долине Лены — строительстве гидроузлов с регулирующими водохранилищами.

Анализ формирования половодий на р. Лене показывает, что значительная часть половодного стока р. Лены образуется на основных ее притоках: Киренге (15 км^3), Витиме (47 км^3), Олёкме (32 км^3), Алдане (126 км^3), Вилюе (45 км^3). В половодье вероятностью превышения 1% он составляет 470 км^3 .

Преыдушие проработки по выбору створов гидроузлов для использования энергетического потенциала бассейна р. Лены были направлены на определение их местоположения с минимально возможным затоплением территории образуемыми водохранилищами.

Определение параметров и местоположения противопаводковых водохранилищ требует подхода, аналогичного с изменением подходов к режиму регулирования стока, что не скажется существенно на принципиальных решениях. Поэтому предварительные выводы об эффективности и целесообразности строительства противопаводковых водохранилищ можно сделать на основе анализа результатов предпроектных проработок прошлых лет.

Для суждения о потенциальных противопаводковых возможностях водохранилищ на р. Лене и ее притоках может служить схема размещения образующих их гидроузлов, показанная на рисунке, а в таблице приведены соотношения их объемов (полного и полезного) и объемов половодного стока рек в створах гидроузлов.

Поскольку все указанные в таблице гидроузлы (кроме Верхне-Ленского) первично намечались как энергетические, в них предусматривался значительный мертвый объем (или, точнее, неглубокая сработка, примерно на $1/3$ напора при НПУ) для предотвращения чрезмерного снижения напора на турбины и, соответственно, ее мощности при существенном понижении предвесеннего уровня водохранилища. При возложении на водохра-

Таблица

Гидроузел	Река	Объем водохранилища, км ³		Объем половодья, км ³	
		полный	полезный	P=5%	P=1%
Верхне-Ленский	Лена	6,6	6,3 (63)	8,5	10,0
Ленский I	"	18,8	12,3 (15)	55,0	60,0
Ленский II (Мухтуйский)	"	96,6	40,1 (70)	100,0	112,0
Якутский	"	35,5	15,5 (28)	176,0	198,0
Шороховский	Киренга	21,7	9,1 (16)	12,0	14,0
Мокский	Витим	20,2	13,2 (16)	20,0	23,0
Олекминский	Олекма	13,7	6,1 (10)	22,0	26,0

нилища противопаводковых функций, с неизбежным уменьшением энергетического эффекта, регулирующий объем их может быть несколько увеличен за счет понижения УМО. Примерные значения увеличенного противопаводкового объема водохранилищ показаны в скобках. Из сопоставления этих (предельно-возможных) регулирующих объемов с объемами стока половодий можно сделать следующие предварительные выводы.

Верхнеленское водохранилище может существенно срезать максимальный расход Лены, равный 3850 м³/с при обеспеченности 5% и 4900 м³/с при P = 1%, значительно повысив безопасность г. Усть—Кут и ряда других населенных пунктов. Возможности водохранилища гидроузла Ленский-I гидроузла относительно меньше, так как располагаемый регулирующий объем составляет около 25% объема половодного стока.

Гидроузел Ленский-II (Мухтуйский) располагает очень емким водохранилищем и теоретически может быть существенно более эффективным. Однако затопляемая водохранилищем территория чрезвычайно велика. В зону затопления попадает множество населенных пунктов, перспективные месторождения полезных ископаемых и т.д. Следует рассмотреть вариант с несколько пониженным НПУ для сокращения площади затоплений в зоне водохранилища с акцентом на выполнение им функций задержания ледового материала и сокращения заторных явлений на нижележащем участке, при этом имея в виду сокращение навигационного периода на участке выше плотины.

Противопаводковый эффект Якутского водохранилища с регулирующим объемом около 15% половодного стока также весьма умерен, и при уменьшении расчетной выработки электроэнергии

(из-за понижения отметки УМО) и, соответственно, энергетической составляющей экономического эффекта, его целесообразность не может быть обоснована.

Противопаводковый объем Шороховского водохранилища существенен при сохранении уровня сработки, принятого в схеме энергетического использования р. Киренги. Оно способно уменьшать более чем вдвое, т.е. на 2000 – 3000 м³/с, максимальный расход воды в реке и сократить ущербы от наводнений в устьевой зоне Киренги и на небольшом участке долины Лены. Однако на безопасность г. Ленска, где максимальные расходы воды составляют около 30000 м³/с, Шороховское водохранилище может повлиять весьма незначительно.

Потенциальный эффект срезки расходов Олекминским водохранилищем с регулирующим объемом водохранилища, составляющим около 40% объема стока расчетных половодий, заметно больше чем Шороховского. Оно может уменьшить максимальные расходы Олекмы на 6000 ... 8000 м³/с, существенно сократить затопливаемую площадь в долине нижней Олекмы и, возможно, несколько смягчить (в сочетании с водохранилищем гидроузла Ленский II) условия в районе г. Ленска.

Реальные возможности сокращения ущербов от наводнений в долине Лены

Предварительные соображения о противопаводковом эффекте гидроузлов с регулирующими водохранилищами приводятся ниже.

Защита района г. Усть-Кут. Верхне-Ленский гидроузел, створ которого намечен в 20 км выше г. Усть-Кут, при принятой в проекте 1983 г. полезной емкости водохранилища 6,3 км³ и объемах половодья обеспеченностью $P = 1$ и 5% соответственно 10,0 и 8,5 км³ позволит срезать максимум половодной волны и защитить от затопления территорию от створа гидроузла до устья р. Киренги. Поскольку проработки по этому гидроузлу не выявили серьезных противопоказаний по зоне затопления его водохранилищем и учитывая близящееся завершение строительства «малого БАМа», режим работы Верхне-Ленского гидроузла может быть подчинен решению задачи борьбы с наводнениями на участке р. Лены протяженностью 500 км.

Участок от устья р. Витима до г. Якутска (города Ленск, Якутск, Олёкминск и др.). На этом участке половодная волна формируется в значительной степени притоками р. Лены — Витимом и Олёкмой. Объем половодья этих рек обеспеченностью $P = 1$ и 5% составляет соответственно 40 и 47 км³ на Витиме и 28 и 32 км³ на Олёлке.

Анализ противопаводковых возможностей водохранилищ, рассматривавшихся в схемах энергетического использования рек, показал, что регулирование стока может дать эффект лишь при сооружении на основном стволе р. Лены водохранилища в Мухтуйском створе, с полезным объемом около 40 км³ (НПУ 247,0 м) в дополнение к энергетическому гидроузлу на р. Олёкме. Однако подпорный уровень Мухтуйского водохранилища при отметке НПУ 247 м значительно выше естественного уровня половодья 1%-й обеспеченности. Это может означать, что затопление водохранилищем сопоставимо с площадью защищаемых земель в нижнем бьефе гидроузла. Необходимая оценка противопаводковых возможностей этого водохранилища при более низком подпорном уровне требует специальных проработок. Тем не менее можно полагать, что некоторое уменьшение максимальных расходов воды и сокращение ледового материала на этом участке при создании плотины в Мухтуйском створе, возможно, позволит решить задачу снижения заторных уровней.

Таким образом, представляется, что задача понижения максимальных уровней воды на участке устье р. Витим — Якутск сооружением гидроузлов на реках Лене, Витиме и Олёкме реального решения не имеет.

Более эффективным здесь может быть комплекс мероприятий в виде обвалования территорий, выноса объектов на незатапливаемые участки и строительства энергетических гидроузлов на реках Витиме и Олёкме (если их экономическая целесообразность будет доказана) с попутным противопаводковым воздействием.

Некоторые дополнительные соображения

Говоря о возможном противопаводковом эффекте регулирования стока (срезке пиковых расходов половодья) водохранилищами, следует иметь в виду особенности формирования максимальных заторных уровней воды на двух участках долины Лены, особенно часто подверженных наводнениям. Границами первого из них протяженностью около 600 км, где расположен г. Ленск, являются устья рек Витима и Олёкмы. На втором участке длиной около 1300 км, где находится столица республики г. Якутск, граничными пунктами являются места впадения Олёкмы и Алдана.

На первом участке ледоход начинается на первой фазе половодья, максимальный расход воды наблюдается примерно через полмесяца после формирования максимального ледоходного уровня воды. Таким образом, основными факторами, определяющими высоту заторного уровня на первом участке,

являются максимальный осенний уровень воды, при котором формируется ледостав, и толщина льда перед его весенним вскрытием.

На втором участке максимальный расход половодья наблюдается вскоре (через 5 ... 10 дней) после начала ледохода и в ряде случаев совпадает с моментом наибольшего ледоходного уровня. В среднем расход воды, соответствующий максимальному ледоходному уровню, равен 90% максимального расхода половодья.

Таким образом, на первом участке для понижения максимальных заторных уровней воды и сокращения площади затопления и ущербов от наводнения в зоне г. Ленска может оказаться эффективным как уменьшение половодных расходов воды, так, особенно, аккумуляция ледового материала в Ленском-II (Мухтуйском) водохранилище.

Срезка же Мухтуйским водохранилищем (регулирующий объем которого даже при пониженном НПУ может составить примерно 30 км³) максимального половодного расхода воды на 10 — 15 тыс. м³/с может благотворно сказаться на пике половодья и, соответственно, на максимальном уровне воды в районе г. Якутска.

Для количественной оценки противопаводкового эффекта каждого из указанных выше водохранилищ, а также их общего воздействия необходимы специальные исследования с использованием математической модели формирования и прохождения половодной волны и ледохода в бассейне Лены. Эта модель может также сыграть существенную роль для совершенствования прогноза ледовых заторов и, соответственно, максимальных уровней воды на паводкоопасных участках Лены и ее притоков. Методы прогноза заторов [2, 5 и др.] требуют актуализации и обширной исходной метеорологической информации, включая прогноз предстоящего хода температуры воздуха.

При наличии Шороховского гидроузла на Олёкме, водохранилище которого, как показано выше, может обеспечить срезку максимальных половодных расходов воды на 6 — 8 тыс. м³/с, суммарный противопаводковый эффект названных водохранилищ может оказаться существенным.

Что нужно делать

Представляется необходимым выполнение следующих первоочередных работ:

нанесение на современные топографические карты масштаба 1:50000 или 1:25000 максимального уровня воды вероятностью превышения 1% и передача этих карт правительственным органам субъектов Федерации и местным администрациям;

систематизация данных о гидрологических и ледотермических условиях и анализ причин половодий 1998–2001 гг. на Лене (в районах Усть-Кута, Ленска и Якутска) и на ее притоках;

выявление участков речной долины и населенных пунктов, затопление которых в 1998 и 2001 гг. могли бы предотвратить локальные обвалования достаточной высоты и протяженности;

обоснованная оценка ущербов от наводнений 1998 и 2001 гг., а также систематизация данных об ущербах от наводнений на различных участках Лены и ее притоков за последние 30 лет;

построение имитационной математической модели формирования и прохождения половодий и ледохода на Лене и ее притоках;

разработка схемы комплексного использования водных ресурсов и противопаводковых мероприятий в бассейне р. Лены;

разработка обоснования инвестиций (корректировка ТЭО) в строительство Верхне-Ленского гидроузла;

составление обоснования инвестиций в строительство Мухтуйского гидроузла с пониженным НПУ;

составление обоснования инвестиций в строительство Шоровского гидроузла на р. Киренге;

составление обоснования инвестиций в строительство инженерных систем защиты городов Ленска, Якутска и Олёкминска.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зайков Б.Д.** Высокие половодья и паводки на реках СССР за историческое время. Л.: ГМЗ. 1954.
2. **Кильмянинов В.В.** Анализ условий формирования и долгосрочный прогноз заторных уровней на Лене. //Метеорология и гидрология. 1992. № 4.
3. **Кильмянинов В.В.** Условия формирования наводнений при заторах льда на Средней Лене в 1998 и 1999 гг. //Метеорология и гидрология. 2000. № 10.
4. **Кильмянинов В.В.** Катастрофическое наводнение на р. Лена у г. Ленск в 2001 г. //Метеорология и гидрология. 2002. № 12.
5. **Лисер И.Я.** Весенние заторы льда на реках Сибири. Л: ГМИ. 1967.
6. **Лобанов В.А., Рождественский А.В.** Оценка безопасности действующих гидротехнических сооружений на основе уточнения расчетных максимальных расходов воды. Сборник трудов Международного симпозиума «Гидрологические и гидравлические аспекты безопасности гидротехнических сооружений». ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. С-Петербург. 2002.
7. **Нежиховский Р.А.** Наводнения на реках и озерах. Л.: 1988.
8. **Ресурсы поверхностных вод СССР.** т.17, Лено-Индибирский ГМЗ район, 1972.
9. **Таратугин А.А.** Наводнения на территории Российской Федерации. МПР России. РосНИИВХ. Екатеринбург. 2000.

О СИСТЕМЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЕДОВЫХ ЗАТОРОВ (ЗАЖОРОВ) НА РЕКАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И БОРЬБЕ С НИМИ

*Шаталина И.Н., Трезуб Г.А. кандидаты техн.наук
(ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»)*

Ежегодно на реках Российской Федерации в период вскрытия образуются заторы, вызывающие подъем уровня воды и затопление окружающей местности. В последние годы такие явления наблюдались на реках Лене, Печоре, Амуре, реках Северо-Запада и др. При их ликвидации были широко использованы взрывы, как наиболее действенный и быстрый инструмент воздействия на заторные скопления. Такой способ является далеко не единственным в борьбе с заторами, и, кроме того, взрывы могут привести к нарушению экологического состояния реки.

Необходимо создание системы мероприятий, в которой комплексно применялись бы меры предупреждающего характера, меры регулирующие и снимающие опасность заторообразования, защитные меры, позволяющие снизить катастрофические заторные уровни, и только в крайнем случае допускалось бы применение взрывных работ и бомбометания, когда остальные мероприятия оказываются мало эффективными. Эта система должна быть сконцентрирована в методических рекомендациях по предотвращению образования ледовых заторов и борьбе с катастрофическими заторными подъемами уровня воды.

Разработка «Методических материалов по предотвращению образования ледовых заторов (зажоров) на реках Российской Федерации и борьбе с ними» выполнена по заданию МЧС. В подготовке рекомендаций, кроме ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», принимали участие Государственный гидрологический институт (ГГИ), Университет природообустройства (МГУП), Институт водных проблем (ИВП РАН), объединение «Кировский завод» и др. Подготовленные «Методические материалы по предотвращению образования ледовых заторов (зажоров) на реках Российской Федерации и борьбе с ними» разработаны с использованием «Методических указаний по борьбе с заторами и зажорами льда» (ВСН-028-70/Минэнерго СССР), переработаны и дополнены с учетом современного опыта прогнозирования и регулирования заторных процессов для заблаговременного принятия мер по борьбе с заторами и предотвращения катастрофических наводнений.

Первоначальный вариант «Методических материалов» подготовлен В.Н. Карновичем (ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»). Дальнейшая разработка документа выполнена в ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» группой авторов в составе: А.Б. Векслера, А.Г. Василевского, Г.А. Трегуба, И.Н. Шаталиной, А.М. Швайнштейна, А.А. Косарева - с привлечением сотрудников других организаций: В.К. Дебольского (ИВП РАН), В.А. Бузина (ГГИ), Д.В. Козлова (МГУП), А.И. Гительмана (ОАО «Кировский завод»), В.Г. Чуприкова, О.З. Степанова (Инженерный центр судостроения).

При работе над окончательной редакцией документа были учтены ценные пожелания и замечания, высказанные Д.В. Штеренлихтом (МГУП), И.Л. Калюжным (ГГИ), В.Д. Новожеиным, А.Е. Асариным (ОАО «Институт Гидропроект»), В.А. Кореньковым (Государственная водная служба Главного управления природных ресурсов и охраны окружающей среды по Красноярскому краю), А.Л. Великановым (ИВП РАН), Ю.А. Лалазаровым (ДПЛЧС МЧС России), Ю.В. Налимовым (ААНИИ), С.В. Борщ (Гидрометцентр РФ).

При разработке «Методических материалов» учтен опыт прогнозирования и регулирования заторных и зажорных процессов, современные способы борьбы с заторными подъемами уровня воды:

руслорегулирующие сооружения и сооружения по отводу поверхностного стока выше затора (зажора) или образованию искусственных заторов;

использование технических методов по предотвращению образования заторов, таких как прорезание льда, ослабление его за счет солнечной радиации и применения химических веществ;

использование технических методов для разрушения уже образовавшихся заторов (ледоколы, аэрогидродинамический метод, взрывы, бомбометание и т.д.);

инженерные методы защиты территорий при катастрофических наводнениях из-за заторных и зажорных подъемов уровня воды (обвалование, искусственное повышение поверхности территории и т.д.).

Следует отметить сложность, а часто и неадекватность принятия мер против такого природного явления, как заторы льда, интенсивность образования, время жизни и разрушения которых зависит от огромного числа факторов, учесть которые весьма сложно, начиная от характера вскрытия реки и кончая мельчайшими нюансами поведения льда в водном потоке. Методические рекомендации — это пособие и руководство к действию, в первую очередь, для специалистов различного профиля: специалистов МЧС, гидрологов, строителей-гидротехников, геологов, взрывников и саперов, сотрудников водного транспорта, авиаторов, ледокольщиков. Успех дела зависит в

значительной степени от квалификации специалистов, планирующих и осуществляющих комплекс мероприятий по борьбе с заторами.

Система мероприятий по предотвращению образования заторов и борьбе с ними включает:

прогнозирование возможных участков и зон возникновения и распространения ледовых заторов, а также параметров катастрофических наводнений при максимальных заторных уровнях воды и мощности затора;

предупредительные меры, предотвращающие образование заторов, к которым относятся: беззаторный пропуск льда, создание искусственных заторов, безопасных для окружающей местности, аккумуляция ледового материала, в том числе на притоках, уменьшение прочности льда; создание различного рода каналов;

борьбу с заторными подъемами уровня воды и катастрофическими наводнениями путем освобождения реки ниже затора от ледяного покрова, создания каналов во льду и обводных каналов, устройства проранов в теле затора, инженерной защиты территорий;

борьбу с уже образовавшимися заторами путем вскрытия реки ниже затора, использования взрывов, бомбометания, резонансных методов разрушения скопления льда.

Основная стратегия борьбы с заторами должна базироваться на приоритете предупредительных мер над необходимостью разрушать уже образовавшиеся заторы взрывами и бомбометанием. Это положение должно быть основой для разработки мероприятий по предотвращению стихийных бедствий в результате возникновения заторов. В рамках этой стратегии на первый план выходят вопросы прогнозирования участков и зон образования ледовых заторов, подъема уровня воды и параметров возможного катастрофического затопления местности при образовании заторного скопления льда, мощности затора. В основу прогнозов должны быть положены данные многолетних наблюдений на реках за створами постоянно формирующихся заторов.

Решение вопроса о действующих факторах заторообразования применительно к местам постоянно образующихся заторов следует начинать с Каталога заторных и зазорных участков рек, обобщающего данные наблюдений гидрологической сети, ведущихся на протяжении многих лет на более, чем 2000 заторных участков рек, рекомендации по применению наиболее эффективных мер борьбы с заторо-зазорными явлениями и их последствиями.

Заторные подъемы уровня воды зависят от:

расхода воды (при росте расхода увеличивается уровень воды в русле);

максимальной интенсивности паводка на вышележащем участке реки (чем больше интенсивность подъема уровня воды на вышележащем участке, тем быстрее наступает максимальный уровень);

толщины ледяного покрова в период вскрытия реки (комплексный фактор, который может приводить как к большим, так и к меньшим значениям заторных уровней в зависимости от сочетания прочих факторов);

суммы отрицательных среднесуточных температур воздуха за зимний период (косвенная характеристика толщины ледяного покрова, которая применяется при отсутствии измерения толщин льда);

продолжительности установления ледяного покрова, начиная с даты начала осеннего ледохода (шугохода), и максимального подъема уровня воды в начале ледостава (косвенные характеристики стеснения русла шугой и льдом на затороопасном участке реки);

уровня воды на вышележащем участке реки (косвенная характеристика водности реки в период вскрытия);

объема и прочности льда на сплавном участке реки (косвенная характеристика устойчивости затора);

наличия (местоположения) кромки льда ниже затора (наличие кромки льда ниже затора может приводить к образованию цепочки заторов);

забитости русла крупнобитым льдом (характеристика пропускной способности русла);

образования зажорных скоплений шуги и льда;

морфологических и морфометрических особенностей русла (наличие островов, осередков, генерального профиля русла на участке перекаат — плёс, конусов выноса рек — притоков, крутых поворотов и сужений русла и т.п.);

ледопроепукной способности русла (наличие подпора в устьевых участках рек, в зоне выклинивания кривой подпора водохранилищ и т.п.);

возможности использования различных инженерных мероприятий для предупреждения катастрофических заторных подъемов уровня воды.

В «Методических материалах» оговорены возможные методы прогноза, в приложениях к «Методическим материалам» даны примеры прогнозных зависимостей и заблаговременности прогноза. Выполнение этой части анализа дает в руки специалистов различного профиля и администрации региона весь комплекс исходных материалов, на котором должна вестись разработка защитных мер, а именно: место образования и мощность затора, высоту подъема заторного уровня воды, возможную идентификацию типа затора.

Комплекс защитных мероприятий должен включать проверку параметров затопления, достаточность инженерной защиты территории, необходимость дополнительных мер и действий в виде:

инженерной защиты путем подъема отметки территории или строительства защитных дамб;

снижения объема ледового материала для образования затора, задержки и аккумуляции льда на притоках, аккумуляции льда путем остановки скопления льда выше по течению с помощью искусственного затора;

мероприятий по пропуску льда в период ледохода, включающих ослабление прочности льда, создание прорезей в ледяном покрове, позволяющих пропустить большие расходы без подъема уровня воды с учетом пропуска воды и льда, в том числе и через гидротехнические сооружения, особенно в период строительства;

пропуска воды в каналах во льду или с помощью обводных каналов, траншей и туннелей.

В том случае, если затор все-таки образовался, решение вопроса о способе борьбы с ним следует проводить в следующем порядке:

1) определить тип затора путем идентификации затора по основным признакам заторообразования, включая морфологические, структурные, гидрологические признаки, гидравлические и фильтрационные условия, механизм образования и мощность образовавшегося затора, обязательно оценивая объем льда, скопившегося в заторе в соответствии с разработанной классификацией (рис. 1); при этом необходимо учитывать имеющиеся многолетние данные о постоянно образующихся заторах, помещенные в Каталог заторных и зажорных участков рек;

2) с учетом типа затора наметить комплекс мер по спуску воды выше затора;

3) освободить от льда и ледовых скоплений участок реки ниже затора с тем, чтобы было где разместить ледовый материал, сплавляемый вниз при разрушении тела затора;

4) определить «слабое место» — положение «замка» в теле затора;

5) выбрать метод разрушения затора (взрывные работы, бомбометание, ледоколы, резонансный способ, разрушение с помощью гидроаэродинамического способа или использования судов на воздушной подушке).

В классификации заторов (рис. 1) отражены все характерные черты затора с учетом места его образования и способа отложения ледового материала в русле. Она включает морфологические признаки затора с учетом ограничений на транспорт льда по ширине или

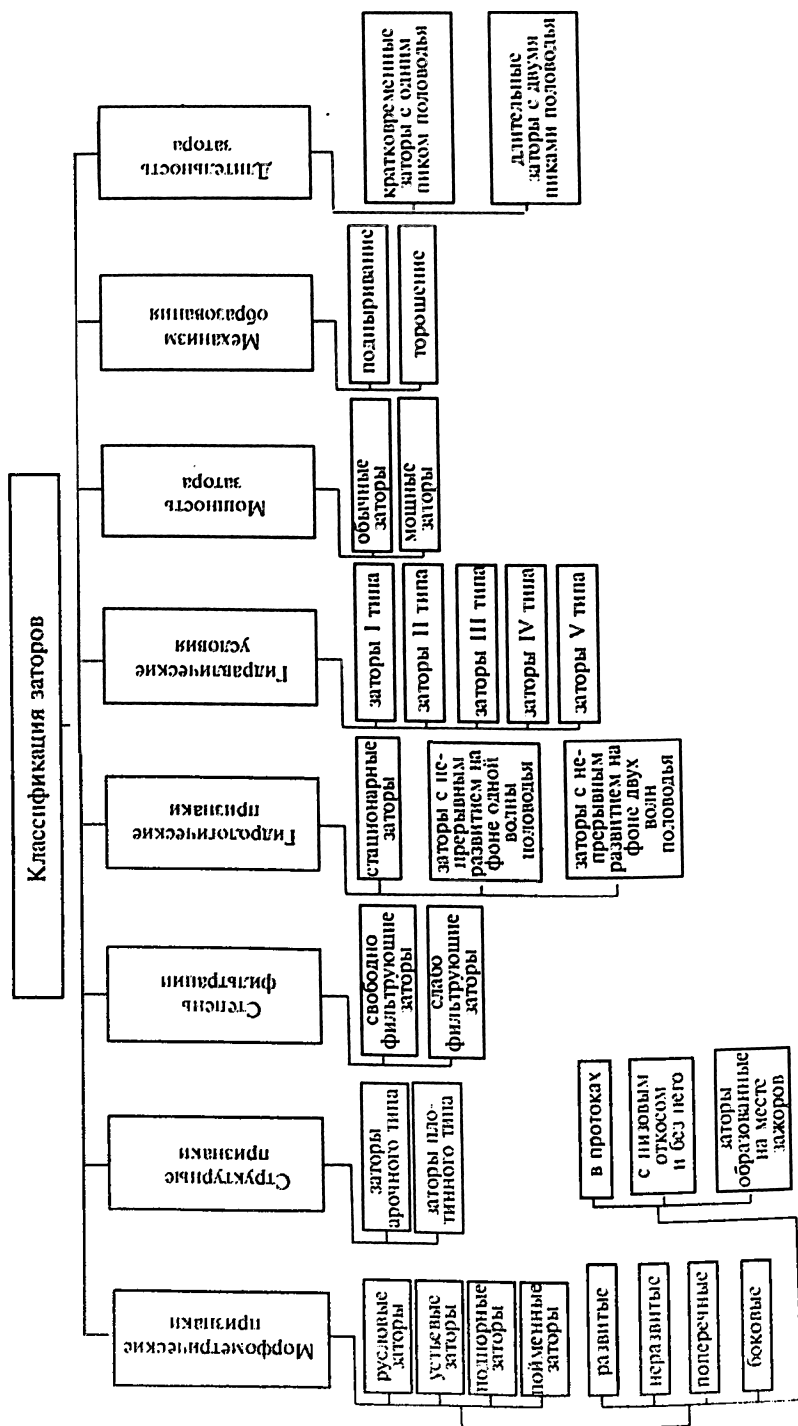


Рис. 1. Классификация затворов

глубине потока (структурные признаки), степень фильтрации, гидравлические условия для различного числа волн половодья в течение всех фаз образования затора: формирования, стабилизации и разрушения. Анализ гидравлических условий в период заторообразования на реках Сибири позволил выделить пять типов затора, характеризующихся темпами подъема и снижения уровней, расходами и пропускной способностью тела затора. Гидравлические характеристики типов затора приведены в таблице.

Устойчивость затора оценивается инженерными методами с применением тех же подходов, что и к любому гидротехническому сооружению. При этом решается задача, обратная той, которая стоит перед гидростроителями: гидротехническое сооружение должно быть прочным и устойчивым при любых возможных изменениях условий окружающей среды, а затор — природная плотина в русле реки, устойчивость которой нежелательна.

Если представить комплексную систему мероприятий по предотвращению образования ледовых заторов на реках Российской Федерации в виде алгоритма, то он будет выглядеть так, как показано на рис. 2.

Наличие в осенний период зажорных явлений усиливает и усложняет картину образования заторов. Как правило, заторы образуются в местах осенних и весенних зажоров. Наличие шугового материала при образовании заторов существенно затрудняет фильтрацию воды через тело затора. Образование зажоров — это самостоятельная область возникновения чрезвычайных ситуаций. Как правило, зажоры плохо ликвидируются с использованием взрывов, бомбометания, ледоколов.

Для борьбы с зажорами более применимы методы гидравлического и термического регулирования.

В заключение следует отметить, что в разработанные «Методические материалы по предотвращению образования ледовых заторов (зажоров) на реках Российской Федерации и борьбе с ними» входят:

- основные положения, понятия, обозначения и термины;
- состав наблюдений за заторами и зажорами льда;
- прогнозирование заторов и максимальных заторных уровней воды;
- методы искусственного ослабления льда;
- механические способы разрушения льда;
- применение взрывных методов для предупреждения и ликвидации заторов;
- применение авиации;
- образование искусственных заторов;

Схематизация типов заторообразования по гидравлическим условиям

Тип затора	Время образования затора	Гидрологические характеристики	Фазы заторообразования		
			Формирование затора	Стабилизация затора	Разрушение затора
I	Осень	Уровень воды	Минимальный зимний уровень H_{\min}	$H_{\min} < H \leq H_{\max}$. Подъем уровня до максимальной отметки	H_{\max} . Длительное стояние высоких уровней с постепенным снижением к весне
		Расход воды	Минимальный расход Q_{\min}	Расход, постепенно повышающийся по мере размыва и таяния затора	$Q = const$
		K_3	$K_{3,\min}$ на дату начала роста уровня	Медленно растущие зимние коэффициенты	$K_3 = const < 1$
II	Весна	Уровень воды	H_{\min} Начало подъема уровня воды	Пик уровня воды через 8-10 дней после формирования затора	Уровень постепенно снижается
		Расход воды	Слабое изменение расхода $Q = const$	Меняется мало, $Q = const$	Меняется мало, $Q = const$
		K_3	$1 > K_3 > K_{3,\min}$. Уменьшение зимних коэффициентов	Наступление пика уровня воды совпадает по дате с $K_{3,\min}$	$K_3 < 1$
III	Весна	Уровень воды	H_{\min} Начало подъема уровня воды	$H_{\min} < H \leq H_{\max}$. Подъем до H_{\max} . и медленное снижение	Прорыв затора с резким падением уровня
		Расход воды	$Q = const$	Снижение до Q_{\min}	Увеличение расхода воды
		K_3	$1 > K_3 > K_{3,\min}$	$K_{3,\min}$ совпадает по дате с H_{\max}	-

Продолжение таблицы

Тип затора	Время образования затора	Гидрологические характеристики	Фазы заторообразования		
			Формирование затора	Стабилизация затора	Разрушение затора
IV	Весна	Уровень воды	H_{\min} . Начало подъема уровня воды	Подъем до H_{\max} . и снижение	Интенсивность снижения уровня воды выше, чем интенсивность снижения расхода
		Расход воды	$Q = const$	Увеличение расхода после установки максимального заторного уровня	
		K_3	$1 > K_3 > K_{3,\min}$	Дата наступления H_{\max} . Медленное увеличение K_3	
V	Весна	Уровень воды	H_{\min} . Начало подъема уровня воды	$H_{\min} < H \leq H_{\max}$ Подъем до H_{\max} и медленное снижение	Снижение уровня воды
		Расход воды	$Q = const$	Снижение до Q_{\min}	Интенсивность увеличения расхода воды выше, чем интенсивность подъема уровня
		K_3	$1 > K_3 > K_{3,\min}$	$K_{3,\min}$ совпадает по дате с H_{\max} , затем — медленное увеличение K_3	-

K_3 — зимний коэффициент, характеризующий пропускную способность русла и равный отношению расходов воды в ледовый и безледный периоды при одном и том же уровне воды.

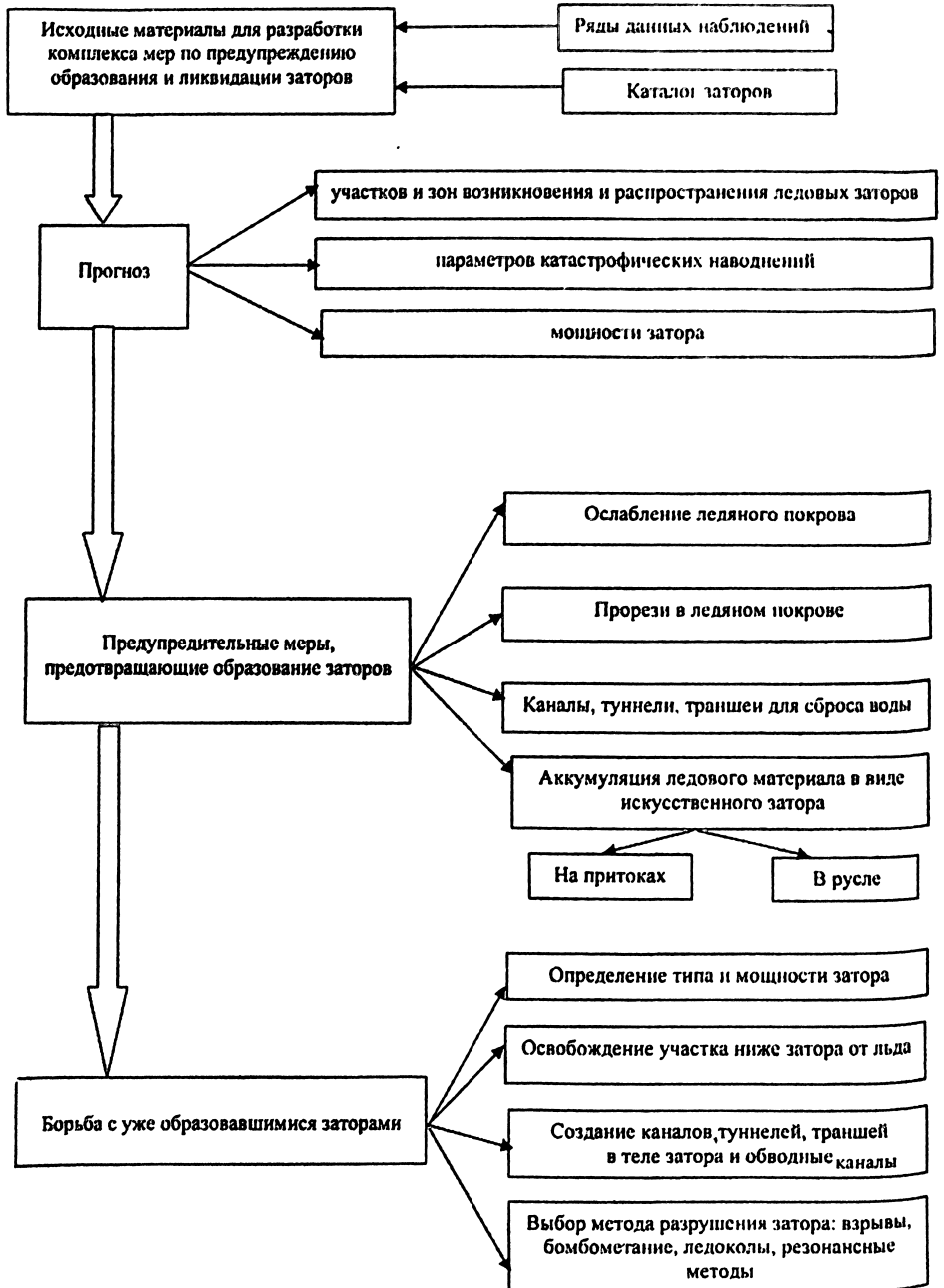


Рис. 2. Система мероприятий по предупреждению образования ледовых заторов на реках Российской Федерации в борьбе с ними

беззаторный пропуск льда через гидротехнические сооружения в период строительства и эксплуатации;
методы инженерной защиты территории.

В приложениях содержатся данные о характеристиках сведений, представленных в «Каталоге заторных и зажорных участков рек», данные о механизме образования ледяных заторов и методах прогноза заторных уровней, фактические данные о заторных и зажорных подъемах уровней воды на реках европейской части России, о ледорезных машинах, о типах ледоколов, о схемах пропуска льда через гидротехнические сооружения, о способах остановки льда выше сооружения, о характеристиках потокообразователей и барботажных установок для гидравлического регулирования ледового режима, об оборудовании для борьбы с крупными заторами льда гидроаэродинамическим способом и др.

«Методические материалы по предотвращению образования ледовых заторов (зажоров) на реках Российской Федерации и борьбе с ними» составлены с учетом самых современных разработок по прогнозу, предупреждению и ликвидации заторов и позволяют регламентировать все виды работ по борьбе с катастрофическими наводнениями на реках, вызванными заторными явлениями.

РОЛЬ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В ФОРМИРОВАНИИ ЛОЖА И БЕРЕГОВ РУСЛ КРУПНЫХ РЕК БАССЕЙНА ЛЕНЫ

Зайцев А.А., кандидат геогр. наук (МГУ им. М.В. Ломоносова)

Исторически сложилось так, что в Восточной Сибири большинство населенных пунктов расположено вблизи крупных и средних рек. Вокруг городов и поселков интенсивно осваиваются пойменные территории: строятся жилые дома, дороги и производственные помещения, выделяются дачные участки, земли вовлечены в сельскохозяйственный оборот, вдоль речных берегов устраиваются водозаборы, причалы, склады, оборудуются набережные и т.д. Поэтому вероятные размеры прямого и косвенного ущерба вследствие затоплений постоянно растут, так как долина периодически подвергается наводнениям, — здесь имеют место размывы берегов, проявляются и другие опасные факторы, вызванные рекой.

Восточная Сибирь — преимущественно гористая территория, поэтому места для поселений в долине реки, на более ровных площадях, кажутся предпочтительными. Реки долгое время являлись и продолжают оставаться главными коммуникациями, способными

обеспечить снабжение населения продуктами, необходимыми для жизни. Многие населенные пункты были основаны как промежуточные станции между центрами крупных областей, поэтому расположение их вблизи пути перемещения людей, товаров и почты вполне оправдано. В период освоения недр обширной территории, который в основном пришелся на XX век, некоторые населенные пункты явились опорными при создании новой инфраструктуры. Причем поселения, находившиеся в стороне от мест нового освоения, отмирали, как утратившие свое назначение, другие, наоборот, резко повышали свой статус. Например, с развитием Северного Морского пути исчезли такие крупные поселения, как Зашиверск на Индигирке и Булун на Лене. С появлением Амуро-Якутской магистрали небольшой поселок Укулан на Алдане преобразился в город Томмот, развитие алмазной промышленности превратили малоизвестное село Мухтуя в город-порт Ленск. Наряду с этим росла концентрация населения.

Напомним, что еще в позапрошлом веке известный естествоиспытатель Ф.Ф.Миллер [1] в своих очерках о Восточной Сибири отмечал: «...поразительно скоро расселились Русские люди северного племени и новгородского происхождения, по великим сибирским рекам «на местах угожих, и крепких, и рыбных» — как писывали они в свое время — «и пашенька невелика есть, и лугов много, и где стояти городу, и то место высоко: большая вода не поимает»... Действительно, пашенка невелика, так как незатапливаемых угодий на пойменной территории мало, соответственно, немного места и для поселений, в тоже время заливных лугов достаточно. На этапе освоения территории места для обитания выбирались по наитию и не безошибочно. Вспомним, что город Якутск с момента своего основания два раза был перенесен на десятки километров выше по течению, так как место его первоначального расположения затоплялось. Несмотря на это дальнейший рост города, после того как исторический центр обосновался на незаливаемых вершинах грив высокой поймы, привел к появлению строений на более низкой затапливаемой территории. Более того, появившийся в середине прошлого века новый район деревянных строений — Даркылах (Самострой) — занял еще более низкую пойменную поверхность, хотя к этому времени уже существовали известные нормы возведения строений. Неизвестно, когда, но также со временем был перенесен выше по течению Лены г. Олекминск, основанный в XVII веке напротив устья Олекмы. Несмотря на то что первопоселенцами на прежнем месте была воздвигнута прочная противопаводковая дамба, сохранившаяся и в наше время (рис. на цветной вкладке), город подвергался разрушительным наводнениям из-за ледовых заторов.

Понятие катастрофического природного явления связано, в первую очередь, с безопасной жизнедеятельностью человека. Поэтому наряду с природными процессами, которые носят волновой характер, обостряясь и ослабевая в соответствии с климатическими циклами, причиной природных катастроф все больше становятся антропогенные факторы. Как считает профессор А.А. Беляков, целесообразно причислить пойменную территорию к части водоема, которая периодически, но обязательно затопливается. В этом случае строения на пойме будут отнесены к разряду гидротехнических сооружений. Это позволит законодательно отделить катастрофы на реках, вызванные непредсказанными природными явлениями, от проявлений, вызванных человеческой беспечностью.

Отметим, что воздействие наводнений на населенные пункты и сельскохозяйственные угодья приводит к определенным, но, в общем, известным последствиям. В целом ряде районов Восточной Сибири наводнения вызваны ледовыми явлениями, главным образом заторами льда, хотя в отдельных местах велики последствия и ливневых паводков. Размыв берегов водными потоками также можно отнести к области повышенного интереса с точки зрения учета при строительстве и протекции прибрежной части русла от разрушения. Следует подчеркнуть, что расположение сибирских поселений вдоль естественных водотоков, при условии сурового зимнего климата, заставляет обратить внимание на ледовые явления, которые играют заметную роль в преобразовании русел и берегов рек. Несмотря на это, воздействия на берега и сооружения ледовых процессов изучены недостаточно, рекомендации существующих СНиП и методик по борьбе с заторами не бесспорны. Напомним, что большие объемы воды на длительное зимнее время превращаются в твердую горную породу, накрепко сцементированную с подстилающей поверхностью. Наиболее очевидно проявляется руслоформирующая деятельность ледохода в период начала половодья. Поэтому роль ледовых явлений на сибирских реках достаточно велика.

Весенний ледоход, связанный с «пробуждением» реки, всегда привлекал внимание живущих на ее берегах людей. Он веками воспринимался как величественный и неотвратимый природный феномен. Неповторимость ледохода, вызванная, в первую очередь, инвариантностью гидрометеорологических процессов в бассейне, позволила к настоящему времени описать лишь общие черты этого явления. Физике вскрытия льда и инженерной интерпретации процесса перемещения потоком отдельных льдин и ледовых мас-

сивов уделено в научной литературе немногим меньше места, чем другим вопросам гидрологии. Наиболее полно описаны явления термического разрушения ледового покрова, наименее — взаимодействие ледовых полей и гидродинамики потока. Практически не изучены вопросы, связанные с физическим разрушением и переносом льдом обломков горных пород. Это не позволяет полноценно определить воздействие льда на гидротехнические сооружения.

Русла Лены и ее крупнейших притоков по характеру берегов, толщине и составу донного аллювия резко подразделяется на два типа: трудно размываемые (скальные, валунные и валунно-галечные) и легко размываемые (сложенные галечным, гравелистым и песчаным аллювием). Первые преимущественно распространены в областях ограниченного развития русловых деформаций, вторые — в областях свободного развития русловых деформаций [2]. Несмотря на схожесть картины ледовых явлений, руслоформирующая деятельность льда на них проявляется по-разному.

В зимний период на Лене и ее крупных притоках уровни воды падают на 1,0 — 1,5 м по сравнению с уровнем низкой летней межени. Толщина льда в реках в течение зимы постепенно увеличивается и достигает 1,0 — 2,5 м, а местами и более. Часто для текущей воды на перекатных участках остается меньше места, чем занимает лед. Отмелые участки русла промерзают до дна, что является причиной широкого распространения на мелководьях мерзлых грунтов.

При монофракционном составе аллювия как пойменных, так и русловых отложений в легко размываемых грунтах при замерзании воды происходит цементация рыхлой породы. Образовавшееся в зимний период мерзлое ядро медленно оттаивает летом [3]. Этот процесс объясняет аномально медленные темпы русловых переформирования средней и нижней Лены, русел нижнего течения Вилюя и Алдана. Однако при разрушении яров пойменного берега и рыхлых склонов надпойменных террас потоком реки мерзлота проявляется двойственно. Летом вдоль нижней части крутого склона подмываемого берега образуется глубокая ниша (рис. 1). Ее происхождение связано в среднем течении реки с действием на урезе прогретого потока воды, обеспечивающего более быстрое оттаивание и унос грунта в узкой полосе откоса, в то время как менее активный теплообмен с воздухом, особенно на откосе северной экспозиции, способствует сохранению мерзлой толщи породы. Вследствие этого образуются впечатляющие козырьки нависших над водой берегов. В нижнем течении огромных рек, где скорость потока не столь велика, образование ниш обычно происходит после штормового волнения.



Рис. 1. Образование потоком реки ниши на подмываемых песчаных берегах поймы и террас в криолитозоне

На реке обрушение глыб мерзлого берега, нависшего над нишами, вызывает явления локального дейгиша и приводит к быстрому размыву и уносу попавшего в поток материала, происходит одномоментное отступление бровки берега на десятки метров от своего первоначального положения. Причем темпы разрушения берегов на крупных реках практически не зависят от объема обрушающегося материала, т.е. высоты берега. Натурные наблюдения показали, что размыв берегов песчаных террас на нижнем Вилюе (высотой 18 – 22 м) и средней Лене (высотой 28 – 50 м) происходит с той же скоростью, что и откосов пойменного берега, имеющего высоту всего 4 – 8 м над меженью. Количество обрушившегося материала, поступающего в поток из надпойменных террас, было в 4 – 5 раз больше, чем с откосов поймы. Естественно, что ниже по течению поступивший в реку материал перераспределяется и аккумулируется в русле, образуя песчаные гряды и перекаты. Скопления песков в русле ниже по течению от участка размыва склона террас заметно более массивные и обширные, чем за размывающимися пойменными ярами. Однако непосредственно в месте размыва берега его рисунок не отражает разницу интенсивности процесса. Как правило, линии размываемой части берега террас и поймы хорошо сопрягаются.

В устьях Лены и других сибирских рек, протекающих по территории тундры, поверхность берегов часто сложена породами с большим содержанием илистых частиц или глин, представляющих собой связанные грунты. При обрушении берега здесь образуется своеобразный бронирующий чехол, стабилизирующий береговой откос на долгое время. Поэтому из-за наличия связанных грунтов

и малых скоростей течения, а также потери водности рукавов по длине благодаря эффекту фуркации в дельтах рек устойчивость русл устьевых протоков очень высокая.

При наличии «неразмываемого» цоколя терраса играет роль скального берега и, как правило, выдается в русло реки в виде мыса. Здесь в большой степени в разрушении скалы участвует лед. В трудно размываемых породах вода, проникшая по трещинам вглубь, при замерзании способствует разрушению скалы.

При прочих равных условиях толщина и время становления поверхностного льда в зимний период находятся в обратной зависимости от скорости течения. При больших скоростях течения роль внутриводного и донного льда становится преобладающей. Например, при условии того, что р. Лена на всем своем 4000 км протяжении покрывается льдом от истока до устья с разницей всего около 20 дней (с конца сентября до середины октября), быстротоки среднего течения долго остаются открытыми. На участке Лены в районе пос. Пеледуй отмечено замерзание реки в 1978 г. только 30 ноября. Кроме Лены длинные участки быстротоков имеются на всем протяжении Витима, Олекмы, Алдана и на Вилюе от плотины Вилюйской ГЭС до пос. Сельдюкяр. После строительства Вилюйской ГЭС в незамерзающей полынье нижнего бьефа резко усилились зазоры. На быстринах процессы, связанные с внутриводным и донным льдом, протекают аналогично явлениям, описанным для р. Ангары. Ф.Ф.Миллер отмечал, что «...Ангара это почти единственная река по всей Сибири и России, где лед не начинается как везде с поверхности, но готовится на низу и поднимается со дна почти вполне готовым ледяным мостом»... «По выходе своем из озера-моря Байкала Ангара на 20 верст своего быстрого течения не замерзает вовсе»... «рьяная и могучая быстрота течения не позволяет реке замерзнуть вовсе на плоскости наибольшего склона падения при истоке, а в Иркутске — раньше конца декабря.»... «В течение 160 лет, с 1721 по 1881, река замерзала вся вплоть до Байкала и лед skipелся с озерным только один раз, именно: в 1739, 31 декабря. По мере же того, как река в дальнейшем течении идет по наиболее горизонтальной плоскости и утрачивается влияние высот Байкала, быстрота становится слабее и замерзание раньше».

Интересно упоминание Ф.Ф. Миллера о руслоформирующей деятельности внутриводного и донного льда. «В свою очередь, когда до ледохода шел снег, комья его, смачиваясь не застывшей водою, упадают также на дно и таким же способом застывают в ледяные глыбы. Они потом поднимаются с шумом на по-

верхность, вынося на себе неизбежно примерзшие к льдинам крепкие песчаники, гранитные камни с диоритами, глину и другие земли (крепкий, мелкозернистый гранит Ангары, тяжелый на вес, звонкий как металл, залегает поперек реки почти во всех местах перед порогами). Этот лед вода несет затем вниз до тех пор, пока он не задержится на окраинах замерзшей реки, где-нибудь на открытом плесе. Здесь лед примерзает ко дну только в неглубоких местах. В таких местах, когда идет шуга или начинается осенний ледоход, льдин набивается так много, что делаются из них плотины, и вода поднимается от 2 до 5 саженей, затопляя берега и разрушая селения. В Иркутске осенью и зимой скапливается глубинный лед в таком количестве, что производит заторы, причем вода поднимается так высоко, что вливается в городские улицы и производит наводнения, к счастью редкие».

Отметим, что в процессе подготовки к поступлению в русло грубообломочного материала — крупных валунов и даже огромных скальных обломков — в большой степени задействован лед. И если впоследствии с крутых склонов материал выносится главным образом благодаря силам гравитации, то на поверхности относительно горизонтального дна реки его передислокация вызвана только натиском льда. К такому выводу удалось прийти, исследуя в начале 90-х годов перемещение материала, слагающего дно потока верхнего Алдана. Например, в районе переката Бюктелях на Алдане в 1980 г. после обрушения гранитного массива нависшей над рекой скалы в русло вблизи судоходного фарватера попал крупный монолит длиной около 10 — 12 м и до двух метров в поперечнике. В этот момент его большая ось располагалась под углом 45° к направлению потока. В 1981 г. монолит был обнаружен развернутым ортогонально течению, а в 1985 г. его на прежнем месте уже не было.

Монолиты встречаются достаточно редко, в руслах крупных рек наиболее распространены камни-единцы объемом около 1 м³ (рис. 2). Эти камни, периодически попадая на фарватер, оказываются препятствиями для судоходства, что требует проводить очистку дна. Так в бассейне Лены только в 1972 г. было удалено с фарватера более 5 тыс. м³ камней-единцов. На горных реках, имеющих большие уклоны, перемещение подобных камней частично объясняется аблювиальным эффектом. На крупных реках бассейна Лены, имеющих небольшие падения водной поверхности, перенос камней-единцов вдоль русла вызван только льдом. Причем перенос камня-единца льдом возможен либо после того как он вмерз в толщу льда на отмелой части русла, либо путем выталки-

вания камня льдом по направлению течения. Эти процессы еще не исследованы. Перенос камней-одиноц на поверхности ледовых полей в естественных условиях не наблюдался. Если камень случайно оказывается на поверхности льда, то весной по мере прогрева солнцем лед под камнем успевает протаять насквозь.

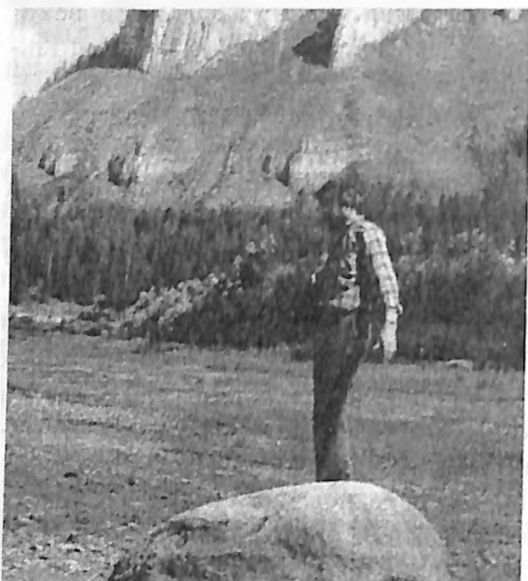


Рис. 2. Камень-одиноц на галечной отмели среднего течения Лены

На отдельных отрезках валунно-галечных русл встречаются участки бечевников и даже поверхности отмелей с хорошо «пригнутой» отмосткой. Очевидно, что наряду с потоком в ее образовании и, особенно, в уплотнении поверхности большое участие принимает ледоход, следы которого можно встретить повсеместно. С годами отмостка кальматируется и превращается в естественную набережную. В грунте между хорошо пригнанными камнями прорастает трава. Такие участки дна не размываются потоком и способны выдержать очень большие скорости течения. Однако, как показали натурные наблюдения, в определенный момент также происходит ее разрушение. В этот период из отмостки в первый же год наблюдался унос до 80% слагающего ее материала. Причем, чем ниже уровень расположения отмостки, тем чаще она переформируется рекой, в первую очередь льдом. Более низкие уровни отмостки могут быть разрушены либо при образовании льда или при осенних подвижках, либо в момент самого начала подъема уровня весной, когда грунт, примерзший в нижней кромке льда, будет сдернут с места. Отметим, что в период весеннего ледохода и даже при пер-

вой наблюдаемой подвижке льда уровни воды достаточно высокие и нижняя кромка льда находится над отмосткой.

На Лене и ее притоках образование льда проходит при низких уровнях. После становления льда происходит краткосрочный подъем уровня (в среднем на 1 — 1,5 м, редко до 3 м и более). Как правило подъемы воды не вызывают больших опасений с точки зрения хозяйственной деятельности, но именно в этот период происходит коррозия поверхности еще не промерзшего дна льдом, торшение льда на отмелях участках реки, «вспахивание» отмелей, расклинивание скальных трещин и каменных глыб в русле и т.д. Таким образом, руслоформирующая деятельность льда проявляется уже в начальный зимний период.

При снижении горизонтов воды в потоке на протяжении зимы усиливается дифференциация скорости течения. В глубоких плесах и у кромки берега течение заметно снижается, резко возрастая на перекатах. Ледовые явления усиливают этот процесс. Поэтому на перекатах зимой происходит вымывание мелкого аллювия. На песчаных и галечных реках перекаты углубляются по направлению узкого корыта. На валунно-галечных участках реки материал выносятся зачастую вплоть до скального основания. Нижняя кромка льда при его перемещении выпахивает в аллювиальном валунно-галечном ложе длинные (до нескольких километров) и регулярные продольные борозды, глубиной до 40 см. Эти борозды обнаружены при гидролокационном исследовании дна реки и были визуальным зафиксированы на перекате Хатын-Тумул (р. Лена) водолазами, которые опускались под воду в зимний период. Это подтверждает образование подобных борозд именно в период ледоставных подвижек.

Хорошо прослеживается прямая зависимость интенсивности заторных явлений от высоты уровня воды в начале ледостава. Естественно, что это вызвано увеличением массы льда. Кроме того, при более высоких горизонтах воды снижается составляющая подземного более минерализованного стока, что делает лед прочнее. Наряду с этим увеличиваются площади потревоженного льдом ложа реки.

Первые весенние явления начинаются с постепенного подъема воды в реке и образования закраин. В настоящее время отсутствуют наблюдения процессов взаимодействия ледового покрова с руслом реки и берегами в этот период. К сожалению, мало известно о процессах, которые наблюдаются в момент отрыва ледового припая от промерзшего дна. Кроме этого, нет информации о векторе перемещения массы льда в момент отрыва. Единое поле льда разной толщины при всплытии подвержено неоднородным напряжениям,

вызванным напором потока и это должно находить отражение в воздействии льда на дно и берега реки. Локальный ледоход, который протекает в открывшихся частях поверхности реки (во второстепенных протоках и прибрежных мелководьях) проходит спокойно, не вызывая видимых разрушений.

Подвижки льда, которых в период вскрытия может быть несколько, наиболее активны в системе перехода от плеса к перекату и происходят уже при достаточно высоких горизонтах воды. При подвижках происходит «всплавление» рыхлой поверхности берегов и отмелей. Результаты этой работы можно встретить повсеместно. Навалы льда и торосы, вызванные подвижками, как правило, образуются в одних и тех же местах. С одной стороны, образовавшиеся торосы препятствуют дальнейшему разрушению поверхности дна и берегов в период ледохода (рис. 3, 4), с другой — подготавливают поверхность к разрушению потоком высокой воды после прохождения ледохода. Места образования навалов льда исследованы недостаточно и не фиксируются при ледовой авиаразведке. Теоретически места торошения можно определить по анализу векторов поверхностных скоростей течения при уровнях начала подвижки льда.



Рис. 3. Торосы и навалы льда у оголовка о-ва Батамайского (р. Лена)

При ледоходе образовавшиеся торосы создают препятствие течению и часто так сильно изменяют морфологический облик русла, что поток в начальный период половодья может следовать по направлению, не соответствующему русловым каналам стока. сосре-



Рис. 4. Широкая полоса из навалов льда предохраняет берега от разрушения в начальный период ледохода (о-в Батамайский, р. Лена)

доточение стока в весенний период в дальнейшем может проявиться образованием «прорвы» на островах и шпорах меандр. Это объясняет внезапное и быстрое появление новых рукавов на реках, где русловые переформирования происходят очень медленно. Например, в 1976 г. на р. Киренге (Иркутская обл.), где русло чрезвычайно устойчивое, в районе дер. Юхты произошло формирование поперечного рукава, соединившего две параллельные протоки. Новый рукав прорезал поверхность острова, ширина которого составляла несколько сотен метров. В малоустойчивых к размыву руслах тоже можно наблюдать подобные процессы. Так, благодаря затору льда в конце 50-х годов быстро разработалась малозаметная Хайтыалахская протока на р. Лене, находившаяся в стороне от основного русла, несмотря на то что основной расход воды и наносов приходится на другие рукава. Хайтыалахская протока остается глубокой до настоящего времени и используется для судоходства. Подобные русловые переформирования, вызванные ледовыми явлениями, происходят бурно, но носят редкий и зачастую случайный характер.

Отметим, что торосы и навалы льда являются промежуточной стадией задержки продвижения льда вниз по течению, следующей стадией являются заторы. В целом, руслоформирующая роль заторов льда неоднозначна. Лена и ее притоки относятся к рекам, ледо-

ход на которых всегда происходит с заторами. Однако следы руслоформирующей деятельности, вызванной заторами, встречаются крайне редко, они проявляются только в моменты возникновения катастрофических заторов. Исследование русла сразу же после прохождения ледохода не выявило аномалий рельефа, которые могут быть объяснены только заторами. При этом результаты борьбы с заторами — в виде мощных воронок от взрывов на дне реки — встречаются повсеместно. Так, при ликвидации затора в районе Петровской курьи (20 км ниже по течению от г. Якутска) на плесе в песчаном русле реки образовалась воронка глубиной в центре до 7 м от поверхности дна. Диаметр воронки составил около 100 м. До середины лета воронка проявлялась в виде мощного водоворота и занеслась наносами только на следующий год. В галечном русле средней Лены в районе г. Олекминска после подрыва в 1998 г. контейнера с взрывчаткой осталась воронка глубиной до 3 м от поверхности дна. Слой рыхлого материала был полностью вынесен до скального основания. Образовавшийся в узкой части реки глубокий плес сохраняется до настоящего времени. Мощные заторы льда сохраняются в русле и после ледохода в виде скоплений на вершинах отмелей, берегах и оголовках островов (рис. 5). В вершине дельты Лены скопления льда на отмелях часто не тают до следующей зимы. Однако и в этом случае руслоформирующая деятельность заторов малозаметна. Обратное явление происходит в момент прорыва затора. Волна прорыва обладает разрушительной силой и результаты ее деятельности можно наблюдать даже на устойчивых к размыву участках реки. Так, после прорыва катастрофического затора, вызвавшего затопление Ленска в 2001 г., в результате образовавшейся волны прорыва произошел мощный размыв высокой надпойменной террасы, на которой расположен поселок Нюя. Дополнительное расширение русла Лены на этом участке приведет к образованию острова над отмелью Самнагас, что явится еще одним очагом затора, так как наряду с крутыми поворотами русла острова в среднем течении Лены, по мнению С.С.Коржуева [4], являются своеобразными «морфологическими ловушками».

Наиболее заметны результаты абразионной деятельности плывущего льда в начале ледохода в тех местах, где отсутствуют или всплывают с подъемом уровня воды бронирующие берег торосы. При росте уровня в реке поперечные перекосы водной поверхности, направленные в сторону берега, способствуют заталкиванию льда в устья рек, во второстепенные протоки, в естественные и искусственные затоны. По мере снижения интенсивности ледохода корразийные свойства ледовых полей резко уменьшаются.



Рис. 5. После затора лед на берегах фиксирует максимальные уровни воды.

Абразивная деятельность плывущего льда в дальнейшем полностью вуалируется высоким половодьем и летними паводками. Его следы обнаруживаются лишь там, где поток не в состоянии преобразить берег и дно реки. Как правило, это места выхода в русле коренных пород, где лед прорезает ниши или отполировывает скалу до состояния «бараньих лбов». Гидротехнические сооружения, способные выдержать напор воды, зачастую также страдают от ледохода (рис. на цветной вкладке).

Таким образом, роль ледовых явлений в процессе подготовки поверхности ложа и берегов рек к дальнейшему разрушению потоком достаточно велика. Кроме этого требуется глубже разобраться в вопросах транспорта наносов речным льдом. В первую очередь это касается валунно-галечного материала, а также крупных камней, которыми часто бронируют поверхность гидротехнических сооружений. Данная статья призывает обратить внимание на решение задач воздействия льда на ложе реки, что тесно связано с надежностью гидротехнических сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миллер Ф.Ф. Восточная Сибирь. В кн. «Живописная Россия». изд-во «Товарищество М.О. Вольф». 1888.
2. Руслевой режим рек Северной Евразии (в пределах бывшего СССР). М. 1994.
3. Водные пути бассейна Лены. М.: МИКИС. 1995.
4. Рельеф среды жизни человека (экологическая геоморфология). М.: Медиа-ПРЕСС. 2002.

ЛЕДОВЫЕ ЗАТОРЫ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ НА РЕКЕ ЛЕНЕ

*Зайцев А.А., кандидат геогр. наук (МГУ им. М.В. Ломоносова),
Милитеев А.Н., доктор техн. наук (ОАО «НИИЭС»)*

Исследования ледовых явлений на водоемах охватывают большой круг вопросов, касающихся как процессов формирования покрова льда, так и его разрушения. Особенности замерзания и оттаивания воды на реках заключаются в существенной роли факторов турбулентного перемешивания и перемещения льда потоком.

Большинство крупных рек России текут с юга на север и отличаются особыми ледовыми явлениями. Здесь заметную роль в формировании волны половодья играют ледовые заторы, на которые в последние годы обращается большое внимание. Образование заторов наряду с гидрометеорологическими факторами связано с морфологией русла и, отчасти, долины реки. Инвариантность и многофакторность процессов в бассейне реки, а также слабая изученность не позволяют сделать количественного описания процессов взаимодействия ледового покрова и русла. Практика искусственного регулирования ледовых заторов на основе интуиции и использования эмпирических зависимостей часто приводит к экстремальным ситуациям.

Обзор имеющихся литературных источников показывает, что наиболее полно описаны явления термического разрушения ледового покрова: постепенного снижения толщины льда благодаря росту температуры воздуха, изменения его прочностных характеристик перед ледоходом. Менее исследованы вопросы взаимодействия ледовых полей с потоком, что не позволяет количественно определить влияние морфологии русла на ледоход. М.А. Великанов (1948) считал, что основной причиной заторов является препятствие на пути потока. Вследствие этого возникает ледовая плотина из нагромождений льда, которая разрушается при спаде уровней, когда сила давления накопившейся массы льда и воды превышает силы взаимного сцепления льда, в том числе и с берегом. К аналогичным выводам пришел Л.Г. Шуляковский (1972), который считал, что для образования затора необходимо выполнение как минимум одного из двух условий: а) интенсивный рост уровня; б) похолодание в момент вскрытия. Прорыв затора происходит при превышении силы гидростатического давления над силами трения льда и сопротивления русла его движению. Ранее И.Я. Лисер (1967) ука-

зал на связь процессов периода ледостава с ледовыми явлениями весной. Он отметил, что заторность возрастает после того, как наблюдаются повышенные уровни и частые потепления в предзимний период. Большое значение имеют также суровость зимы и интенсивность роста уровня весной. Выделяются два типа заторов: перед кромкой еще не начавшего движение льда и «очаг», образовавшийся в результате задержки льда в процессе его продвижения вниз по течению. Кроме этого, Р.А.Нежиховский и др. (1978) как основной фактор, влияющий на размер затора, выделили расход воды.

М.Г. Софер установил связь между толщиной льда в заторе и высотой подпора в заторе. Он же установил, что главным фактором, оказывающим влияние на прорыв затора, является не перепад уровней, как это предполагалось отдельными авторами, а стеснение русла до тех пределов, когда скорость, определяющая влекущее усилие потока, не достигает своего критического значения. Однако в силу того, что определить критическую скорость, приводящую к разрушению затора, опытным путем не удалось, для определения момента прорыва предложено использовать более приемлемые величины, в частности уровни. Например, В.А.Бузиным предложена зависимость расхода воды в момент прорыва затора льда $Q_{пр}$ от произведения разрушающего напряжения льда σ на толщину ледяного покрова h_n , аппроксимированная уравнением

$$Q_{пр} = f(\delta h_n),$$

которое является уравнением предельного равновесного состояния заторных скоплений льда. Этот метод применим для мест постоянных заторообразований. Кроме того, для него требуется проводить наблюдения за всеми параметрами, входящими в прогностические зависимости. Даже в этих случаях точность наблюдений, особенно за прочностью льда, невелика. Поэтому физике вскрытия льда и инженерной интерпретации процесса перемещения потоком отдельных льдин и ледовых массивов уделено в научной литературе не меньше места, чем другим вопросам гидрологии. Однако, как отмечено, наименее исследована гидродинамика перемещения ледовых полей, взаимодействие ледовых полей с потоком.

Самостоятельной и достаточно важной задачей является определение взаимосвязи ледовых процессов с русловыми деформациями. Широко распространенный вывод о том, что отсутствие регулярных дноуглубительных работ, которые были свернуты на реках в последние годы, ведет к интенсификации заторных проявлений, в настоящее время, с научной точки зрения, не имеет подтвержде-

ния. Увеличение ледопропускной способности русла сводится к проведению дноуглубительных работ, при этом в процессе их проведения существенного приращения ширины реки достичь не удастся. Отвалы грунта, в силу технологии дноуглубительных работ, остаются вблизи прорези и часто являются дополнительными местами формирования торосов, которые сдерживают ледоход и ограничивают пропускную способность русла в начальный период времени, когда и образуются заторы. Казалось бы, что ликвидацией или перераспределением мест образования торосов можно регулировать ледопропускную способность русла, однако вопрос образования и распределения торосов остается неисследованным. Кроме того, без достаточных оснований вносятся предложения по использованию ледовых гидротехнических сооружений для регулирования русла. Подобные проекты возникали многократно. Например, имеется предложение по созданию ледовой плотины для образования искусственного затора у острова Половинный выше по течению от г. Ленска. Предполагалось, что искусственный затор должен сдерживать продвижение ледохода вниз по течению, оставив время для подготовки нижележащего льда к разрушению. Ответа на вопрос, не возникнет ли здесь мощного затора, который в момент разрушения создаст волну прорыва, обладающую большой разрушительной силой, не получено. К счастью, подобные эксперименты на р. Лене еще не проводились. Однако опыт возведения искусственной ледовой запруды на р. Амге в бассейне Лены показал, что прорыв плотины привел к существенным русловым переформированиям ниже по течению, в результате которых нарушилось судоходство.

Основные выводы, изложенные в настоящей работе, базируются на исследовании процессов разрушения ледового покрова на р. Лене. События последних лет побудили обратить особое внимание на предотвращение последствий катастрофических наводнений, главной причиной которых являются как повышение уровней воды непосредственно вследствие заторов, так и движение волны прорыва после их разрушения.

Лена протекает в меридиональном направлении в субарктической и арктической зонах. Поэтому она отличается мощными заторами. В среднем течении Лены в наиболее заселенных местах на территории Якутии принято выделять две области формирования заторов льда: Витимо-Олекминскую и Лено-Алданскую. Выделение двух областей носит объективный характер, так как русло реки в первой области характеризуется преимущественно одиночными островами

или узлами простых разветвлений («Водные пути бассейна Лены»). Поток на большем своем протяжении проходит одним руслом, которое врезано в коренные породы, контактирующие с потоком как по берегам, так и на дне, формируя так называемые скульптурные формы рельефа (А.А.Зайцев, Т.М.Савцова, 1994). Большая часть островов в разветвлениях имеет в своем основании скалу. Слабое развитие чехла аллювиальных пород определяет медленные темпы русловых переформирований. Лено-Алданская область расположена в переходной зоне. Здесь река имеет широкую долину, коренные породы на дне реки можно встретить только в начале участка в глубоких плесах. Мощные скопления сравнительно мелкого аллювия определяют высокие темпы русловых переформирований. Русло р. Лены на этом участке отличается развитием большого количества рукавов. Одной из задач исследования было проследить за ледовыми явлениями на участках реки, расположенных в географически различных областях формирования русла при условии того, что на этих отрезках нет принципиальных отличий в физике разрушения ледовых полей и образования заторов.

Взлом льда на Лене происходит путем механического воздействия потока и находится в функциональной зависимости от интенсивности наполнения русла полыми водами. Условия протекания ледохода зависят от степени подготовленности ледового поля к движению: площади поверхности и толщины льда, степени разрушения покрова льда перед первой подвижкой.

В предвесенний период ледовый покров рек подвергается разрушающему воздействию солнечной радиации, и его толщина начинает уменьшаться. Чем ближе к моменту вскрытия реки, тем более явственным становится разрушение речного льда и за счет местных условий (выхода грунтовых вод, перекатов, впадения притоков, сброса коммунальных вод и т.д.). Однако лед при этом еще остается достаточно прочным. С подъемом уровня воды лед всплывает и «отрывается» от берегов, затем начинается его движение. Ширина закраин перед первой подвижкой льда на средней Лене местами достигает нескольких сотен метров.

Первые подвижки льда обычно происходят на участках местного расширения русла, в частности на островных участках, а также в протоках (примерно на 7 дней раньше, чем в основном русле). Несколько позднее происходит одна или несколько подвижек массивного поля льда в главном русле. Наиболее активны подвижки льда в системе перехода от переката к плесу. При подвижках ледовый покров во фронтальной области взламывается

по краям, и лед нагромождается на берега, отмели, оголовки островов и осередков, образует торосы высотой до 8 – 10 м. Цепочка образовавшихся торосов ограничивает проникновение воды на мелководные участки реки при дальнейшем подъеме уровней, сосредоточивая сток реки в сравнительно узком канале, который, как правило, совпадает с направлением зимней существенно нагруженной ложбины (канала) в русле реки. Отмечая подобные явления, мы не нашли в литературе методов выявления мест формирования торосов и разломов ледовых полей в период подвижки, несмотря на то что они определяют условия образования заторов. Особенно велика роль торошения льда на широких отмельных участках реки в многорукавном русле. Торосы приводят к локальному и временному (на период начала ледохода) образованию сужений в широком русле, где, казалось бы, пропускная способность большая.

После одной или нескольких подвижек льда в протоках начинается местный ледоход. Механическое разрушение льда на р. Лене в верхней части бассейна при затяжной весне происходит быстро и задерживается при интенсивном формировании половодья. Это объясняется тем, что в первом случае взламывается лед, подвергнувшийся длительному разрушению, тогда как во втором случае движение кромки льда замедляется из-за сохранения его прочностных свойств.

В русле с отмелями границы канала оконтурены торосами, которые сужают поток (рис. 1). Движение льда в главном русле начинается по узкому каналу, который в последующем постепенно расширяется (рис. 1 а). При быстром подъеме уровней торосы не успевают разрушиться, и поток следует по узкому каналу. Это приводит к существенному, необычному для равнинной реки росту скоростей течения. Так, по нашим наблюдениям, скорости движения плывущих льдин в «пионерном» канале достигали 3 – 5 м/с, (а иногда 6 м/с). Размеры отдельно плывущих ледовых полей достигают 160 – 200 м. Чрезвычайно редкие ледовые поля, размеры которых превышают размер «пионерного» канала, могут в любой момент закупорить его, вызвав затор льда.

Заторность на реках определяется условиями формирования половодья, которые хорошо освещены в научной литературе. Известно, что затяжная весна обуславливает перебойное формирование половодья и относительно низкую водность периода вскрытия реки, что приводит к увеличению числа заторов небольшой мощности. При дружной весне заторов образуется мало, но они вызывают экстремальные подъемы уровней.

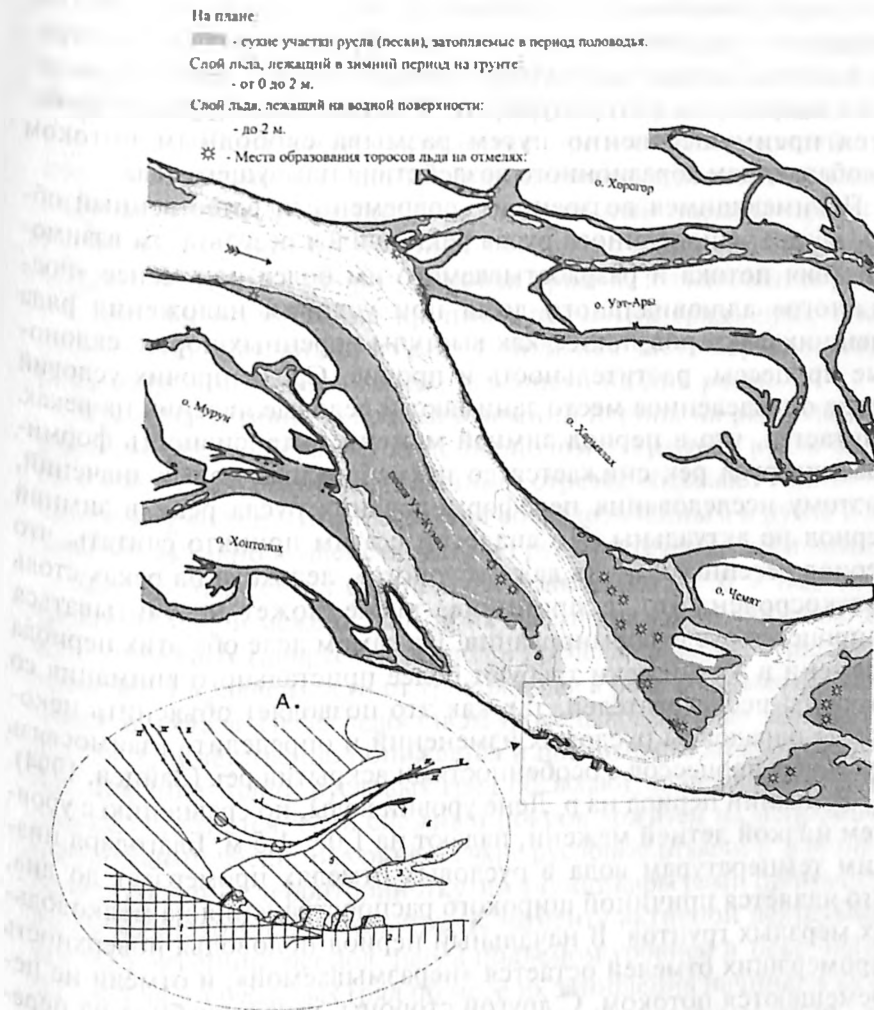


Рис. 1.

Продолжительность ледохода, в процессе которого первоначальный канал в русле быстро расширяется и вовлекает в движение все большее количество льда, обычно составляет около 7 сут. В некоторые годы его продолжительность увеличивается до 20 сут. или снижается до 2 – 3 сут. При этом по мере вовлечения в движение все большей площади ледовых полей, постепенного распадающихся на фрагменты, и разрушения торосов, скорости течения постепенно снижаются и достигают значений скоростей течения открытого русла при максимальных уровнях воды.

Следует отметить, что наибольшее разрушающее воздействие плывущего льда наблюдается главным образом в начальный период ледохода, когда, при подъеме уровней в реке, поперечные уклоны направлены в сторону берега. В дальнейшем берега разрушаются преимущественно путем размыва свободным потоком с добавлением абразионного воздействия плывущего льда.

По имеющимся воззрениям, современный естественный облик незарегулированного русла реки явился результатом взаимодействия потока и разрабатываемого им более или менее «подвижного» аллювиального ложа при условии наложения ряда внешних факторов, таких, как выступы коренных пород, склоновые процессы, растительность и прочие. Среди прочих условий некое определенное место занимают и ледовые явления на реках. Считается, что в период зимней межени интенсивность формирования русл рек снижается до пренебрежимо малых значений, поэтому исследования переформирования русла реки в зимний период не актуальны. По аналогии с этим принято считать, что период весеннего, пусть даже «бурного», ледохода на реках столь краткосрочен, что, в принципе, также может не учитываться в процессе руслоформирования. На самом деле оба этих периода времени в жизни реки требуют более пристального внимания со стороны исследователей, так как это позволяет объяснить некоторые парадоксы русловых изменений и определить взаимосвязь русловых процессов с особенностями вскрытия рек (Зайцев, 1994).

В зимний период на р. Лене уровни воды, по сравнению с уровнем низкой летней межени, падают на 1,0 – 1,5 м. Благодаря низким температурам вода в русловых отмелях промерзает до дна, что является причиной широкого распространения на мелководьях мерзлых грунтов. В начальный период половодья поверхность промерзших отмелей остается «неразмываемой», и отмели не перемещаются потоком. С другой стороны, узкая ложбина на перекатах подвержена воздействию потока в течение зимы. За этот период гребни переката размываются. На средней Лене происходит размыв гребней аллювиальных перекатов в течение зимы: глубина переката увеличивается на 1,5 – 2,5 м. Стеснение течения на перекатах в зимней период приводит к постоянному воздействию на их ложе речного потока и, соответственно, снижению толщины льда и его прочностных свойств. Лед на перекате тоньше, чем на плесе и в весенний период разрушается в первую очередь. Относительный перепад глубин в системах плес-перекат зимой значительно выше, чем в летний период, что приводит к большему разбросу абсолютных значений скорости течения.

Как отмечено многочисленными исследованиями, тепловое воздействие реки на подстилающее ложе приводит к образованию сквозного подводного талика, существующего на р. Лене в окружении многолетнемерзлых пород. Непромерзающие породы подвержены более активному эрозионному воздействию потока, поэтому, на наш взгляд, именно в длительный зимний период процессы врезки реки в коренные породы протекают наиболее активно по причине сосредоточения потока в узком канале. В этот же период боковая эрозия, вызывающая размывы берегов и смещение крупных песчаных гряд, практически отсутствует. Как видно из рис. 1, большая часть берегов оконтурена широкой полосой льда, лежащего на дне реки.

Ширина активного потока в зимний период на разветвленных участках реки по сравнению с периодом открытого русла снижается в 4 – 7 раз. На неразветвленном отрезке обсыхают только прибрежные участки. Поток остается сосредоточенным в русле и продолжает активно воздействовать на русло в течение всей зимы.

Высота отмелей на средней Лене достигает 3 – 6 м над летним уровнем низкой межени, зимой их высота становится больше. Уровень грунтовых (подрусловых) вод в пределах отмелей существенно колеблется в зависимости от уровня воды в реке во время формирования ледостава. Перед ледоставом уровень воды в реке заметно снижается, соответственно понижается и поверхность линзы грунтовых вод. Верхние толщи русловых гряд обсыхают, и мерзлотные ядра в них не образуются, если снежный покров ложится на непромоченные дождями пески. Высокие и сухие русловые отмели в районе урбанизированных территорий Якутии служат карьерами промышленно-гражданского строительства. К моменту активной деятельности потока в весенний период, перед подъемом уровней в реке, наносы верхней части русловых гряд по мере их затопления начинают активно участвовать в процессе транспорта донного и взвешенного материала. В то же время в области распространения льда в зимний период на русловых отмелях образуются мерзлотные линзы, которые скрепляют материал отмелей. Поэтому аллювий на них начинает активно размываться лишь по мере оттаивания грунтов. Это часто происходит только к концу летнего периода, а иногда аллювий остается незамороженным до начала следующей зимы. Подобные процессы характерны для рек с ледовым режимом и требуют учета.

Натурные наблюдения за ледоходом, проведенные на средней Лене в 2002 г. при уровнях половодья, соответствующих его среднегодовым параметрам, позволили получить *следующие выводы.*

Взлом льда происходит путем механического воздействия потока и находится в функциональной зависимости от интенсивности наполнения русла полыми водами. Условия протекания ледохода зависят от степени подготовленности ледового поля к движению: площади поверхности и толщины льда, степени разрушения покрова льда перед первой подвижкой. Толщина льда повсеместно была меньше обычной и изменялась в достаточно больших пределах (от 55 см до 135 см). Лед приобрел кристаллическую структуру на глубине свыше 50 см. Его прочность к моменту подвижки существенно снизилась. Движение льда началось на всем участке среднего течения Лены практически одновременно. Существенных заторов льда в местах проведения наблюдений не зарегистрировано.

Непосредственно у г. Ленска заторы не наблюдаются, город страдает только от заторов, которые образуются ниже по течению. По предварительным данным ближний затор формируется либо у оголовка острова Батамайский, либо в устье р. Кантайки, т.е. в 30 – 35 км от города. Поэтому повышение уровня у г. Ленска может достигать критических отметок в случае остановки льда только за счет роста коэффициентов шероховатости обтекаемых поверхностей, значение которых рассчитано с помощью компьютерной гидродинамической модели для участка реки у г. Олекминска. При ледовом покрове коэффициент шероховатости $n = 0,050$; в открытом русле при аналогичных гидравлических параметрах $n = 0,024$.

Мероприятия по предварительной прорезке льда, проведенные в 2002 г. в районе острова Батамайского по рекомендованной технологии, оказались успешными. Первое заметное разрушение ледового поля произошло точно по пропиленной борозде. Подвижки и ломка льда происходили на фоне интенсивного подъема уровней воды. Сильного торошения льда не происходило. Все торосы образовывались у оголовков островов и на отмелях участках русла. Прибрежный контур малоподвижного льда сформировался только в районе острова Батамайского и в Кангалассах и просуществовал до начала локального спада уровней. Прибрежный лед существенно предохранял берега от размыва потоком и разрушения его плывущими льдинами.

У г. Олекминска в меженный период стрежень потока располагается вблизи центральной части русла, скорость течения достигает 1,7 м/с. Перепад уровня воды в пределах города составляет 90 см. После строительства ниже города затона для отстоя судов динамический подпор от фронтальной части сооружения при низких уровнях воды быстро снижается вверх по течению и в районе

городских территорий не проявляется. Поток вдоль дамбы получает дополнительное ускорение при сужении русла. Однако скорости течения, которые сразу же после окончания строительства резко возросли вдоль речного откоса дамбы, к настоящему времени вновь достигли бытовых значений. Это произошло благодаря значительному росту глубины в месте стеснения потока и увеличению площади живого сечения в межень. В половодье рост глубины влияет на пропускную способность ледохода меньше, чем рост ширины русла. Поэтому в нижней части Олекминска в сужении почти ежегодно формируется затор льда.

При продвижении ледохода на р. Олекме к ее устью (Олекма почти всегда вскрывается раньше Лены) имеет место локальный кратковременный динамический подпор уровней Лены. Максимальное значение динамического подпора у Олекминска достигало 14 мая 2002 г. в 16 ч. примерно 50 см, а у дамбы — 60 см. В ночь с 12 на 13 мая произошла мощная подвижка ледового поля как в районе города, так и на участке Олекминского переката и выше по течению. К середине дня 14 мая ледоход представлял собой плотный массив колотого льда с отдельными достаточно редкими ледовыми полями размерами от 100 до 200 м. Ледоход на подъеме уровней воды в 2002 г. протекал спокойно. В 2001 г., когда наблюдались экстремальные уровни, плотный ледоход проходил на вершине волны прорыва от вышележащих заторов. Эта волна полностью затопила город.

В Олекминске наибольшее влияние ледоход оказывал на причал грузового порта. Ледоход оказывал повышенное разрушающее воздействие на крутой откос строящейся противопаводковой дамбы. Часть грунта было унесена потоком. Более пологие, характерные для естественных бечевников, откосы должны способствовать образованию вдоль берега кромки малоподвижного льда. Этому также способствуют искусственная высокая отсыпка песчано-гравийной смеси перед головными частями выдвинутых в русло полузапруд, которые тормозят движение льда, формируя торосы, предохраняющие сооружения от разрушения в первую фазу ледохода.

Так же, как и в Ленске, заторы непосредственно у г. Якутска не образуются. Катастрофические подъемы уровней были вызваны заторами льда ниже по течению. Предполагается, что ближний затор формируется в районе Петровской курьи, нижележащие — у Кангаласского мыса, в нижнем крыле излучины у с. Партизанское, у Песчаной горы и в районе Хайтыалахской протоки.

Анализ литературных источников указывает на недостаточность исследований физики формирования заторов. Однако практическая деятельность требует быстрого решения этой проблемы. С некоторым допущением можно утверждать, что в настоящий момент разработана методика определения морфометрических характеристик реки, при достижении которых отсутствуют или могут наблюдаться заторы. Теоретическая модель заторов включает численные значения факторов их образования и должна послужить основой методических разработок по борьбе с заторными явлениями. К сожалению, недостаток натуральных данных не позволяет провести численное моделирование процесса формирования заторов в настоящее время. Задачей дальнейших исследований, наряду с продолжением натуральных наблюдений, является разработка теоретической модели формирования заторов и на ее основе разработка методики прогнозирования параметров ледовых заторов, условий их формирования и разрушения.

Численная модель формирования ледового затора разработана с учетом современного опыта математического моделирования. Она отличается системой упрощенных гипотез, что позволяет аналитически выявить некоторые эффекты, связанные с образованием заторов:

1. Внутренние напряжения в заторе уравновешены, т.е. на каждой площадке

$$\tau = \tau_g \varphi \sigma + C,$$

где τ и σ — касательное и нормальное напряжения на площадке; φ — коэффициент внутреннего трения, C — сцепление.

2. Нижняя (подводная) поверхность затора определяется из условий равенства касательного напряжения и сцепления. В первом (линейном) приближении он условно выглядит как:

$$\zeta_n = hC/\tau_b,$$

где ζ_n — отсчитывается от внешней поверхности льда; h — толщина ледяного поркова.

3. Составляющей от веса льда вдоль x можно пренебречь по сравнению с трением о берега, т.е. рассматриваются равнинные реки с малыми уклонами.

Тогда уравнения движения (сохранения импульса и массы) ледохода можно записать в виде:

$$\frac{\partial U_\omega}{\partial t} + \frac{\partial U_Q}{\partial x} = \lambda_B (U - U_B)^2 B - \lambda U^2 h,$$

$$\frac{\partial S\omega}{\partial t} + \frac{\partial US\omega}{\partial x} = 0. \quad (1)$$

Здесь: U — средняя по ширине реки и толщине ледоходного поля скорость движения льдин; U_b — скорость течения воды; S — концентрация льда; ω — площадь сечения ледового поля, причем:

$$\begin{aligned} \omega &= h_d B, \text{ если } S < S_{кр}, \\ \omega &= h_d B S_{кр}, \text{ если } S = S_{кр}, \end{aligned}$$

где: h_d — толщина льдин; h — толщина ледового поля (может складываться из нескольких льдин); B — ширина реки во время ледохода; $S_{кр}$ — критическая концентрация льда;

$$Q = U\omega,$$

λ_b — коэффициент гидравлического трения ледоходного поля о воду; λ — коэффициент трения ледового поля о берега:

$$\lambda = f\left(\frac{B}{L}, \frac{R}{L}, \frac{R_x}{\rho g L}, \frac{L}{h_d}\right), \quad (2)$$

L — характерный размер льдин; R — радиус кривизны русла в плане; R_x — нормативное сопротивление льда изгибу; ρ — плотность льда.

Рассмотрим случай, когда инерционными слагаемыми можно пренебречь.

Тогда из (1) имеем:

$$\lambda_b (U - U_b)^2 B = \lambda U^2 h, \quad (3)$$

или:

$$U = \frac{U_b}{1 + \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_b} \frac{h}{B}}}. \quad (4)$$

Пусть также рассматривается случай, когда стационарный ледоход происходит с предельной концентрацией. Тогда из второго уравнения (1) получим:

$$UhB = const. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4), получим:

$$\frac{h/h_b}{1 + \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_b} \frac{h}{B}}} = const \quad (6)$$

Рассмотрим два створа реки во время ледохода. Из (6) следует, что

$$\frac{h/h_B}{1 + \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_B} \frac{h}{B}}} \Big|_{\text{в створе 1}} = \frac{h/h_B}{1 + \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_B} \frac{h}{B}}} \Big|_{\text{в створе 0}}. \quad (7)$$

Далее всем параметрам в створе 0 дадим индекс «0». Тогда запишем:

$$\frac{h}{h_0} = \frac{h_B}{h_{B0}} \frac{1 + \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_B} \frac{h}{B}}}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_0}{\lambda_B} \frac{h_0}{B_0}}}, \quad (8)$$

Решая (8) относительно h/h_0 , получим:

$$\frac{h}{h_0} = \frac{h_B}{h_{B0}} \frac{2(1+b_0) + b(h_B/h_{B0}) + \sqrt{(4 + 4\sqrt{b_0} + b(h_B/h_{B0}))b(h_B/h_{B0})}}{2(1 + \sqrt{b_0})^2}, \quad (9)$$

где $b = \frac{\lambda}{\lambda_B} \frac{h_0}{B}$; $b_0 = \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \frac{h_0}{B_0}$.

Анализ формулы (9) позволяет судить о параметрах реки, где может возникнуть затор. Пусть створ «0» характеризуется отсутствием нагромождения льдин ($h_0 = h_d$). Из формулы (9) видно, что отношение толщины ледового поля в створах пропорционально отношению глубин. Поэтому при прочих равных условиях затор возникает на участках рек, где происходит значительное увеличение глубины.

Далее, при фиксированном b_0 чем больше b , тем больше h/h_0 . Из этого можно сделать следующие выводы:

при прочих равных условиях заторы возникают при сужении русла;

поскольку очевидно, что f в формуле (2) — убывающая функция от R/L , то поворот русла стимулирует образование заторов; аналогично из формулы (2) вытекает, что высокая прочность льда также стимулирует образование затора.

Следует отметить, что за ширину (B) следует принимать ширину русла за вычетом ширины мелких участков, глубина на которых меньше или равна толщине льда.

Таким образом, формула (9) позволяет сформулировать основные морфологические особенности рек, стимулирующие образование заторов. Для прямолинейных русел наиболее опасным участком является углубляющееся русло с резким сужением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Великанов М.А. Гидрология суши. Гидрометеиздат, Л.: 1948.
2. Шуляковский Л.Г. К модели процесса вскрытия рек. //Труды Гидрометцентра СССР. Вып. 112. 1972.
3. Лисер И.Я. Весенние заторы на реках Сибири. Л.: Гидрометеиздат. 1967.
4. Нежиховский Р.А., Ардашева Г.В., Бузин В.А., Саковская Н.П. Прогнозы заторов льда на крупных реках Сибири и Дальнего Востока. //Труды ГГИ. Вып. 248. 1978.
5. Зайцев А.А., Савцова Т.М. Скульптурный и аккумулятивный рельеф врезанных русел рек восточной Сибири и особенности его формирования. //Геоморфология. 1994. №4.
6. Зайцев А.А. Роль ледостава и весеннего ледохода в процессе формирования русла крупной реки (на примере среднего течения р. Лены). В кн. «Водохозяйственные проблемы русловедения». //Тр. Академии водохозяйственных наук. М. 1994.
7. «Водные пути бассейна Лены». М.: МИКИС. 1995.

ОДНОМЕРНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ И ЛЬДА В РУСЛАХ ВОДОТОКОВ

Козлов Д.В., доктор техн. наук (МГУ Природообустройства)

Различные динамические, термические и другие гидрофизические процессы, протекающие в природных водоемах (морях, озерах, водохранилищах) и водотоках (реках, каналах) в зимний период, определяются, в первую очередь, движением жидкости и ледового материала.

Динамические процессы, протекающие в водных объектах, обусловлены рядом причин, в том числе разнообразными колебаниями, как следствием действия различных вынуждающих механизмов и их сочетаний (таблица).

В основу анализа динамики речных, озерных и морских вод заложен принцип непрерывности водной среды. Благодаря этой концепции дифференциальные уравнения, описывающие движение элемента жидкости, имеют универсальный характер независимо от разнообразия форм движения в макроскопическом масштабе.

Таблица

Классификации колебаний свободной поверхности водотоков (рек, каналов)

Явления	Причина	Период
Волны попусков	Увеличение расхода в створе возмущения (створ ГЭС, насосной станции и т.п.) - энергетическое, судоходное, - рыбохозяйственное, природо- охранное, - аварийное, сельскохозяйственное.	5 мин – 24 ч 1 – 3 сут 1 – 3 недели
Волны паводков и половодий	Последовательное суммирование стока с отдельных частей водосбора вследствие таяния снега, ледников; выпадения дождей и т.п.	До нескольких недель и даже месяцев
Ветровые волны и сгонно-нагонные явления.	Воздействие ветра и генерация ветровых волн.	20 – 30 с и более
Судовые (корабельные) волны	Движение транспортных судов (судоходство).	То же

Большая часть водных объектов России в течение длительного времени покрыта льдом. Кроме термических напряжений и связанных с ними термических деформаций, на лед воздействуют динамические процессы, которые являются результатом взаимодействия атмосферы и водоема (водотока) или же деятельности человека.

Математические модели взаимодействия непрерывных волн, распространяющихся в руслах водотоков, и ледяного покрова на поверхности потока

При расчетах динамических процессов в замерзающих водотоках, как правило, рассматриваются две гидравлические схемы водного потока под ледяным покровом. Первая схема, которой можно ограничиться, например, при расчетах паводковых волн (накануне весеннего ледохода или в его начальный период) и попусков суточного регулирования в зимних условиях, отвечает случаю, когда ледяной покров рассматривается как не связанный с берегами и свободно плавающий, следующий за всеми колебаниями уровня воды. По другой схеме лед рассматривается как примерзший к берегам. Примерзание наблюдается только при малых колебаниях уровня и сильных холодах, чаще всего на малых реках. Возможны также случаи частичного (шарнирного) примерзания ледяного покрова к берегу. В некоторых случаях на раз-

личных участках водотока и в различные периоды зимнего сезона могут одновременно наблюдаться все схемы этого явления.

Пологие непрерывные волны, возникающие в водотоках вследствие работы регулирующих сооружений или зимних (весенних) паводков, не всегда вызывают разрушение ледяного покрова, который, как правило, находится на плаву и не скреплен с берегами. В этом случае он может рассматриваться как полубесконечная плита (балка-полоса), лежащая на упругом гидравлическом основании, которая испытывает напряжения сжатия, определяемые силой трения потока о нижнюю поверхность льда и силой давления на переднюю кромку, а также напряжения изгиба, определяемые параметрами волны перемещения и прочностными характеристиками льда.

Заметим, что медленно изменяющееся неустановившееся движение воды реализуется в руслах водотоков только при условии малости кривизны линий тока. Поэтому при совместном рассмотрении колебаний водной поверхности и сплошного свободно плавающего льда можно ограничиться малыми изгибными колебаниями ледяного покрова. Это позволяет применить к поставленной задаче теорию изгиба тонких пластин, подвергающихся малым прогибам. В этом случае справедливо предположение о малости толщины ледяной пластины h_d по сравнению с длиной изгибно-гравитационной волны. Будем также считать, что сплошной ледяной покров представляет собой упругий линейно деформируемый и механически однородный материал, упругие характеристики которого не меняются в процессе деформирования.

Ледяной покров, как тонкая пластина, под влиянием изменения уровня воды будет изгибаться по цилиндрической поверхности с образующей, перпендикулярной берегам. На основании положений теории слабого изгиба тонких пластин, колебания ледяного покрова можно отождествлять с колебаниями поверхности раздела вода-лед, которой как бы присваиваются упругие характеристики льда.

Случай непрерывных волн, отвечающих медленно изменяющемуся неустановившемуся движению потока и распространяющихся в русле при наличии на поверхности ледяного покрова, впервые с теоретической точки зрения рассмотрен в 1943–1944 гг. Л.М. Качановым [12]. Исследования Л.М. Качанова представляют собой попытку применить теорию упругости к решению задач о взламывании льда в руслах рек для двух расчетных случаев: динамического, то есть взламывания льда при действии распространяющихся в водоеме волн, и статического, то есть взламывания льда при медленно поднимающемся уровне воды. В зависимости от

граничных условий задачи в качестве математического аппарата предлагалось использовать уравнения неравномерного движения жидкости, дополненные уравнением колебаний упругой пластинки, после линеаризации которых получалась система уравнений:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial(u\omega)}{\partial x} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{u^2}{C_{\text{пр}}^2 R_{\text{пр}}} + \frac{\alpha^*}{g} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} \right) = i_0 \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{h_{\text{л}} \rho_{\text{л}}}{\gamma_{\text{в}}} \frac{\partial^3 \xi}{\partial t^2 \partial x} - \frac{D}{\gamma_{\text{в}}} \frac{\partial^5 \xi}{\partial x^5}; \quad (2)$$

где $C_{\text{пр}}^2$ — приведенный коэффициент Шези для подледного потока; α^* — коэффициент неравномерности, принимаемый равным 1; ω — площадь живого сечения подледного потока; ξ — ордината профиля волны; D — цилиндрическая жесткость балки-полосы.

Уравнение (2) справедливо для случая узких рек и каналов и учитывает скрепление ледяного покрова с берегами.

В случае обширного водоема или широкой реки, покрытых льдом, не скрепленным с берегами, уравнение изогнутой поверхности ледяного покрытия принимает вид

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - gh \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} - \frac{h}{\rho} \left(h_{\text{л}} \rho_{\text{л}} \frac{\partial^4 \xi}{\partial x^2 \partial t} + D \frac{\partial^6 \xi}{\partial x^6} \right) = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) получено из уравнения сохранения количества движения для неравномерного потока в предположении, что давление в нем изменяется по гидростатическому закону

$$P = -\rho_{\text{в}} g(z - \xi) + q_{\xi}(x, t), \quad (4)$$

где давление на поверхности воды $q_{\xi}(x, t)$ может быть определено из уравнения колебаний (изгиба) тонкой упругой пластинки

$$\rho_{\text{л}} \frac{h}{l} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + D \frac{\partial^4 \xi}{\partial x^4} = q_{\xi}(x, t). \quad (5)$$

Однако в этой постановке окончательного решения задачи получено не было. К его разработке вернулись только через сорок лет в работах Е.И. Дебольской и др.

Л.М. Качанов приводит решение лишь для статического случая, когда взламывание льда происходит в условиях медленно изменяющегося уровня воды. В этом случае напряженное состояние ледяного покрова определяется условиями скрепления льда с бере-

гами. С целью определения «опасного» подъема уровня воды H_B (например, во время весеннего половодья) для некоторых наиболее характерных вариантов скрепления льда с берегами (жесткого (6), шарнирного и неполного (7)) Л.М. Качановым получены формулы

$$H_B = 17,3(\delta/E)^{0,5} \sigma_B / (\varphi \gamma_B), \quad (6)$$

$$H_B = 34,6(\delta/E)^{0,5} \sigma_B / (\varphi \gamma_B), \quad (7)$$

где σ_B — временное сопротивление льда на изгиб; γ_B — удельный вес воды; δ — толщина льда; E — модуль упругости льда; φ — коэффициент, учитывающий характер скрепления льда с берегами.

Большое практическое значение вопроса о взаимодействии подледного потока и ледяного покрова, в том числе закономерностях весеннего вскрытия рек, подтверждается работами Д.Ф. Панфилова, З.А. Генкина и др., опубликованными в 1970–80-е гг. в период интенсивного освоения рек Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера. Однако все они относятся к стационарным случаям подъема уровней в водотоках.

Так, например, З.А. Генкин рассматривает вопрос о взламывании ледяного покрова с заданными геометрическими и прочностными характеристиками давлением воды, действующим на его нижнюю поверхность. Движение потока под свободно плавающим льдом считается безнапорным. Учитывая, что у водотоков, как правило, длина русла значительно больше ширины, можно предположить, что элементарная полоса ледового покрова, находится в условиях плоской деформации. Принимая, что изгиб ледяной полосы под действием давления воды приводит к уменьшению этого давления на значение $\gamma_n \xi(x)$, где $\xi(x)$ — значение прогиба льда, дифференциальное уравнение изгиба записывается в виде

$$D \cdot \xi''''(x) = q - \gamma_n \xi(x). \quad (8)$$

Уравнение такого вида описывает поведение балочной плиты, опирающейся на винклеровское основание, и его решение известно, например, из работ А.Н. Крылова при граничных условиях, определенных по типу сопряжения льда с берегами.

Таким образом, до середины 1980-х гг. в имеющихся теоретических исследованиях, за исключением работы Л.М. Качанова, рассматривалось либо взаимодействие потока с ледяным покровом при стационарном режиме течения, либо в неограниченных по площади и глубине водоемах с идеальной жидкостью и потенциальным полем скорости.

В 1980-е гг. Е.И. Дебольская, Б.А. Фидман, В.М. Лятхер и А.Н. Милитеев, применив подход, предложенный Л.М. Качановым, избежали противоречий и развили теорию взаимного влияния ледяного покрова и длинных волн попусков и паводков, распространяющихся в руслах рек и каналов в зимний период.

При составлении уравнений, описывающих распространение непрерывной волны попуска в русле при наличии на поверхности потока ледяного покрова и отсутствии шуги (третий тип ледовой обстановки), необходимо рассматривать три расчетных случая: волна движется исключительно подо льдом, волна начинает свое движение под ледяным покровом, а продолжает в русле, свободном ото льда, и волна начинает свое движение в открытой майне (полынье), а затем достигает участка русла, покрытого льдом. В первом приближении все эти случаи описываются с помощью двухслойной модели течения, а для условий одномерной задачи и течения в руслах, близких к призматическим, уравнениями в форме Сен-Венана, для которых справедливы гипотезы теории «мелкой воды»:

$$\left\{ \begin{array}{l} B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Qu}{\partial x} + g \omega \frac{\partial z_n}{\partial x} + \frac{\tau_0 \omega}{\rho_b h} - i_0 g \omega = 0, \end{array} \right. \quad (10)$$

где B — ширина русла; z_n — отметка поверхности воды; Q — расход воды; ω — площадь живого сечения потока; u — средняя по живому сечению потока скорость течения; i_0 — уклон дна; τ — касательное напряжение на твердой границе потока; g — ускорение свободного падения; x — координата поперечного сечения, отсчитываемая вдоль оси русла; h — глубина потока.

Поиск решений системы (9) — (10) осуществляется при $0 \leq x \leq L$ (L — длина водотока или бьефа) для интервала времени $t_0 \leq t \leq T$.

Искомое решение должно удовлетворять начальным и граничным условиям. Начальные условия имеют вид $z(x, t_0) = z_0(x)$, $Q(x, t_0) = Q_0(x)$, где $z_0(x)$, $Q_0(x)$ — данные функции (уравнения свободной поверхности и расхода воды по длине водотока до начала возмущения). Простейшим случаем начального условия является установившееся движение; более сложный случай — начальное неустановившееся движение.

Граничные условия ставятся: одно в начале расчетного участка русла (бьефа) при $x = 0$ (левое граничное условие); другое в конце бьефа при $x = L$ — правое. Левое граничное условие имеет один из

следующих видов: $Q(0, t) = F(t)$, или $z(0, t) = f(t)$, то есть в начале бьефа известна либо зависимость расхода от времени (гидрограф), либо зависимость уровня от времени. Правое граничное условие имеет один из следующих видов: $Q(L, t) = F(z(L, t))$, или $z(L, t) = zL(t)$, (в частном случае $zL(t) = const$), или $Q(L, t) = QL(t)$, где $zL(t)$, $QL(t)$ — известные функции времени.

В случае распространения волны не только подо льдом, но и поверх льда на кромке ледяного покрова необходимо также задать закон распределения скоростей (условие стыковки). Назначение скоростей нижнего и верхнего потоков в точке, соответствующей кромке льда, можно осуществить с учетом потерь на обтекание кромки ледяного покрова, введя в расчет коэффициент лобового сопротивления кромки. Если же считать лед абсолютно тонкой пластиной, можно с определенной степенью уверенности предполагать, что потерь на обтекание на кромке не будет, а скорости не только верхнего, но и нижнего (подледного) потока будут равны.

Сформулированная задача (9) ... (10) допускает аналитическое решение лишь в некоторых простейших случаях, не представляющих интереса для инженерной практики. Поэтому для решения системы уравнений Сен-Венана разработаны как строгие, так и приближенные численные методы, основанные, как правило, на разностных схемах, которые реализуются на ЭВМ. Процедура выбора разностных схем и сеток, оценка устойчивости и сходимости схем, назначение порядка решения системы в настоящее время разработаны достаточно подробно и описаны в специальной литературе.

В случае, если волна распространяется также по верху ледяного покрова, уравнения, описывающие движения воды надо льдом, запишутся следующим образом:

(11)

$$\begin{cases} B_n \frac{\partial z_n}{\partial t} - B_n \frac{\partial z_n}{\partial x} + \frac{\partial Q_n}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial Q_n}{\partial t} + \frac{\partial Q_n u_n}{\partial x} + g \omega_n \frac{\partial z_n}{\partial x} + \frac{\tau_n \omega_n}{\rho_n h_n} - i_n g \omega_n = 0, \end{cases} \quad (12)$$

где нижняя граница надледного потока есть функция отметок поверхности льда z_n , поэтому $i_n = i_0 - \frac{\partial z_n}{\partial x}$; h_n — глубина потока, а $Q_n = \omega_n u_n$ — расход воды надо льдом, проходящей через площадь живого сечения надледного потока ω_n .

Для того чтобы преодолеть противоречие в применимости для надледного потока уравнений Сен-Венана к задачам распространения волн по «сухому руслу», будем считать, что поверхность льда покрыта тонким слоем воды. Это дает возможность предполагать, что для надледного потока справедлива гипотеза малых уклонов уровней, и распределение давления по вертикали соответствует гидростатическому закону.

Применяя уравнение Сен-Венана к подледному потоку, следует учитывать, что его верхняя граница не является открытой и обладает упругостью. Тогда система уравнений для подледного потока примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Q_H}{\partial t} + \frac{\partial Q_H u_H}{\partial x} + \frac{1}{\rho_B} \int_{-\beta z_B}^{+\beta z_A} \frac{\partial p}{\partial x} dz dy + \frac{\tau_H \omega_H}{\rho_B h_H} - ig \omega_H = 0, \end{array} \right. \quad (13)$$

$$\frac{\partial \omega_H}{\partial t} + \frac{\partial Q_H}{\partial x} = 0 \quad (14)$$

Математическая модель (13) ... (14) распространения длинных волн в руслах при наличии ледовых явлений, характерных для третьего типа ледовой обстановки, позволяет:

определять при наличии ледовых явлений в русле водотока или в нижнем бьефе гидроузла изменения расходов и отметок поверхности потока в периоды прохождения волн паводков или попусков на ГЭС;

вычислять время добегания воды до створов сооружений, в том числе водозаборов участников водохозяйственного комплекса;

прогнозировать состояния (деформации) ледяного покрова, производить расчет возможных мест, времени и характера разрушений ледяного покрова, а также оценивать длину участка разрушения.

Расчеты с использованием системы уравнений (13) ... (14) проводятся для двух видов контакта сплошного ледяного покрова с берегами: лед свободно плавает на поверхности воды, и ледяное поле примерзло к берегам.

При незакрепленном по берегам ледяном покрове его изгиб будет происходить по цилиндрическим поверхностям с образующей, перпендикулярной к берегам.

Учитывая, что лед представляет собой тонкую упругую пластину, и интегрируя уравнение движения для вертикальной компоненты с учетом принятых в гидравлике гипотез по z , получаем:

$$\rho_H(z) = -\rho_H g z + \rho_0(x, t). \quad (15)$$

Величину $\rho_0(x, t)$, отражающую изменение свойств гидравлического упругого основания вследствие возникновения в воде динамических полей давления при нестационарном режиме движения подледного потока, можно определить из динамического граничного условия на верхней границе подледного потока. Исходным для расчета является уравнение изгиба тонкой пластины (8), в котором $\xi = z_n(t) - z_n(0)$ — смещение плоскости пластины относительно первоначального положения. Интенсивностью поперечной нагрузки на пластину q в данном случае является разность давления жидкости на верхнюю $P_v(z_{+n})$ и нижнюю $P_n(z_{-n})$ поверхности льда:

$$q = -(P_v(z_{+n}) - P_n(z_{-n})); \quad (16)$$

$$P_v(z_{+n}) = -\rho_v g(z_n - z_{+n}), \quad P_n(z_{-n}) = -\rho_v g z_n + \rho_0(x, t).$$

После подстановки (16) в (8) можно определить $\rho_0(x, t)$. Тогда выражение для градиента давления $\frac{\partial p}{\partial x}$, входящее в (13), будет иметь вид

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \rho_0(x, t)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \nabla^4 \xi + \rho_n h_n \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \right) + \rho_v g \frac{\partial z_n}{\partial x}. \quad (17)$$

Таким образом, в уравнение для подледного потока по сравнению с уравнением Сен-Венана для открытого потока входит дополнительное слагаемое, учитывающее изменение давления за счет упругости льда. Е.И. Дебольской проведена проверка его недоучета для случая примерзшего к берегам ледяного покрова и тогда, когда лед свободно плавает на поверхности потока.

Математические одномерные модели взаимодействия нестационарного потока со свободно плавающим сплошным или битым ледяным покровом и шугой

До настоящего времени остаются малоизученными вопросы взаимного влияния свободно плавающего сплошного или битого льда и нестационарного движения воды в зимне-весенний период, а также влияния шуговых образований на процессы трансформации волн.

С этой целью рассмотрим непримерзший ледяной покров как механически однородную и линейно деформируемую пластину, лежащую на упругом гидравлическом основании и подвергающуюся слабому изгибу ($k \cdot h_n \ll 1$, где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число) от действия подледного потока, удовлетворяющего условиям «мелкой воды» ($k \cdot h \ll 1$).

Принимая в качестве исходных уравнение неразрывности и динамическое уравнение для подледного потока с учетом выражения для градиента давления (21,21) в нем и перейдя к другим зависимым переменным $u(x,t)$, $h(x,t)$, получаем эквивалентную с математической точки зрения недивергентную систему уравнений, описывающую совместное движение свободно плавающего ледяного покрова и нестационарного подледного потока:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (uh)}{\partial x} = 0, \quad (18)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_{II}}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{|u| \cdot u}{C^2 R} - g i_p = 0, \quad (19)$$

$$D \frac{\partial^4 \zeta}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = p_H, \quad (20)$$

где p_H — давление на нижнюю поверхность льда.

Линеаризация системы уравнений (18) — (20) относительно некоторого установившегося режима в потоке глубиной h_0 и скоростью v_0 , с горизонтальным дном, с учетом и без учета сил трения, и последующее исследование дисперсионного уравнения позволяют получить выражения для фазовой скорости распространения прямой положительной волны при наличии свободно плавающего сплошного (21) и битого льда (22).

$$C_f = v_0 + \sqrt{h_0 \left(g + D / \rho_B k^4 - h_n \rho_n / \rho_B v_0^2 k^2 + h_0 h_n \rho_n / \rho_B \cdot D / \rho_B k^6 \right)}; \quad (21)$$

$$C_f = v_0 + \sqrt{h_0 \left(g - h_n \rho_n / \rho_B v_0^2 k^2 \right)}. \quad (22)$$

Оценка влияния ледяного покрова на скорость распространения волны, проведенная по зависимостям (21), (22) и данным натуральных и лабораторных экспериментов, показала, что при увеличении длины волны скорость распространения возмущения в системе «поток — лед» достаточно быстро стремится к скорости распространения гравитационных волн в жидкости со свободной поверхностью. Поэтому для установившегося длинноволнового возмущения в нестационарном потоке влияние сплошного (битого) свободно плавающего льда на скорость распространения волны мало, то есть трансформация длинной волны происходит так, как если бы ледяного покрова не существовало. В этом случае влияние упругих свойств свободно плавающего ледяного поля на распространение непрерывных волн попусков или паводков можно практически не учитывать. Тогда в случае свободно плавающего ледяного покрова методика расчета характеристик волнового по-

тока остается той же, что и для случая открытого потока. Это дает возможность применять для расчета трансформации волны возмущения в системе «поток — лед» уравнения медленно изменяющегося неустановившегося движения воды для открытых русел, например в форме Сен-Венана. А наличие на поверхности потока свободно плавающего льда может учитываться, например, коэффициентом шероховатости n_d (или коэффициентом трения λ) нижней поверхности ледяного покрова в эмпирическом законе сопротивления для уклона трения в уравнении движения (19).

Здесь следует отметить, что проблема корректной постановки задачи расчета неустановившегося движения в естественном или искусственном русле как при наличии на поверхности потока ледяного покрова, так и без него в настоящее время сводится к проблеме наиболее точного определения сопротивления при нестационарном течении. Поэтому определение касательного напряжения в соотношении для уклона трения в уравнении движения (13) требует дополнительных гипотез, так как непосредственно величину τ измерить практически невозможно.

Согласно натурным наблюдениям, например, дрейфующий лед обладает гидродинамически шероховатой нижней поверхностью, которая значительно повышает сопротивление трения при подледном течении, и поэтому касательное напряжение трения для поверхности раздела «лед — вода» можно определять по квадратичной зависимости:

$$\tau = \rho_B C_w u_z^2, \quad (23)$$

где C_w — коэффициент гидродинамического сопротивления; u_z — значение средней скорости движения воды относительно льда на некотором стандартном уровне z от нижней поверхности. Очевидно, что значение коэффициента C_w переменное и зависит как от характеристик подледного течения, так и от состояния подводного рельефа льда.

Для равномерного или плавно изменяющегося неравномерного потока в рамках одномерной задачи ледовой гидравлики при определении величины τ традиционно используют формулы Шези (24) или Дарси-Вейсбаха (25):

$$\tau = \rho_B g / C^2 u^2; \quad (24)$$

$$\tau = \rho_B \lambda / 2 u^2, \quad (25)$$

где C — коэффициент Шези и λ — безразмерный коэффициент трения.

Очевидно, что соотношения (комплексы) $\tau / (\rho u^2)$, g/C^2 и $\lambda/2 \neq \text{const}$, в связи с чем задача теории гидравлического сопротивления превращается фактически в задачу определения коэффициентов C и λ .

Согласно натурным наблюдениям и с точки зрения теории гидравлических сопротивлений подледных русел, потоки под ледяным покровом можно условно разделить на две категории:

потоки с полным отсутствием или наличием небольшого количества шуги;

потоки с наличием большого количества подледной шуги, в том числе зажоров из шуги.

В работах Н.Ф. Юрченко показано, что в подледных бесшуговых потоках шероховатость нижней поверхности ледяного покрова может определяться только кинематическими характеристиками, например числом Рейнольдса Re , а зависимость для коэффициента Шези C имеет вид

$$C = 0,75(\lg Re)^{2,2}. \quad (26)$$

При описании гидравлических сопротивлений подледных потоков, характеризующихся наличием участков торошения льда и оставившейся под ледяным покровом шуги (зажоров), справедливы зависимости, полученные В.А. Соколовой, для условий, когда размеры абсолютной шероховатости соизмеримы с глубиной потока

$$C = 16,9(R/\Delta)^{0,175}, \quad (27)$$

где R — гидравлический радиус, в плоском подледном потоке $R = H/2$; H — рабочая глубина потока; Δ — высота выступов шероховатости нижней поверхности льда, определяемая, например, по зависимости $\Delta = h_n \cdot \cos 45^\circ$; h_n — толщина ледяного покрова.

Учитывая (26) и (27) в (24), соответственно получаем выражения для двух вариантов расчета τ :

$$\tau = 741,8 / (\lg Re)^{4,4} u^2, \quad (28)$$

$$\tau = 3,4(\Delta/R)^{0,35} u^2. \quad (29)$$

Если в расчетах уклона трения в динамическом уравнении движения (10) или (13) использовать традиционный подход с применением квадратичного закона сопротивления (формулы (24) и (25)), вид τ_n и τ_n будет аналогичен τ_0 , изменится лишь значение коэффициента шероховатости p и вид зависимости для гидравлического радиуса R . В этом случае, применяя гипотезу о связи турбулентного касательного напряжения с полем осредненных ско-

ростей, для τ_0 будет справедливо выражение (25), где коэффициент Дарси λ определяется, например, по зависимости

$$\lambda = \frac{2gn^2}{R^{1/3}}, \quad (30)$$

в которой n — коэффициент групповой шероховатости.

Волновые воздействия на зарегулированных и незарегулированных участках водотоков крайне осложняют напряженное состояние и деформации ледяного покрова, вызывая значительные изменения в нем (трещинообразование, подвижки, разрушение).

Механизм разрушения ледяного покрова на зарегулированных и незарегулированных участках рек определяется режимом неустановившегося движения воды и прочностными характеристиками льда. При волнах попуска (половодья), поднырывающих под ледяной покров, разрушение кромки льда происходит, как правило, по гребню волны, идущей под ледяным покровом. Работая на изгиб, ледяной покров достигает критических прогибов и ломается.

Напряжения σ , возникающие в ледяном покрове при изгибе, могут быть приближенно рассчитаны по формуле

$$\sigma = \frac{M_{(x,t)}}{W_x}, \quad (31)$$

где $M_{(x,t)}$ — изгибающие моменты, возникающие в ледяном покрове; $W(x) = h_l^2/6$ — момент сопротивления ледяной балки-полосы (пластины) единичной ширины.

Для прогноза разрушения ледяного покрова под действием динамической нагрузки от медленно изменяющегося длинноволнового возмущения можно использовать критерии разрушения, записанные для свободно плавающего льда:

$$\left| \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \right|_{\max} \geq \frac{2\sigma_{\text{пр}}}{Eh_l}, \quad (32)$$

а для закрепленного с берегами ледяного покрова в виде

$$\left| \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \right|_{\max} \geq \frac{2\sigma_{\text{пр}}}{Eh_l}, \quad (33)$$

$$\xi(y) \geq \frac{\sigma_{\text{пр}} B_l^2}{4Eh_l}, \quad (34)$$

где $\sigma_{\text{пр}}$ — предел прочности льда; $\xi(y)$ — прогиб в поперечном направлении.

Тот или иной вид движения шуги определяется, в первую очередь, скоростным режимом водотока, а также другими гидравлическими элементами потока (глубиной, уклоном, шероховатостью), физическими свойствами шуги (пористостью, гидравлической крупностью, сцеплением) и количеством ледяного материала.

Прежде чем приступить к математическому описанию неустановившегося движения двухслойного потока на шугоносном участке реки или нижнего бьефа, приведем некоторые допущения, сделанные нами:

переходная зона от чистой воды к слою, содержащему образования льда, сводится к поверхности раздела;

поверхность раздела при установившемся до попуска режиме считается плоской;

плотность каждого слоя по вертикали постоянна.

В принятой схеме потока глубины слоев h_1 и h_2 в общем случае трактуются как переменные по длине, соответствующие координатам свободной поверхности и линии раздела шуга-вода. Для шугоносного слоя поверхность раздела может рассматриваться как «дно» с касательным напряжением $\tau_{ш}$, а τ_n и τ_g характеризуют, соответственно, ветровое напряжение на свободной поверхности и «донное сопротивление».

Шугоносный слой, как правило, имеет устойчивую стратификацию плотности по глубине, что способствует частичному затуханию турбулентного перемешивания. Поэтому потери энергии на турбулентное перемешивание в шугоносном слое составляют меньшую величину по сравнению с нижним слоем, где турбулентное перемешивание развивается беспрепятственно. Кроме того, как отмечается в работе В.П.Берденникова, гидравлические потери на трение у шугоносного слоя на границе с воздухом практически отсутствуют ($\tau_n = 0$), а на границе с нижним слоем «чистой воды» они значительно меньше, чем потери у дна ($\tau_{ш} < \tau_g$). Это позволяет утверждать, что шуговой слой должен иметь некоторую избыточную скорость по сравнению с нижним слоем «чистой воды».

Р.А. Нежиховский предлагает скорость шуги при ее свободном движении в поверхностном слое потока ориентировочно определять по зависимости

$$U_{шуги} = 1,06U_{потока} \quad (36)$$

Кроме того необходимо учесть, что лед в потоке может находиться в двух состояниях: внутриводный лед и поверхностная шуга. Донный лед в рассматриваемых нами задачах можно не учитывать, так как на крупных и средних водотоках он практически не наблюдается.

Формирование в потоке внутриводного льда и поверхностной шуги можно рассматривать как результат фазовых переходов между двумя слоями, а также взаимных переходов льда, находящегося в различных состояниях (например, «внутриводный лед → поверхностная шуга»). В принятой двухслойной схеме движения потока эти процессы удобно выразить понятием обмена воды (жидкости) через поверхность раздела «шуга – вода», обозначив его через f_2 в направлении от нижнего слоя к верхнему и f_1 — от верхнего слоя к нижнему.

В периоды замерзания водотока и зимних похолоданий в потоке наблюдается некоторое переохлаждение воды, что приводит к образованию внутриводного льда. Этот процесс можно описать взаимным переходом «вода → внутриводный лед». При этом нарастание толщины шугоносного слоя происходит, в основном, за счет присоединения к плывущей шуге новых кристаллов льда, а не за счет увеличения кристаллов уже имеющихся шуговых образований. Поэтому переход «вода → поверхностная шуга» для этих периодов не рассматривается. В условиях достаточного переохлаждения воды и низких температур воздуха кристаллы внутриводного льда, объединяясь, всплывают на поверхность, образуя поверхностную шугу. Этот процесс описывается переходом «внутриводный лед → поверхностная шуга». Допуская, что весь внутриводный лед идет на формирование шуги, обменный процесс f_2 в направлении от слоя «чистой воды» к шугоносному слою будет полностью количественно описываться взаимным переходом «вода → внутриводный лед» и для его расчета можно воспользоваться рекомендациями А.И. Пеховича. Для периодов замерзания водотока и зимних похолоданий фазовый переход f_1 от верхнего шугоносного слоя к нижнему равен нулю. Количественное описание этих переходных процессов приводится, например, в работах В.А. Рымши и Н.М. Абраменкова.

Таким образом, если плотность нижнего слоя (чистой воды) постоянна, а верхнего (шуга с водой) — переменная в продольном направлении и известен закон изменения, неустановившееся движение двухслойного потока на шугоносном участке водотока при принятых выше допущениях можно описать системой уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_1 h_1) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 u_1 h_1) - (\rho_2 f_2 - \rho_1 f_1) = 0; \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_1 u_1 h_1) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 u_1^2 h_1) + g h_1 \rho_1 \frac{\partial}{\partial x}(h_2 + h_1) - g h_1 \rho_1 i_p + \\ + \frac{g h_1^2}{2} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} + (\rho_1 u_1 f_1 - \rho_2 u_2 f_2) + (\tau_{ш} - \tau_n) = 0; \end{aligned} \quad (38)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_2 h_2) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_2 u_2 h_2) - (\rho_1 f_1 - \rho_2 f_2) = 0; \quad (39)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_2 u_2 h_2) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_2 u_1^2 h_2) + \\ & + g h_2 \left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 h_1) + \rho_2 \left(\frac{\partial h_2}{\partial x} - i_v \right) + \frac{h_2}{2} \frac{\partial \rho_2}{\partial x} \right] + \\ & + (\rho_1 u_1 f_1 - \rho_2 u_2 f_2) + (\tau_g - \tau_{ш}) = 0. \end{aligned} \quad (40)$$

Начальные условия для системы уравнений (37) ... (40) соответствуют установившемуся до пуска режиму потока. Значение начальной толщины верхнего слоя «шуга — воды» для ледовых условий, когда шуга заносится течением под кромку ледяного покрова, можно ориентировочно принять по формуле толщины кромки ледяного покрова

$$h_{н.к} = 1,77 \frac{u^2 b}{C_{np}^2}, \quad (41)$$

где u — средняя скорость потока в зоне кромки льда; b — ширина транзитного участка; $C_{np} = \frac{R^{1/6}}{n_{np}}$ — коэффициент Шези; R — гидравлический радиус подшугового потока; n_{np} — приведенный коэффициент шероховатости.

Для нижних бьефов действующих гидроузлов значение начальной толщины определяется по данным натурных наблюдений.

В качестве граничного условия в створе начала шуготранзита принимаются зависимости $u = f(t)$ и $H = f(t)$, полученные, например, расчетным путем (по (25) ... (26)) для участка водотока с открытой водной поверхностью.

Учет разноплотностных эффектов на шуготранзитном участке водотока в уравнениях движения осуществлен посредством членов, содержащих градиент плотности.

В связи с тем, что плотность верхнего шугоносного слоя может меняться как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении, динамические уравнения (37) ... (40) должны быть дополнены уравнениями состояния изменений плотности ρ_1 . Если предположить, что плотность шугоносного слоя не зависит от вертикальной координаты, то в общем виде изменение

плотности в горизонтальном направлении можно описать одномерным уравнением переноса-диффузии

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + u \frac{\partial \rho_1}{\partial x} - D_f \frac{\partial^2 \rho_1}{\partial x^2} = 0. \quad (42)$$

Численные решения уравнения (42) известны и часто весьма сложны. Кроме этого, в процессе решения всегда встает вопрос о величине коэффициента диффузии D_f , которое для условий шугоносного потока вообще трудно определимо. Поэтому в условиях слабой турбулизации в шугоносном слое в первом приближении можно ограничиться рассмотрением случая, когда плотность шугоносного слоя подчиняется линейному закону распределения вдоль потока.

Для оценки возможности возникновения и пределов устойчивости плотностного течения на шугоносном участке водотока необходимо предварительно установить специальные критерии, например, Ричардсона.

Поскольку значения турбулентных напряжений $\tau_{ш}$ и τ_g являются неопределенными, число неизвестных в системе (38) ... (40) в общем случае превышает число имеющихся уравнений, и задача не может быть решена вследствие ее незамкнутости. Все это приводит к необходимости построения приближенных методов решения уравнений (38) ... (40) на основе дополнительных гипотез и допущений.

В литературе, посвященной расчету стратифицированных течений, приводятся различные гипотезы для определения касательных напряжений трения. Е.В. Бруацкий для турбулентного трения рекомендует выражение

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp(-r \cdot Ri), \quad (43)$$

где τ_0 — турбулентное трение в однородной среде, r — эмпирический коэффициент пропорциональности, определяемый опытным путем.

Имеются также и другие предложения по определению касательных напряжений трения. Однако, как правильно отмечает Е.И. Дебольская, практически все эмпирические или полуэмпирические зависимости для определения гидродинамических параметров (в том числе и трения) неудовлетворительно отражают природу подледных потоков. Теоретические исследования в этой области встречаются те же сложности, что и проблемы общей теории турбулентности.

Поэтому при расчете касательных напряжений, так же как и для (24), можно воспользоваться гипотезой о связи турбулентного касательного напряжения с полем осредненных скоростей. В предварительных расчетах можно рекомендовать значение ко-

эфициента шероховатости нижней поверхности шуголедяного ковра, равное $n_{\text{ш}} = 0,05$ (соответствующее затору из рыхлой шуги).

Приступая к расчету движения двухслойного потока на шугоносном участке водотока, необходимо установить тип ледовой обстановки в зоне кромки льда и степень устойчивости плотностного течения при заданных начальных и граничных условиях. По мнению В.М. Потапова, сформировавшийся из шуги поверхностный слой является устойчивым лишь при скорости потока $0,7 \dots 1,4$ м/с. При возрастании скорости течения частицы шуги начинают вовлекаться в глубь потока и, наконец, при скоростях порядка $2,5 \dots 3,0$ м/с — распределяться по всему живому сечению.

Для случаев, когда скорости течения в водотоке больше $2,5 \dots 3,0$ м/с, движение сильно турбулизованного потока на шуготранзитном участке будет представлять собой течение двухкомпонентной среды, состоящей из воды и содержащихся в ней частиц внутриводного льда и шуги, имеющих отрицательную гидравлическую крупность. Движение такого потока будет, по-видимому, отвечать уравнениям механики взвесенесущей жидкости.

Таким образом, математическая модель (37) ... (40) распространения длинных волн в руслах при наличии ледовых явлений, характерных для второго типа ледовой обстановки, позволяет при известных начальных и граничных условиях получить отметки свободной поверхности шугоносного потока, определить глубины каждого из слоев (то есть положение внутренней границы раздела шугоносного потока), гидравлические и уровенные условия на кромке устойчивого ледяного покрова, а также объем насыщенной водой шуги в лобовой части волны и скорость ее распространения, что особенно важно для прогнозирования ледовых затруднений (зажоров) на зарегулированных участках водотоков.

Численная реализация задачи о медленно изменяющемся неустановившемся движении речного потока на шугоносном участке нижнего бьефа низконапорного гидроузла показана на рис. 1. Изложенная выше одномерная постановка нестационарной задачи для шугоносного потока в широком прямоугольном русле реализована на ПЭВМ с помощью программы «FLOATICE», использующей явную разностную схему для двухслойной задачи в предположении равномерности шугохода на шуготранзитном участке ($\rho_1 = \text{const}$ и $\rho_2 = \text{const}$) и равенстве нулю фазовых переходов f_1 и f_2 . Тестирование программы проводилось на двух примерах: «разрушение низконапорной плотины» и «обратный уклон (треугольник)». На рис. 1 приводится результат численного экспе-

римента для двух вариантов распространения волны прорыва низконапорной плотины (высотой $H = 20$ м) в широком гипотетическом русле (с начальной глубиной в нижнем бьефе $h = 2$ м): при наличии на приплотинном участке шуготранзита (вариант 1) и при его отсутствии (вариант 2). Расчеты распространения волны прорыва для второго типа ледовой обстановки позволили получить не только отметки поверхности потока шуго-воды, но и определить глубины каждого из слоев (т.е. положение внутренней границы раздела шугоносного потока), а также объем насыщенной водой шуги в лобовой части волны и скорость ее распространения, что особенно важно для прогнозирования различных ледовых затруднений (например, зажоров).

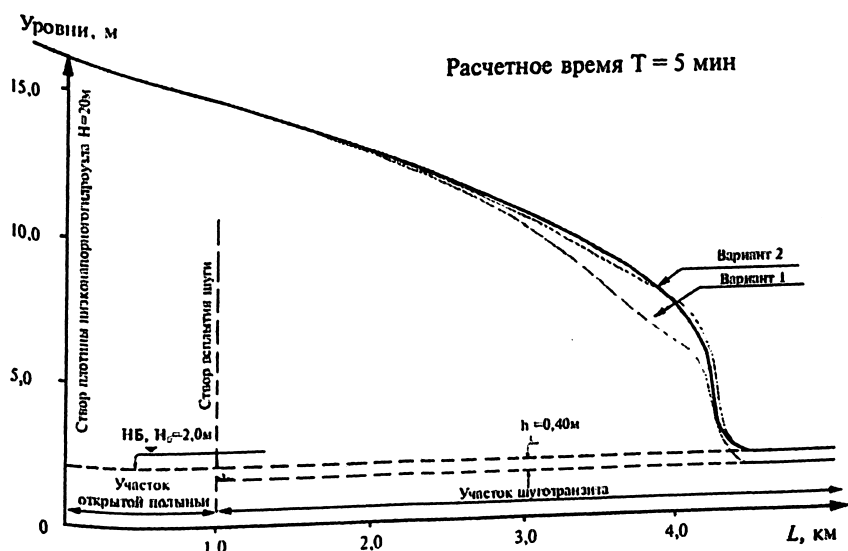


Рис. 1. Распространение волны прорыва при наличии шуготранзита: вариант 1 — наличие шугоносного слоя в приплотинной полынье, шугоносный слой; вариант 2 — отсутствие ледовых образований в нижнем бьефе гидроузла, открытая водная поверхность

Натурные экспериментальные исследования

нестационарных потоков в замерзающих природных водотоках

К настоящему времени в специальной литературе имеются следующие материалы, полученные по результатам экспериментальных натурных исследований нестационарных процессов на водотоках в зимних условиях. К ним относятся исследования

неустановившегося движения воды р. Волги в зимних условиях, выполненные экспедицией института Гидропроект в 1938–1939 гг. в нижнем бьефе Ивановской ГЭС (Я.Д. Гильденблат, 1948); зимнего режима р. Волги за 1956 ... 1958 гг., выполненные Гидроэнергопроект в нижнем бьефе Горьковской ГЭС; зимнего режима р. Ангары за 1963г., выполненные институтом Гидропроект в нижнем бьефе Иркутской ГЭС; неустановившегося движения воды р. Свирь в зимних и летних условиях, выполненные в 1960–61 гг. экспедицией ГГИ (М.С. Грушевский, М.Л. Рупперт и др.); специальные наблюдения за водным режимом на участках рек ниже ГЭС (материалы Гидрометцентр СССР под ред. А.П. Жидикова); натурные наблюдения за ледовым режимом и неустановившимся движением воды в нижнем бьефе Волгоградской ГЭС (А.Д. Смелякова, МГМИ, 1970–1973 гг.); экспедиционные исследования уровней воды в периоды замерзания и вскрытия, выполненные в низовьях р. Урала в 1981–82 гг (Р.Г. Абдрахимов и др.).

Организация детальных наблюдений за движением воды в нижних бьефах гидроэлектростанций, особенно в условиях сильной нестационарности потока и зимних ледовых явлений, — сложный и уникальный производственный процесс.

Такой комплекс работ одним из первых был выполнен экспедицией научно-исследовательского сектора Московского филиала института «Оргэнергострой» под руководством С.С.Павловского в нижнем бьефе Горьковской (Нижегородской) ГЭС в 1956 ... 1958 гг. В соответствии с программой исследований экспедицией в период с 10. 01 по 15. 03. 1958 г. были проведены наблюдения за уровнями воды на 13 водпостах на участке р.Волги от Горьковской ГЭС (2412 км от устья) до поселка Работки (2291 км от устья), а также учащенные измерения расходов воды на гидростворах у г. Городца и пос. Работки с целью изучения распыстывания суточных волн попусков на ГЭС.

Серия наблюдений за уровнями воды была выполнена в начальный период зимнего похолодания (с 1. 02 по 5. 02. 1958 г.). Положение кромки устойчивого ледостава на 1. 02 и 2. 02 соответствовало створу водпоста №8 в 5 км от ГЭС. Причем на участке нижнего бьефа от водпоста №5 (2 км от ГЭС) до водпоста №8 наблюдались скопления шуги средней толщиной 20 см. Средняя скорость течения на приплотинном участке была незначительной 0,15 ... 0,19 м/с, а в зоне кромки льда наблюдалось медленное затухание шугохода.

Движение потока в нижнем бьефе ГЭС, наблюдавшееся к 6 ч утра 2. 02. 1958 г., было близким к установившемуся. При этом

с 0 до 6 ч утра на ГЭС работал только один агрегат с расходом 42 м³/с (рис.2). Среднее значение глубины потока на исследуемом 120-километровом участке составляло 4,0 ... 5,5 м при средней ширине реки 1080 ... 1100 м.

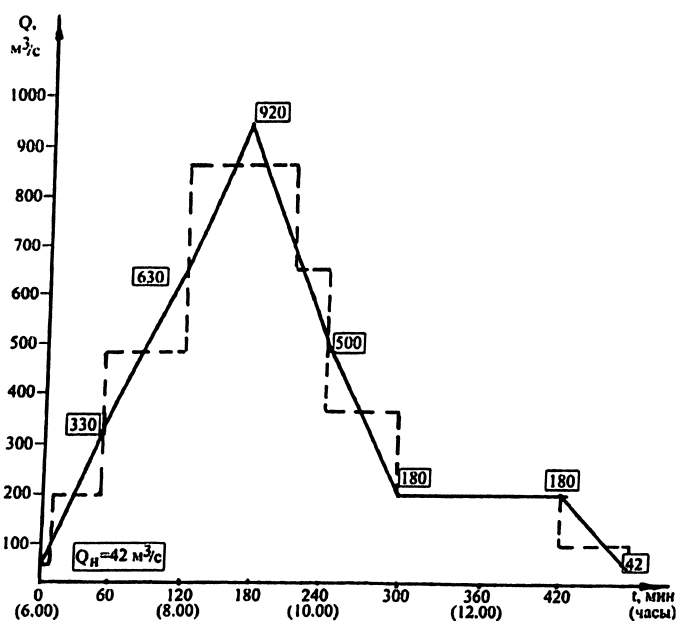


Рис. 2. График утреннего попуска 2 февраля 1958 г. на Горьковской ГЭС.

Обработанные нами результаты натуральных исследований неустановившегося движения воды в нижнем бьефе Горьковской ГЭС были использованы для выполнения численных расчетов волновых процессов в зимних условиях на приплотинном участке ГЭС при наличии затухающего шугохода и свободно плавающего ледяного покрова. Расчеты выполнялись по программе «ICECHANE», алгоритм которой базируется на численном методе конечно-разностной аппроксимации уравнений (18) – (19) по явной разностной схеме Лакса-Вендроффа. В качестве расчетного попуска (рис. 2) был принят гидрограф утреннего сброса 2. 02. 1958 г., когда ледовая обстановка в нижнем бьефе ГЭС характеризовалась режимом наступления кромки ледяного покрова и наличием в приплотинной полынье затухающего шугохода. Результаты численных экспериментов представлены на рис. 3.

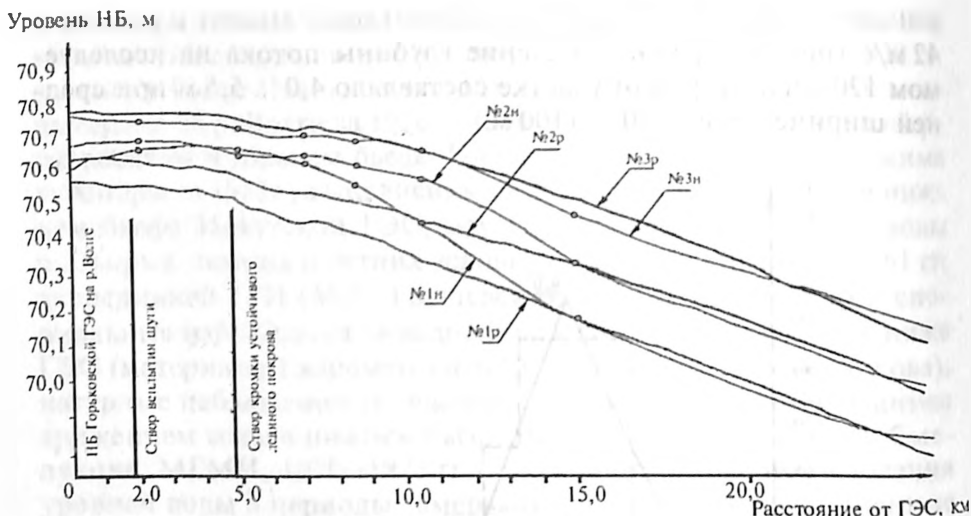


Рис. 3. Расчетные и наблюдаемые продольные профили поверхности потока в НБ Горьковской ГЭС на р. Волге 2 февраля 1958 г.: №1 — 7 час 00 мин; №2 — 8 час 00 мин; №3 — 9 час 30 мин (н — наблюдаемые, р — расчетные).

Рассмотрим еще один пример экспериментальных натуральных (зимой 1961 г.) исследований неустановившегося движения в нижнем бьефе Нижне-Свирской ГЭС, состоящем из 14 отрезков с приблизительно однородными морфологическими и ледовыми условиями.

Река Свирь в пределах 59-километрового экспериментального участка имеет правильное корытообразное русло без затопляемой поймы. Зимой в результате низкого стояния уровня Ладожского озера участок нижнего бьефа ГЭС находился вне распространения подпора. Значительная интенсивность изменения уровня, а также небольшие морозы во время эксперимента (с 11. 02 по 18. 02. 1961 г.) исключали возможность смерзания ледяного поля с берегами на участке нижнего бьефа ГЭС. Наблюдения за гидравлическими характеристиками потока производились на 6 гидростворах и 29 водомерных постах.

Ниже приведем результаты анализа скорости распространения начала возмущения в условиях русла, покрытого льдом. Оценка влияния ледяного покрова на скорость распространения волн попусков была выполнена на основе материалов наблюдений в нижнем бьефе Нижне-Свирской ГЭС с учетом работ М.Л. Рупперта. Теоретические скорости распространения начала возмущения

вычислялись по формуле Лагранжа $c = \sqrt{gh}$ и формулам (21), (22) с учетом гидравлических характеристик потока, ледяного поля, а также длин волн, наблюдавшихся за период попусков.

Для опорожненного русла (до 20-го км от ГЭС) наблюдаемые скорости распространения фронта волны мало отличались от теоретических (в пределах 3 — 8%). При рассмотрении скорости распространения начала возмущения по наполненному руслу (18.02.1961 г.) наблюдалось некоторое увеличение экспериментальных значений скорости при приближении к зажору. Это, по видимому, является следствием увеличения глубины потока из-за подпорного влияния зажора. Падение скорости на участке зажора связано как с резким понижением скорости потока, так и возрастанием роли трения. Поэтому в наполненном русле геометрические и упругие свойства льда на участке зажора оказывают незначительное влияние на значение скорости распространения волнового возмущения.

Таким образом, в руслах при наличии на поверхности потока свободно плавающего ледяного покрова влияние физико-механических характеристик льда на скорость распространения фронта волны существенно лишь в пределах относительно короткого участка вблизи створа возмущения (например, для НБ Нижне-Свирской ГЭС — 15 ... 20 км). На более отдаленных участках водотока основную роль в этом процессе играют силы трения. Поэтому формулы (21), (32) для расчета фазовых скоростей распространения волн попусков могут применяться только в пределах малоудаленных от ГЭС участков.

Ниже приведем результаты численной реализации задачи о распространении волн попусков в нижнем бьефе Нижне-Свирской ГЭС для режима стабилизации кромки ледяного покрова, которому по времени соответствовала первая декада февраля 1961 г. Расчеты трансформации волны попуска производились по уравнениям (18), (19), а колебания свободно плавающего ледяного покрова — по уравнению (35). В качестве граничного условия на левой границе расчетного участка (створ ГЭС) был принят гидрограф попуска (рис.4), а на правой границе — постоянство уровня водной поверхности на период попуска.

Результаты численных экспериментов, представленные на рис. 5, показывают, что волна утреннего попуска 13.02.1961 г. достигает створа кромки ледяного покрова через 3,5 мин после начала сбросов на ГЭС. В первые минуты после достижения волной

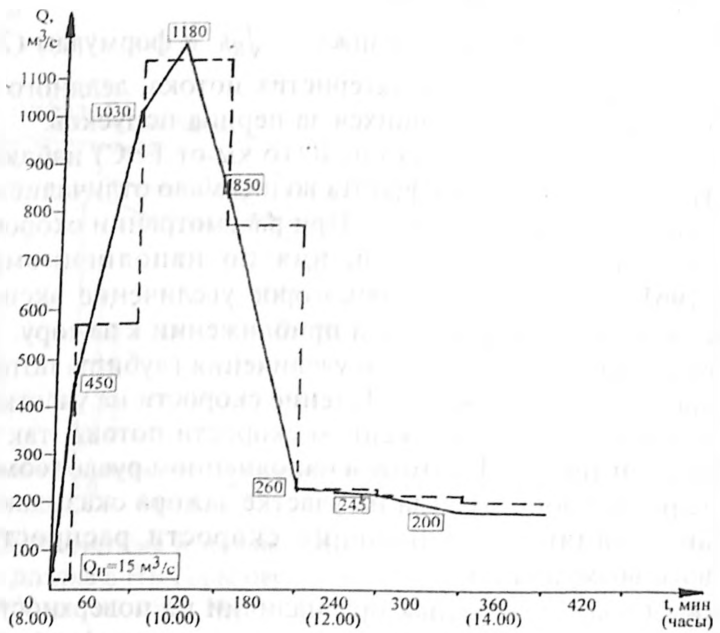


Рис. 4. График утреннего попуска 13 февраля 1961 г. на Нижне-Свирской ГЭС.

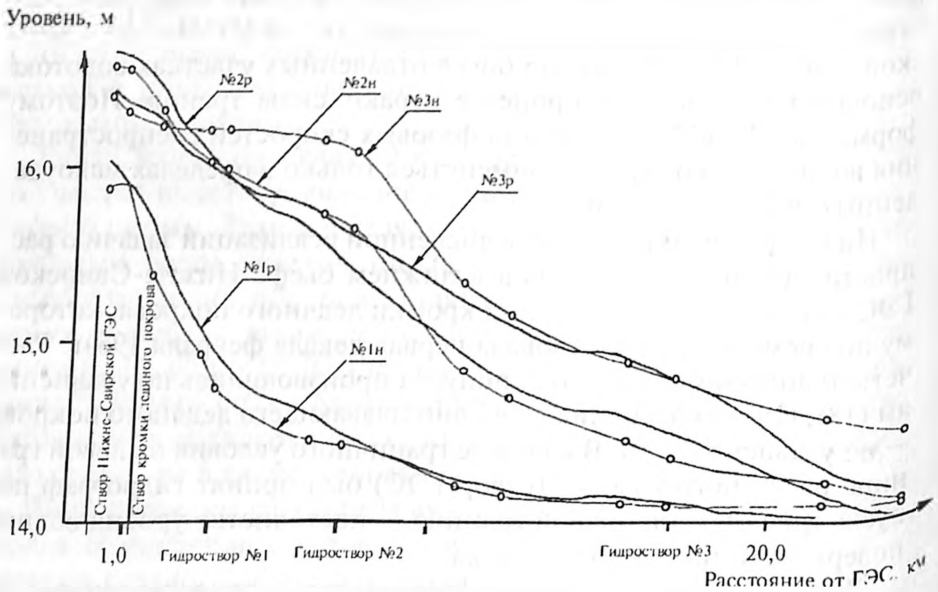


Рис. 5. Расчетные и наблюдаемые продольные профили поверхности потока в НБ Нижне-Свирской ГЭС на р.Свирь 13 февраля 1961 г.: №1 — 9 час 00 мин; №2 — 10 час 00 мин; №3 — 10 час 30 мин (н — наблюдаемые, р — расчетные).

кромки льда разрушение устойчивого ледяного поля наблюдается на незначительном по длине участке в зоне кромки, а в дальнейшем длина участка разрушения увеличивается до 200 – 250 м при максимальных значениях разрушающих прогибов 0,040 – 0,045 м.

Выводы

1. Всестороннее рассмотрение ледотермических и гидравлических процессов в естественных и зарегулированных водотоках позволило получить в виде систем дифференциальных уравнений в частных производных (18) ... (20), (37) ... (40) расчетные математические модели одномерного медленно изменяющегося неустановившегося движения потока в широком призматическом русле, учитывающие особенности ледовой обстановки: интенсивный и затухающий шугоход, свободно плавающий сплошной и битый лед. Сопоставление результатов расчета с данными натурных экспериментов в нижних бьефах Горьковской и Нижне-Свирской ГЭС подтверждает возможность применения разработанных моделей при решении задач краткосрочного прогноза гидравлического и ледового режимов на зарегулированных участках рек.

2. На основании теоретических исследований задач о совместном движении свободно плавающего ледяного покрова и нестационарного подледного потока получены формулы для расчета фазовых скоростей волнового возмущения (21), (22), а также интегральное выражение (35) для собственных прогибов ледяной балки-полосы при подныривании волны попуска под кромку ледяного покрова. Практическое применение полученных зависимостей связано, в первую очередь, с решением задач о распространении волн попусков в период ледостава, а также позволяет проводить качественные оценки влияния гидравлических параметров установившегося до попуска движения потока и физико-механических свойств льда на характер последующих волновых процессов. Прогнозирование мест разрушения однородного по физико-механическим свойствам свободно плавающего ледяного покрова возможно с помощью выражения для изгибающего момента, полученного из выражения (35), совместно с условием прочности при изгибе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдрахимов Р.Г. Неустановившееся движение воды в периоды замерзания и вскрытия крупных водотоков: Дис. канд. техн. наук: 05.23.16. Алма-Ата, 1990.
2. Абраменков Н.М. О возможности моделирования процессов замерзания шугоносных рек. М.: Гидрометеиздат. 1984.

3. Белопищевский В.М., Генова С.Н., Костюк В.Ю., Туговиков В.Б. Исследование гидротермического режима реки в бьефах ГЭС методами численного моделирования. //Mathematical modeling and applied mathematics. International IMACS Conference. Abstracts. (Moscow - Vilnius, June 18 – 23, 1990). Moscow. 1990. .
4. Берденников В.П. Условия шугохода в зоне кромки льда при формировании затора. //Труды ГГИ, Л.: Гидрометеиздат. Вып.93. 1962.
5. Готлиб Я.Л., Донченко Р.В., Пехович А.И., Соколов И.Н. Лед в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС. Л.: Гидрометеиздат, 1983.
6. Грушевский М.С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах. Л.: Гидрометеиздат. 1982.
7. Дебольская Е.И., Фидман Б.А., Лятхер В.М., Милитеев А.Н. Математическая модель трансформации волны попуска при наличии ледяного покрова. //Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Л.: Энергоатомиздат. 1984.
8. Дебольская Е.И. Современные представления о динамике русловых подледных потоков. //Гидрофизические процессы в реках, водохранилищах и окраинных морях. М.: Наука. 1989.
9. Дебольская Е.И. Современное состояние исследований динамики подледных потоков. //Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей. V конференция. Труды. Москва, 22 – 26 ноября 1999. М.: ИВП РАН. 1999.
10. Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат. 1987.
11. Исследования неустановившегося движения воды в реке Свири в зимних и летних условиях. Л.: Гидрометеиздат. 1963.
12. Качанов Л.М. К теории прочности ледяного покрова при колебаниях уровня воды. //Труды НИУ. сер.1. Метеорология. Вып.30. 1946.
13. Козлов Д.В. Расчеты ледового режима рек. Ледовый режим зарегулированных рек. //Пособие к СНиП 2.05.03.-84 «Мосты и трубы». М.:ГК «Трансстрой».1992.
14. Козлов Д.В. Лед пресноводных водоемов и водотоков. М.: Изд-во МГУП.2000.
15. Козлов Д.В. Волновые процессы в водоемах и водотоках с ледяным покровом. М.: Изд-во МГУП. 2001.
16. Марченко А.В. Модели дрейфующих льдов и ИГВ. //Дисс. докт. техн. наук. М.: 1997.
17. Отчет о гидрологических работах на р. Волге для Горьковской ГЭС за 1958 г. Часть 2. Исследование зимнего режима р. Волги за 1957 – 1958 гг. Текст и приложения. МЭС СССР, Гидроэнергопроект. М.: Гидропроект. 1958. Т.1..
18. Хейсин Д.Е. Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1967.
19. Хейсин Д.Е. Динамика ледяного покрова. //Механика и физика льда. АН СССР. ИПМ. М.: Наука. 1983.
20. Юрченко Н.Ф. Современные представления о шероховатости нижней поверхности ледяного покрова над турбулентными потоками. М.: МГМИ. 1979.

ФОРМИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ ЗАТОРНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ РЕКИ СУХОНЫ У ГОРОДА ВЕЛИКИЙ УСТЮГ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ДОЛГОСРОЧНОГО И КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ²

*Каинова С.А., кандидат геогр. наук, Фролова Н.Л., инженер
(МГУ имени М.В.Ломоносова)*

В России наводнения занимают одно из первых мест среди стихийных бедствий как по площади распространения, так и по реальному ущербу. В среднем ежегодно затопливаются около 50 тыс км², из них 40% составляют сельскохозяйственные угодья, более 300 городов и десятки тысяч других населенных пунктов [5]. Одной из возможных причин наводнения могут стать весенние заторы льда. Именно поэтому так важно уметь заранее определить высоту максимального заторного уровня и вовремя принять необходимые меры.

Древний русский город Великий Устюг, упоминание о котором относится к XII веку, расположен при слиянии рек Сухоны и Юга. На протяжении всей своей истории город многократно подвергался наводнениям, одной из причин которых является возникновение заторов льда во время весеннего ледохода. В 1517 г. на Сухоне «в Устюге льдом город стерло, берег срыло, дворов множество снесло и людей многих утопило». Катастрофические затопления города во время заторов наблюдались на Сухоне в 1807 и 1817 гг. В целом за XVIII-XIX вв. Великий Устюг пережил восемь катастрофических наводнений. Последнее наводнение, принесшее большой экономический и экологический ущерб, наблюдалось в 1998 г. Затор, возникший во время весеннего ледохода ниже слияния Сухоны и Юга, обусловил повышение уровня в реке, при котором значительная часть городской и прилегающей территории оказалась под водой в течение длительного времени. Экономический ущерб превысил, по неофициальным источникам, 200 млн. руб.

Бассейн р. Сухоны располагается в северо-восточной части Восточно-Европейской равнины, в бассейне Белого моря. В административном отношении бассейн в основном относится к Вологодской области. Территория представляет собой огромную лесистую равнину, почти не защищенную от западных и северо-западных ветров, с которыми связано поступление влажных воздушных масс. Для нее характерно избыточное увлажнение и относительное одностороннее природное условия. На большей части территории низменные равнины чередуются с невысокими плато и возвышенными

²Исследования выполнены в рамках ФЦП «Университеты России» и при финансовой поддержке администрации Вологодской области

ми равнинами, слабо волнистыми или слегка всхолмленными. Средние высоты составляют 150 ... 200 м. Поверхность плато и возвышенных равнин пересечена густой сетью глубоко врезаемых речных долин, хорошо дренированных и только лишь местами заболоченных. В пределах низменностей долины неглубокие, слабо разработанные. Основная масса болот приурочена к низменностям.

Вскрытие многих рек бассейна Северной Двины сопровождается образованием заторов льда в результате задержки ледохода на участках повышенной прочности ледяного покрова, а также в местах, где русловые формы способствуют его устойчивости или препятствуют транзиту ледяных полей. Заторные явления характерны для рек, у которых термическое ослабление льда и волна половодья распространяются вниз по течению. В этих условиях разрушение ледяного покрова начинается при больших значениях влекущей силы потока.

Качественные особенности заторов и их количественные характеристики определяются ходом гидрометеорологического процесса формирования половодья и ослабления ледяного покрова, а также морфологией конкретного участка русла реки. Заторы льда, в свою очередь, оказывают воздействие на процесс вскрытия участка реки, расположенного ниже по течению, накапливая выше скоплений льда большие массы воды и тем самым задерживая распространение волны паводка. В зависимости от гидрометеорологических условий формирование заторов в отдельные годы отличается большой изменчивостью по частоте, местоположению, интенсивности и механизму явления.

Вскрытие реки происходит напряженно, сопровождается серией подвижек льда, заторами. Это вызывает значительное повышение уровня выше зон заторообразования, его понижение — ниже заторных участков. В верховьях реки высший годовой уровень обычно наблюдается в период вскрытия. В г. Великий Устюг при этом затапливается до половины площади застройки города, часть территории судоремонтного завода и ближайшие деревни ниже города по левому берегу Северной Двины. Продолжительность подъема половодья составляет 1 ... 3 недели. Интенсивность подъема уровня воды в начале половодья измеряется сантиметрами в сутки, затем быстро возрастает, достигая 0,5 ... 1,0 м/сут и более. При заторах она достигает 2 ... 4 м/сут. Весенний подъем уровня обычно не превышает 5 ... 6 м. Спад весеннего половодья длится 1,5 ... 2,0 мес и заканчивается обычно к началу июля. Небольшие подъемы уровня в этот период обычно связаны с выпадением дождей.

Имеющиеся ряды наблюдений за ледовыми явлениями, уровнем и стоком воды р. Сухоны охватывают период с 1938 по 2001 гг. (рис. 1). Влияние уровней воды на риск опасных явлений характеризуют табл. 1 и 2. При уровне 700 см над «0» графика поста Великий Устюг в городе начинается подтопление жилых домов. Экономические ущербы быстро возрастают при $H > 800$ см. Такие уровни повторяются 1 раз в 5 ... 7 лет. Уровень около 1000 см имеет обеспеченность 1%. Максимальные заторные уровни за период с 1938 по 2001 гг. изменялись от 422 до 969 см. Анализ многолетней изменчивости уровней показал, что периоды 1945 – 1960 гг., 1979 – 1999 гг. характеризовались повышенными значениями максимальных уровней относительно среднемноголетних значений. Это связано с изменением климатических условий, а в последние годы, возможно, с изменением направленности вертикальных деформаций русла.

Традиционные средства корреляционного и спектрального анализа рядов малопригодны для исследования существенно нестационарных случайных процессов, к которым относятся процессы заторообразования. Возможно, более полезным будет новый математический аппарат, так называемое вейвлетное преобразование временных рядов, который уже нашел ряд применений в гидрометеорологии [3]. Он специально приспособлен для нестационарных процессов. Вейвлетным преобразованием

$$S(b, a) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} T(t)G((t-b)/a)dt$$

временного ряда $T(t)$ называется свертка этого ряда с семейством вейвлетных функций $G((t-b)/a)$, зависящих от параметров сдвига b и масштаба a .

В отличие от традиционного разложения Фурье, представляющего процесс как сумму гармоник разной частоты, вейвлетное преобразование использует короткие «всплески», совершенно одинаковые, но разнесенные по времени, сжатые или растянутые. Каждая из функций семейства существенно отлична от нуля лишь вблизи своего аргумента. Это делает вейвлетное преобразование средством анализа локализованных во времени эпизодов рассматриваемого ряда. Среднее по времени значение любой вейвлетной функции должно быть строго равно нулю, тогда вейвлетное преобразование оказывается нечувствительным к изменениям среднего значения и линейного тренда рассматриваемого ряда. При практическом использовании вейвлетного анализа всегда приходится иметь дело с конечными

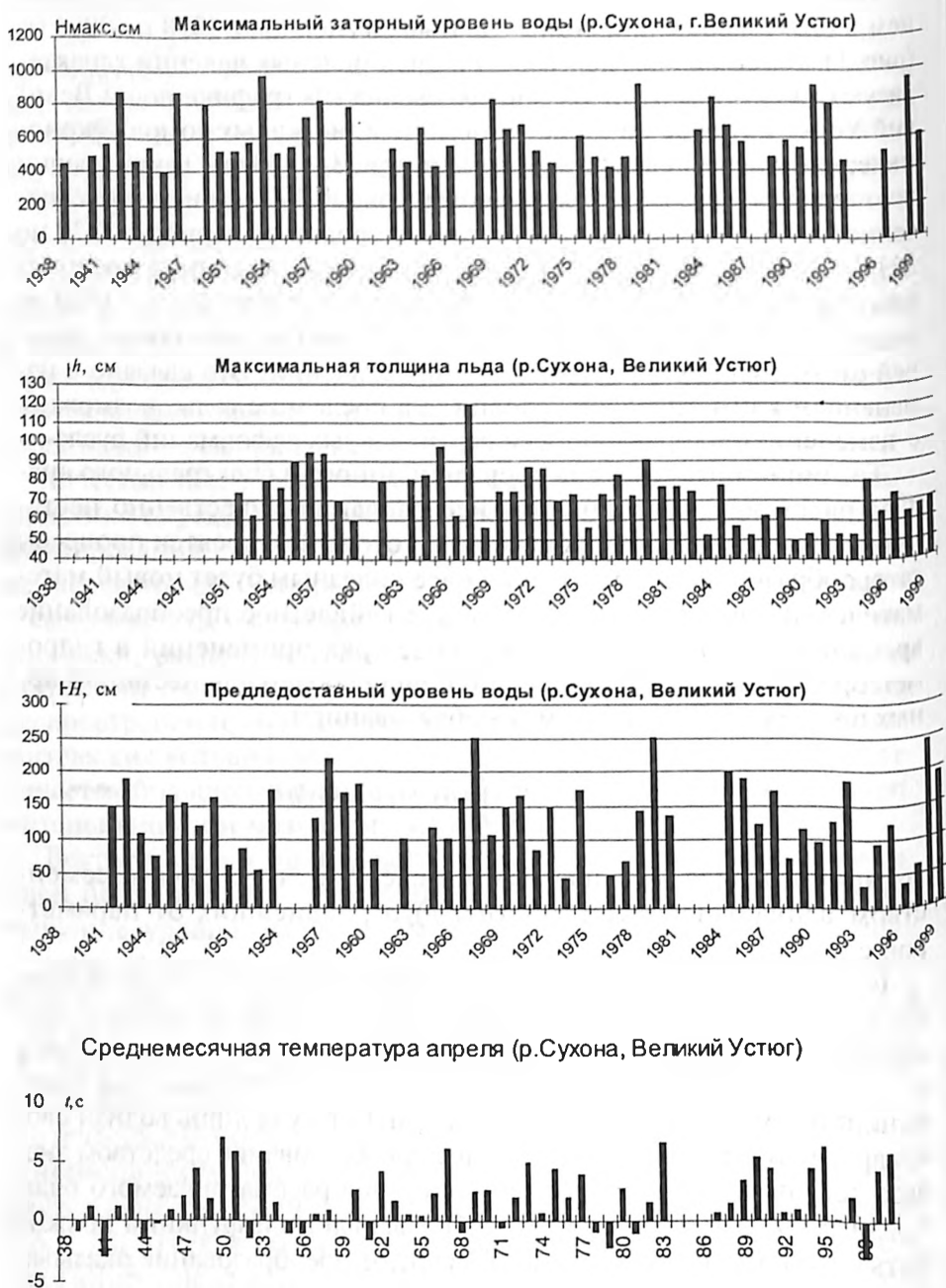


Рис. 1. Изменение максимального заторного уровня воды р.Сухоны у г. Великий Устюг и факторов, его определяющих, за 1938 – 2001 гг.

Таблица 1

Сведения о заторных уровнях на гидрологических постах

Река	Пункт	Период наблюдений, годы	Повторяемость заторов, %	Высшие заторные уровни	
				Дата	Уровень, см
Северная Двина	Медведки	1884-1988, 1998-2000	52	09.05.1914	879
				25.04.1931	781
				17.04.1903	779
Сухона	Каликино	1941-1988, 1998	86	17.04.1953	1014
				19.04.1967	935
				03.05.1998	917
Сухона	Великий Устюг	1882-1988, 1998	72	19.04.1953	969
				05.05.1998	945
				26.04.1936	930
Юг	Гаврино	1883-1970	48	26.04.1955	680
				17.04.1903	640
				19.04.1899	576

Таблица 2

Сведения об опасных уровнях воды на гидрологических постах

Река	Пункт	Максимальные уровни, см		Опасные уровни	
		Наивысший	Средний	Уровень, см	Характеристика
Северная Двина	Медведки	879	576	560	Выход на пойму
				675	Опасные явления
Сухона	Каликино	1014	667	885	Выход на пойму
Сухона	Великий Устюг	969	626	800	Подтопление жилых домов
				880-900	Опасные явления
				940	Выход на пойму
Юг	Гаврино	680	-	400	Выход на пойму правого берега
				510	Выход на пойму левого берега

дискретными временными рядами. В этом случае особенно полезно применение этого преобразования для изучения нестационарных процессов и выявления тенденций изменения переменных. Для дополнительного анализа временной изменчивости максимальных заторных уровней и определяющих его факторов были построены

ны вейвлетные преобразования рядов гидрометеорологических характеристик по данным гидропостов д. Каликино, г. Великий Устюг и метеостанции г. Великий Устюг. Пример вейвлетпреобразования приведен на рис. 2.

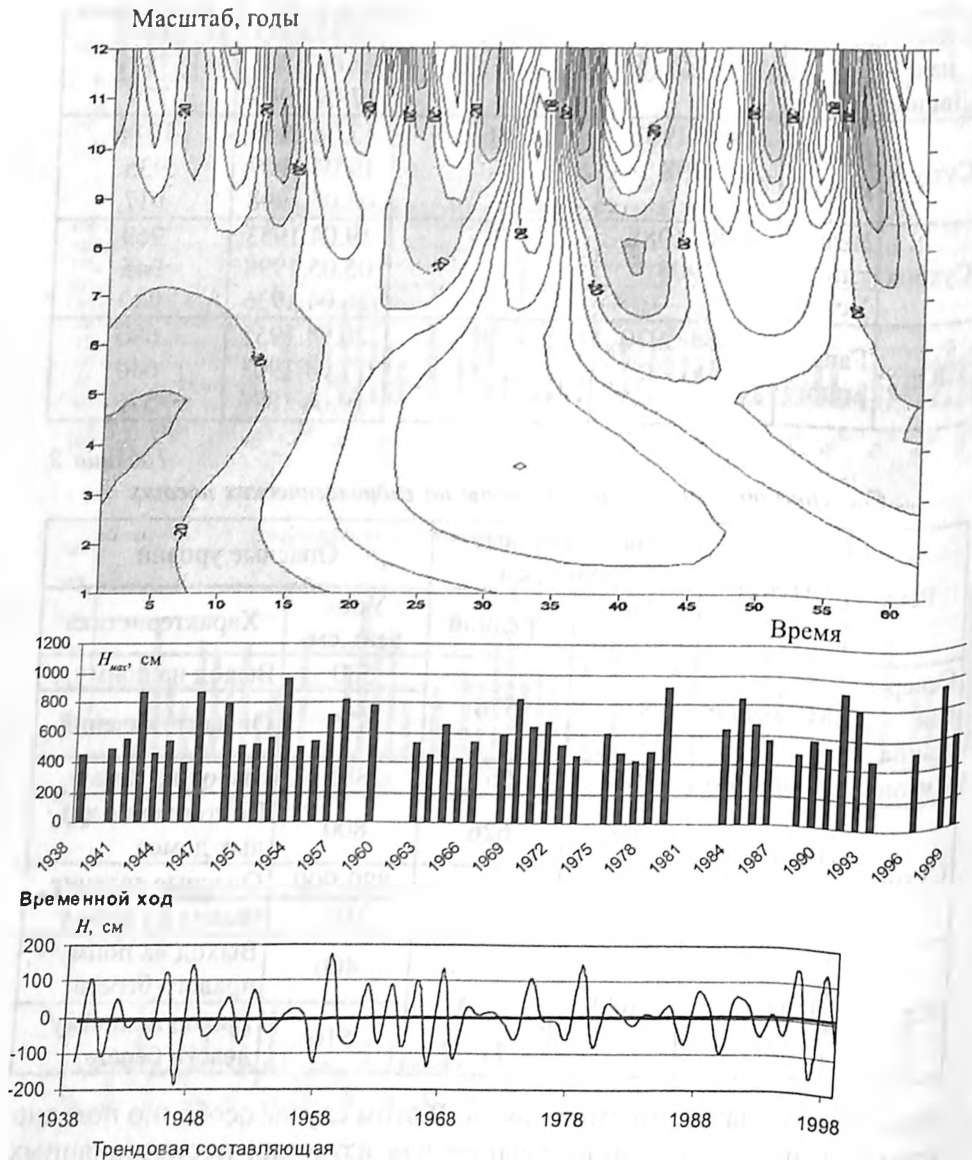


Рис. 2. Многoletняя изменчивость максимальных заторных уровней р.Сухоны, Великий Устюг, вейвлетное преобразование, трендовая составляющая.

Значения вейвлетного преобразования ниже нуля затемнены. Это позволяет выделить разнопериодные циклы. Признаком цикла можно считать чередование областей пониженных и повышенных значений. Для более точного определения периода цикла можно построить ход одного «голоса» — набора значений вейвлетпреобразования при фиксированном масштабе, — что позволит определить вклад цикла определенного периода в общий ход. На рис. 3 построены «голоса» масштаба 12, 11 и 9, что соответствует 4, 6 и 12 годам. Циклы таких периодов характерны практически для всех природных явлений, в том числе для гидрометеорологических процессов.

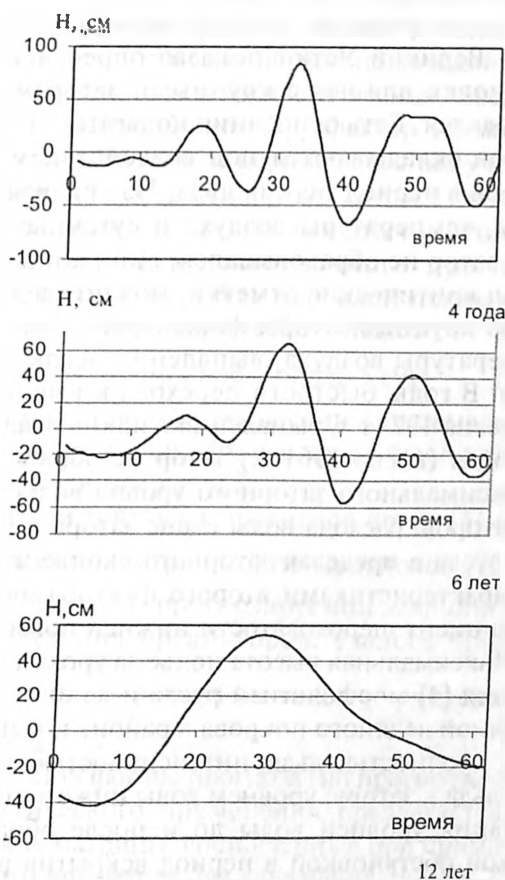


Рис. 3. Разложение ряда максимальных заторных уровней на составляющие с периодами 4, 6 и 12 лет.

Признаком тренда может служить смена положительной области на отрицательную (или наоборот) в нижней части рисунка (т.е. при больших масштабах).

Таким образом, вейвлет-анализ позволяет выделять циклы и тренды, которые могут быть незаметны при визуальном анализе хода переменных. Главным же достоинством вейвлет-анализа является его наглядность и простота применения. Анализ вейвлетного преобразования для временного ряда максимального заторного уровня показал некоторые нарушения однородности в 60-х годах 20 столетия, позволил проанализировать колебания различных масштабов.

В районе г. Великий Устюг имеются все условия для образования ежегодных заторов льда. Тем не менее, в 17% случаях заторов не было. Анализ развития ледовых явлений для постов Тотьмы, Гаврино и Великий Устюг показал определенную схожесть ледовой обстановки для лет с крупными заторами и лет, когда затор не наблюдался. Есть основания полагать, что условия образования заторов складываются под воздействием метеорологических факторов в период таяния льда. Из анализа хода уровней, расходов воды, температуры воздуха и суточных сумм осадков для лет, когда затор не образовывался, либо когда заторный уровень превышал критические отметки, можно сделать следующие выводы. Особо крупные заторы формируются при плавном увеличении температуры воздуха, выпадении осадков на спаде волны половодья. В годы быстрого перехода к высоким температурам воздуха (весна 1974 г.), выпадения жидких осадков на подъеме волны половодья (весна 1961 г.) затор не образовывался.

Высота максимального заторного уровня воды зависит от двух основных факторов: расхода воды выше затора и водопропускной способности русла в пределах заторного скопления льда. Количественными характеристиками второго фактора является толщина льда и коэффициент шероховатости нижней поверхности ледяных скоплений. Максимальная высота подъема уровня воды выше затора определяется [4] морфологией русла и долины реки на участке затора; толщиной ледяного покрова в районе и выше места заторообразования; прочностью льда; интенсивностью ледохода; скоростью подхода льда к затору; уровнем воды ниже затора; интенсивностью нарастания уровней воды до и после образования затора; синоптической обстановкой в период вскрытия рек; расстоянием от места образования затора; мощностью заторов при предшествующих (зимних) вскрытиях; разницей в продолжительности ледостава на данном и нижележащем участках рек.

Для прогноза максимальных заторных уровней в основном используется метод соответственных (по ледовым фазам) уровней (расходов) воды. Ожидаемый уровень прогнозируется в зависимости от расхода воды у кромки ледяного покрова на пути ее перемещения вниз по течению в пределах ледосборного участка [1], [2]. Вклад кромочного расхода в некоторых случаях превышает 60%.

При разработке метода прогноза заторных превышений для г. Великий Устюг было проанализировано влияние большого количества факторов, характеризующих гидрометеорологические условия осени (периода замерзания реки), зимы (периода ледостава) и весны (периода вскрытия). Для эмпирической зависимости были выбраны три параметра, независимых между собой и наиболее скоррелированных с максимальным заторным уровнем: интенсивность роста расхода у Тотьмы за период между первой подвижкой и днем, предшествующим ΔQ (показатель дружности весны), предледоставный уровень воды у г. Великий Устюг $H_{лед}$ (фактор условий ледостава) и максимальная толщина льда за период ледостава у г. Великий Устюг h_n (характеристика суровости зимы). Больше количество предикторов брать не имеет смысла, так как это увеличивает неустойчивость зависимости. Для долгосрочного прогнозирования (заблаговременность 4 ... 5 мес) был взят один показатель $H_{лед}$, для среднесрочного (заблаговременность 2 ... 3 недели) — $(H_{лед} - h_n)$ и для краткосрочного (заблаговременность около 5 сут) — $\sqrt{\Delta Q(H_{лед} - h_n)}$

Уравнение множественной регрессии максимального заторного уровня от определяющих его факторов было получено с коэффициентом корреляции $r = 0,7$.

В качестве оценки точности прогнозов автор [6] рекомендует определять отношение погрешности прогнозов $\sqrt{V_k}$ к среднеквадратичному отклонению прогнозируемой величины σ . Используя различные сочетания предикторов, удалось получить отношение $\sqrt{V_k}/\sigma = 0,76$, т.е. прогноз по такому уравнению является удовлетворительным.

Кроме традиционной формы прогноза (по прогностическим уравнениям) для практического применения предлагается использовать прогностические матрицы, составленные при применении критерия независимости признаков для двух рядов. В табл. 3 приведены частоты попадания заторного уровня в определенный интервал при данном значении обобщенного предиктора $F = \sqrt{\Delta Q(H_{лед} - h_n)}$.

Таблица 3
Вероятность наступления максимальных заторных уровней $H_{\text{зат}}$ в зависимости от сочетания предикторов F

$H_{\text{зат}}, \text{см}$	$\sqrt{\Delta Q(H_{\text{лед}} - h_1)}$		
	0-50	50-100	>100
0	0,32	0,07	0,10
<500	0,36	0,14	0,00
500-700	0,32	0,65	0,40
>700	0,00	0,14	0,50

Интервалы заторного уровня $H_{\text{зат}}$ были выбраны не случайно. При значениях уровня более 700 см начинается затопление города, при уровнях, меньших 500 см, влияние подъема минимально. Таким образом, интервалы соответствуют следующим ситуациям:

- 1) затора нет;
- 2) город не затопляется;
- 3) незначительное затопление пригородных населенных пунктов;
- 4) затопление районов города.

Подобные матрицы были рассчитаны как для среднесрочных, так и для краткосрочных прогнозов. Вероятностная форма образования затора при данных климатических условиях позволит сделать вывод о целесообразности тех или иных мероприятий по защите города от наводнений в каждый конкретный год. Полученные зависимости были использованы для составления долгосрочных и краткосрочных прогнозов заторных уровней р. Сухоны у г. Великий Устюг во время половодья 2002 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бузин В.А. Метод прогноза максимальных уровней воды при заторах льда на средних реках. //Метеорология и гидрология. 2001. № 9.
2. Бузин В.А. Факторы, определяющие максимальный заторный уровень воды. //Тр. ГГИ. 1980. Вып. 270.
3. Даценко Н.М., Новотна Д., Сонечкин Д.М. Анализ изменений климата за 200 лет по наблюдениям температуры воздуха в Клементиуме (г. Прага). //Метеорология и гидрология. 1998. № 4.
4. Попов Е.Г. Заторы льда и проблема борьбы с ними. //Метеорология и гидрология, 1968. №8.
5. Раткович Д.Я., Раткович Л.Д. Типы наводнений и пути сокращения наносимых ими ущербов. //Метеорология и гидрология. 2000. №3.
6. Христофоров А.В. Теория случайных процессов в гидрологии. М.: Изд-во МГУ. 1994.

ПРИЧИНЫ, ХРОНИКА СОБЫТИЙ И ПОСЛЕДСТВИЯ НАВОДНЕНИЯ В НИЗОВЬЕ РЕКИ КУБАНИ ЗИМОЙ 2001 – 2002 гг.¹

Иванов А.А., кандидат геогр. наук (Кубанская устьевая гидрометстанция), Михайлов В.Н., доктор геогр. наук, Магрицкий Д.В., кандидат геогр. наук (МГУ им. М.В. Ломоносова)

Наводнению в низовьях р. Кубани зимой 2001 – 2002 гг. способствовали два метеорологических фактора, которые начали действовать еще за месяц до его наступления: морозы, чередовавшиеся с оттепелями, и обильные осадки, вызванные южными восходящими средиземноморскими циклонами.

Из-за понижения с 5 по 21 декабря температуры воздуха ниже 0°C (рис. 1) на рукаве Кубань с 19 декабря начался ледоход с образованием ледовых заторов (рис. 2): у ст. Варениковской (впоследствии они разрушились сами) и в районе Зайцева Колена (пробивались судном и взрывчаткой). В районе х. Ханьков из-за образовавшегося здесь 24 декабря ледового затора и, как следствие, повышения уровней воды река прорвала валы и затопила большие площади сельхозугодий. Через четыре дня затор был взорван, и река вошла в русло.

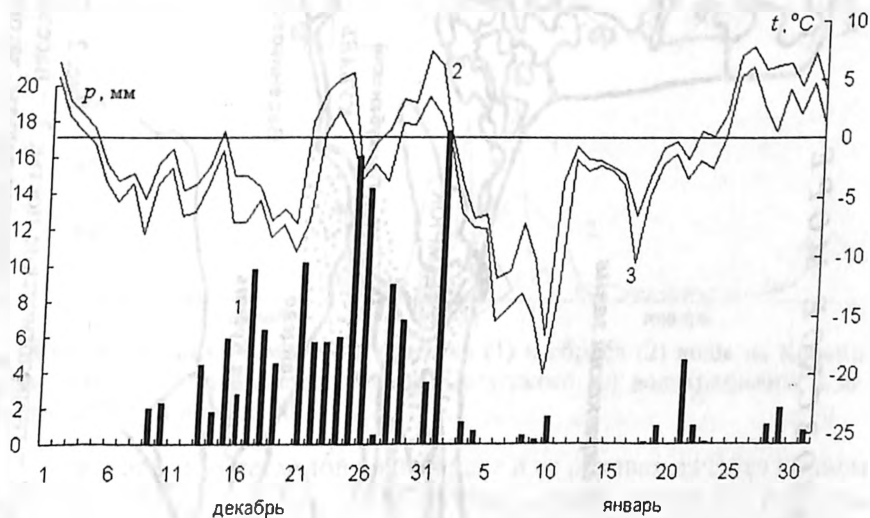


Рис. 1. Комплексный график изменения суточной суммы осадков (1), среднесуточной (2) и минимальной (3) температур воздуха в декабре 2001 г. и январе 2002 г. (метеопост Темрюк).

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 00-05-64179, 01-05-64493, 02-05-64034)

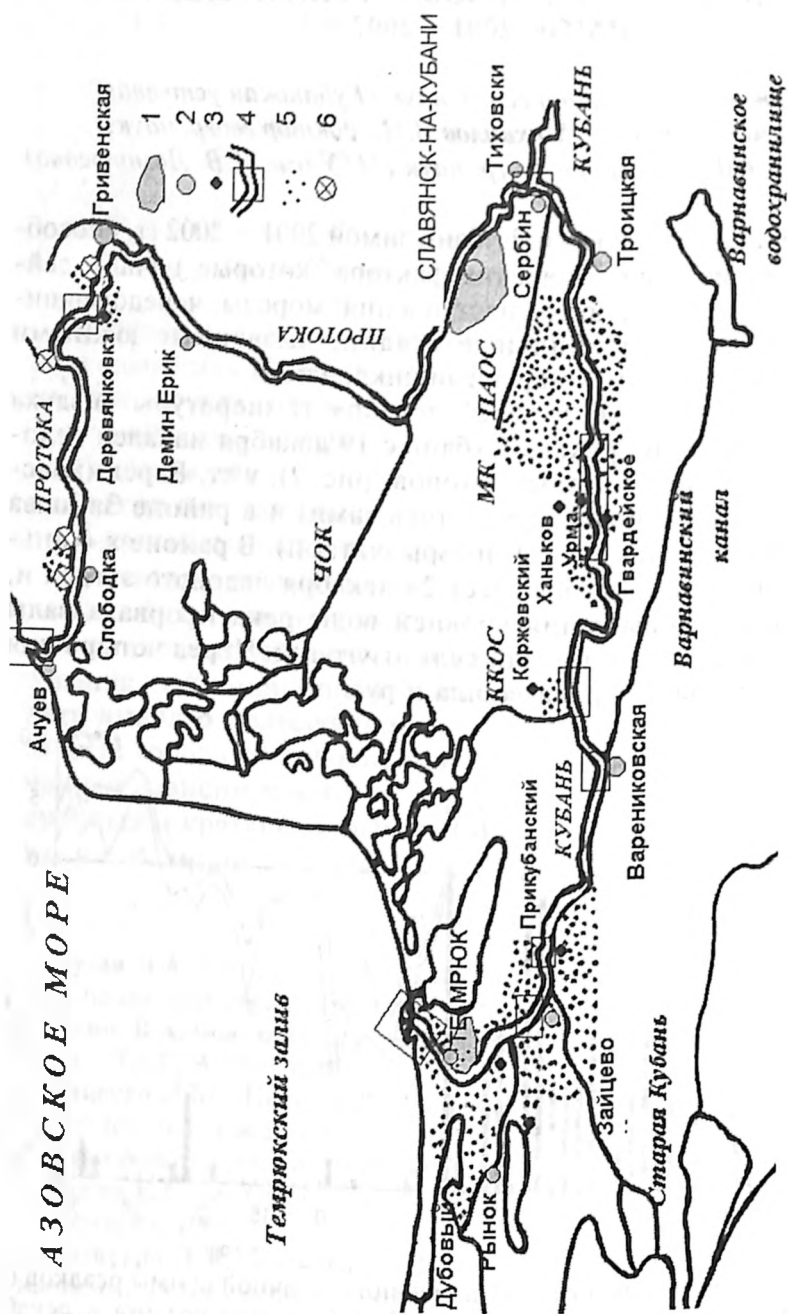


Рис. 2. Схема дельты р. Кубани

1 — города; 2 — гидрологические посты; 3 — населенные пункты, пострадавшие от наводнения 2002 г.; 4 — места образования заторов; 5 — территория дельты, затопленная во время наводнения 2002 г.; 6 — места искусственных прорывов в прирусловых валах.

Одновременно с похолоданием в крае начались обильные снегопады (рис. 1). С 21 декабря количество осадков существенно увеличилось (меньше чем за месяц в крае выпала двухгодовая норма осадков), но уже на фоне интенсивной оттепели. Поэтому в сочетании с таянием снега это привело к опасному наполнению Краснодарского, Шапсугского и Варнавинского водохранилищ, и начался активный сброс воды (рис. 3): 01.01.02 ... 02.01.02 г. суммарный сброс из этих водохранилищ превысил 1000 м³/с.

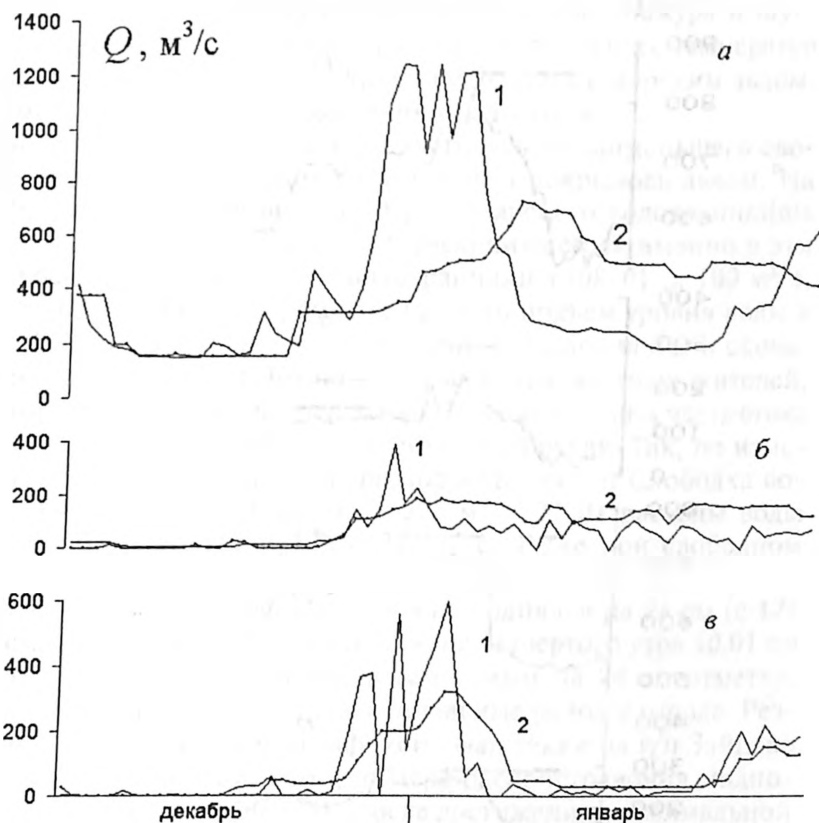


Рис. 3. График изменения притока (1) и сброса (2) воды из Краснодарского (а), Варнавинского (б) и Шапсугского (в) водохранилищ в декабре 2001 г. и январе 2002 г.

С увеличением расходов воды в реке и ее рукавах начался подъем уровней воды (рис. 4). В рукаве Протока ограничением для подъема уровней служил ледостав, а в системе рукава Кубань ему, напротив, способствовали сбросы воды из Варнавинского водохранилища и подпор от ледовых заторов.

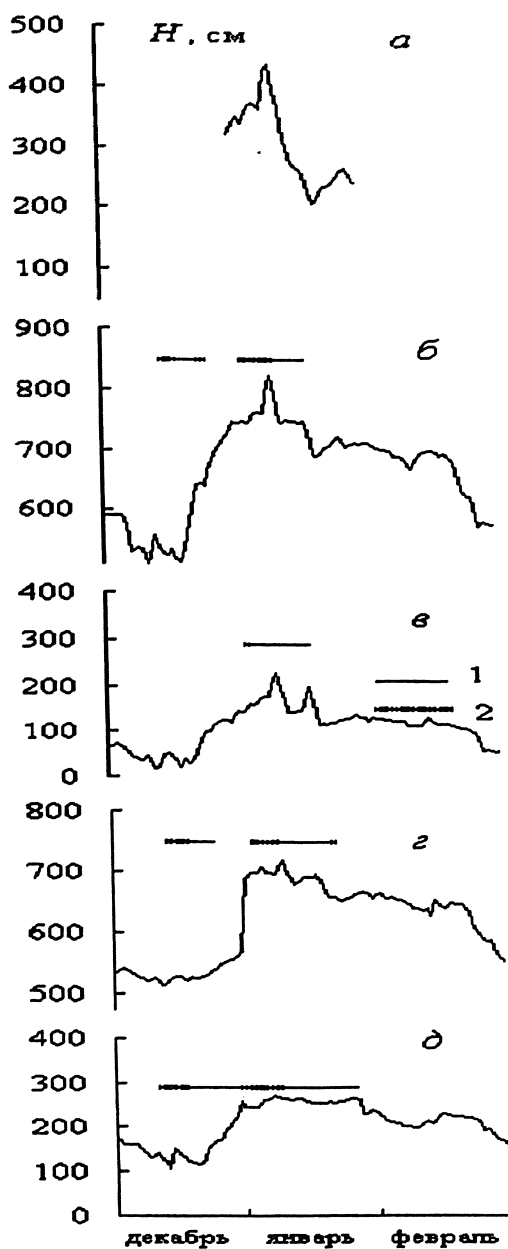


Рис. 4. График колебания уровней воды (над нулем графика поста) с декабря 2001 г. по январь 2002 г.

Посты: а — Тиховский (р.Кубань); б — Зайцево Колено (рук.Кубань); в — Темрюк (рук.Кубань); г — Дубовый Рынок (рук. Казачий Ерик); д — Слободка (рук.Протока). Ледовые явления: 1 — ледостав, ледостав с торами, ледовая перемычка; 2 — забереги и сало, шугоход и ледоход.

Со 2 января опять установилась морозная погода, причем с более низкими значениями температуры воздуха, чем в декабре (рис. 1). В результате река превратилась в мощный поток с полями льда и шуги, заполнившими русло до верха валов. Одновременно на устьевых барах рукавов Кубань и Протока, где глубины всего 0,8 — 1,5 м, началось торошение морского льда, пригнанного северо-западным ветром из Таганрогского залива. Валы торосов достигали 5 м высоты над уровнем воды и 1 ... 2 м в глубину, т.е. практически до дна. Поступающие по реке лед, снежура и шуга скапливались у этой плотины и из-за очень низких температур воздуха (за 02.01 ... 10.01 — $-8,6^{\circ}\text{C}$) смерзались с морским льдом, тем самым запечатывая выход речных вод в море.

9 января температура воздуха опустилась до наименьшего своего значения (-20°C), и море до горизонта покрылось льдом. На фоне больших сбросов воды из Краснодарского водохранилища (06.01 ... 10.01 — 700 — 750 м³/с) и увеличившегося именно в эти дни сброса из Варнавинского водохранилища (08.01 ... 100 м³/с, 09.01 ... 160 — 170 м³/с,) произошел резкий подъем уровня воды в рукаве Кубань. Протока и Казачий Ерик в это время были скованы льдом, а в истоке Протоки, по рассказам местных жителей, кроме того наблюдался ледовый затор. Поэтому большая часть стока воды поступала из р. Кубань в одноименный рукав. Так, по измерениям, проводившимся 18.01, расход воды на г/п Слободка составил 115 м³/с, а у г. Темрюк — 325 м³/с; 22.01 расходы воды соответственно составили 123 и 382 м³/с, а уже при свободном русле (29.01) — 356 и 340 м³/с.

С 08.01 по 09.01 уровень в Темрюке поднялся на 28 см (с 178 до 206 см над нулем поста), а к половине четвертого утра 10.01 он достиг отметки 264 см, превысив тем самым на 74 см отметку, при которой начинает затопливаться отдельные районы города. Резкий подъем уровня воды был зафиксирован также на г/п Зайцево Колено и на следующий день (по мере распространения подпора) — на г/п Тиховский (рис. 4). После достижения максимальной отметки началось снижение уровня воды в рукаве, и к 8.00 он упал на 0,5 м (г/п Темрюк). Однако это понижение явилось следствием не прорыва ледового затора (к 13.01 слой льда, а также скопившейся под ним снежуры, шуги и обломков льда мощностью 1,5 — 2,0 м охватил уже почти весь Петрушин рукав), а выхода воды на отгороженную от русла прирусловыми валами часть поймы (рис. 2). Вода переливалась через ограждающие возвышения (валы, дороги), а также уходила в прораны (прорывы в при-

русловых валах), заливая поля, населенные пункты и промышленные объекты. Уже утром 10. 01 только на правом берегу, в пригородной зоне, было 8 проранов. Еще 8 проранов (до 100 м шириной) образовались на левом берегу в районе Зайцева Колена и Орехова Кута. Не выдержали и валы Казачьего Ерика, хотя здесь повышение уровня было не таким существенным (23 см).

К 13.01 уровень на посту Темрюк снизился до 142 см и оставался приблизительно таким до 16. 01. На посту Зайцево Колено это снижение закончилось еще раньше (12. 01), а в вершине дельты оно продолжалось вплоть до 21. 01. Это понижение явилось результатом мер, принимаемых для борьбы с наводнением (11. 01 саперам удалось разрушить трехкилометровый ледовый затор в устье Петрушина рукава), а также следствием ухода части воды на отгороженную часть поймы и уменьшения сбросов из Краснодарского и Варнавинского водохранилищ (рис. 3).

Однако продолжающая поступать в устье Кубани «ледяная каша» и низкие температуры воздуха по-прежнему создавали условия для нового критического подъема уровней воды. Если 16. 01 уровень на посту Темрюк был 146 см, 17. 01 — 181 см, то 18. 01 к 17.00 он поднялся до 209 см. Началось второе наводнение. Подпор от нового затора, видимо, не распространился выше истока Казачьего Ерика.

В дальнейшем принятые меры позволили освободить русла рукава Кубань и его приморских рукавов, а также приустьевые участки взморья от скоплений льда, шуги и снежуры. 17. 01 был очищен выход Чайкинского гирла, 18.01 ... 19.01 то же было сделано на Среднем и Голинском гирлах. Начался мощнейший ледоход. Замеры 18.01 показали скорость перемещения льдин, какая бывает только на горных реках — 2,4 м/с. С 22.01 Петрушин рукав был чист. Начавшееся после 18.01 падение уровней продолжалось до 20.01, после чего уровень до конца января держался в пределах 120 — 130 см, а затем еще ниже (до 60 см в конце февраля).

В результате зимнего наводнения было затоплено 74 тыс. га, из них 50 тыс. га сельхозугодий. Остановлено более 600 нефтяных и газовых скважин, подтоплен единственный в России завод по производству йода в ст. Троицкой. Примерный ущерб составил 2 млрд. руб.

В связи с угрозой наводнений в районах предполагаемого затопления заранее было введено чрезвычайное положение и созданы штабы по чрезвычайным ситуациям. В их работе преобладали три направления:

1. Комплекс мер по избежанию человеческих жертв и снижению опасности для здоровья людей (эвакуация людей из районов

предполагаемого затопления, их размещение в местах временного поселения и обеспечение теплыми вещами и продуктами питания, оказание необходимой медицинской помощи и выплата денежных компенсаций).

2. Гидротехнические мероприятия защиты объектов (ремонт и подсыпка валов, заделка в них проранов, освобождение речных русл и устьевого взморья Кубани от ледовых заторов, поиск других направлений для стекания вод).

3. Борьба с последствиями наводнения: заделка проранов, откачка воды из затопленных кварталов и домовладений, а также с полей. Всего следовало откачать 38 млн. м³ воды.

Мониторинг гидрометеобстановки в районе бедствия осуществляли работники Кубанской гидрометеостанции (г. Темрюк).

В первую очередь важно было устранить саму причину наводнений. Поскольку сбросы воды из водохранилищ постепенно снижались, необходимо было ликвидировать заторы льда и расчистить от ледовых образований русла рукавов и приустьевые участки взморья. Проводилось это с применением взрывных работ, начавшихся еще в первой декаде января, и плавучих средств с достаточно прочной обшивкой.

Основную проблему составляла ликвидация ледяных валов, перекрывших устья приморских рукавов Кубани. Взрывы решено было производить в местах наибольших глубин и затем уже расчищать проход судами. Со стороны реки эту работу проводили суда с малой осадкой, а со стороны моря — три морских судна. Взрывные работы проводились с использованием соединенных в цепь зарядов, которые укладывались (несколькими параллельными цепями) на морской лед или вбуривались в него, а также на лед вдоль приморских рукавов и на подходах к бару. Проводившиеся до этого бомбометание на Голинском гирле и минометный обстрел из-за низкой точности попадания и неразорвавшихся снарядов были признаны малоэффективными.

Одновременно с пиротехническими работами с 15. 01 лед приустьевого взморья Голинского гирла, а также на Казачьем Ерике и Протоке, был посыпан (специально для этого завезенными) угольной пылью, сажой, шлаком и солью. Этот метод по ускорению таяния льда был опробован и хорошо показал себя еще при наводнении в 1985 г. В результате лед на глубине 5 см стал рыхлым и пористым.

На Протоке взрывные работы начали проводить поздно (первый раз 18. 01., и повторно только через 5 ... 6 дней) и, по мнению сотрудников Кубанской устьевой станции (КУС), неквалифицированно. Поэтому затор не был ликвидирован до конца

паводка. Поскольку основной объем стока воды р. Кубань уходил в одноименный рукав, и подъем уровней в Протоке не вызывал серьезных опасений, это позволяло не торопиться с принятием чрезвычайных мер. Лед в рукаве разрушился без использования специальных мер. Протока очистилась ото льда 28. 01.

Работы по ремонту и подсыпке валов начались еще 24. 12. 01 и продолжались весь январь. Валы наращивались на 1 м и более. Впоследствии это, конечно, снизило разрушительный эффект стихии, но полностью защитить прилегающие территории от затопления не смогло. Свежие рыхлые валы просто не выдерживали напора воды, подмывались и прорывались.

Самые большие прораны образовались в районе Зайцева Колена (рис. 1), где отметки прилегающей территории почти равны отметкам среднего уровня реки, а во время паводка уровень воды в реке на 1,5 ... 2 м выше поймы. Вначале проранов было восемь. Но пять из них были закрыты до 15. 01, а другие три (у хх. Кубанский и Прикубанский и в Ореховом Куту) окончательно были заделаны только 29. 01. До этого они неоднократно забивались, но река их снова прорывала. Ширина проранов была 60 ... 100 м, а скорости течения в них достигали 2 м/с. По словам очевидцев, вся ложбина в районе Зайцева Колена была затоплена двухметровым слоем воды со льдом (рис. 2), а дома снесены по фундамент.

Прораны на Казачьем Ерике образовались ниже х. Дубовый Рынок во время уже второго повышения уровней воды. Вода затопила всю зону от дороги г. Темрюк — пос. Стрелка до Ахтанизовского лимана (рис. 2). Стало затапливать пос. Переволока. Однако 20. 01 ... 21. 01 заторы уже были взорваны, а прораны заделаны.

Прораны и перелив воды через защитные валы наблюдались и в других частях дельты (рис. 2). На Протоке с целью предотвращения неконтролируемого затопления создавались искусственные прораны: в районе рыбопитомника в ст. Гривенской и у пос. Слободка.

Всего в Крымском, Анапском, Славянском и Темрюкском районах Краснодарского края было 15 проранов. После наводнения дамбу вдоль р. Кубань отремонтировали на протяжении 62 км, а на Протоке — 138 км.

Одновременно с ликвидацией заторы льда и подсыпкой валов рассматривались и даже были осуществлены ряд других мер по снижению разрушительной силы наводнения. В основном эти меры сводились к локальному уменьшению расходов воды в системе рукава Кубань, что, в свою очередь, должно было сказаться на высоте подъема уровней воды на отдельных участках русла. Так,

от Чайкинского гирла в сторону морского порта (в Чайкинский затон) был вырыт канал (рис. 1), отводящий часть стока воды из этого рукава. В настоящее время он осложняет деятельность порта Темрюк, поскольку через него идет вынос наносов непосредственно в подводный к порту канал (Глухой канал), и, видимо, в ближайшее время будет засыпан либо перекрыт открывающимся во время подобных наводнений затвором.

Рассматривался вопрос по отведению части стока рукава Кубань по старому руслу реки в сторону Черного моря и по р. Курка в направлении Куликово-Курчанской группы лиманов. Однако из-за их очень малой пропускной способности и ветхости обслуживающих их сооружений это очень перспективное решение не было принято. В то же время часть речной воды все-таки была пущена в некоторые оросительные и опреснительные системы дельты, находившиеся до этого в закрытом состоянии.

Зимнее наводнение 2001 – 2002 гг. привело к некоторым гидролого-экологическим изменениям в устье Кубани. Из-за заторов льда в приустьевой зоне Петрушина рукава и поступающих в него больших объемов воды образовался подпор уровня, который распространился до Переволоцкого разветвления. Это привело к снижению уклонов и скоростей течения потока и вызвало интенсивное осаждение наносов и обмеление этого участка реки (на 0,2 ... 0,5 м).

Наибольшие изменения отмечались в истоке Казачьего Ерика. Здесь вследствие залпового наращивания побочня (чему, вероятно, также способствовал долго сохранявшийся в ерике ледостав) глубины уменьшились с 3,1 до 1,9 м; и в результате сток воды в Казачьем ерике сократился с 4 % до 2 % (стока рукава Кубань). В районе Зайцева Колена, где воды реки транзитом поступали через прораны на пойму, напротив, был отмечен некоторый размыв (до 1 м).

После прорыва заторов принесенные в Петрушин рукав наносы были не только вынесены, но и произошло его углубление.

Таким образом, как показали события зимы 2001 ...2002 гг. и июня ... июля 2002 г., низовья р. Кубани хорошо защищены от стоковых и существенно хуже от заторных наводнений. Поэтому основное внимание краевых властей и соответствующих служб должно быть сосредоточено именно на предотвращении заторных наводнений и уменьшении связанного с ними ущерба.

АКТУАЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ПОДЛЕЖАЩИЕ УЧЕТУ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗАКОНА ЗАЩИТЫ ОТ НАВОДНЕНИЙ*

Авакян А.Б. доктор геогр. наук (Институт водных проблем РАН)

В статье на основании исследования литературы последних лет рассматриваются некоторые положения и высказывается ряд соображений, учет которых может быть полезен при ведущейся в настоящее время разработке Федерального закона защиты от наводнений.

Исследования наводнений, их социально-экономических и экологических последствий, проводимые под руководством автора статьи небольшим коллективом сотрудников ИВП РАН и при участии доктора технических наук А.Е. Асарина (ОАО «Институт Гидропроект»)** , приводят к выводам и рекомендациям, которые, как мы полагаем, полезно учесть при разработке Федерального закона защиты от наводнений. Эти выводы, предложения и рекомендации сводятся к следующему.

1. Наводнения принадлежат к одним из самых разрушительных природных явлений, приводящих к большим человеческим жертвам. На протяжении тысячелетий люди борются с ними, но никак не могут преуспеть в этом мероприятии. Наоборот, ущербы от наводнений, особенно в последние десятилетия, растут с неимоверной быстротой. Площадь паводкоопасных территорий составляет на земном шаре ~ 3 млн. км², что сопоставимо с суммарной площадью всех государств Западной Европы. В районах, подверженных наводнениям, проживает ~ 1 млрд. человек. В России — соответственно 400 тыс. км² и более 20 млн. человек. Ежегодные убытки от наводнений составляют десятки миллиардов долларов. Так, только за июнь-август 1998 г. в Китае от них пострадали 240 млн. человек, а материальный ущерб превысил 20 млрд. долларов. Однако, как это ни парадоксально, до сего времени ни в одном из научных трудов наводнения не рассматривались как явление планетарного масштаба, как глобальная и многоаспектная проблема.

2. Социально-экономические последствия сильных и катастрофических наводнений охватывают обширные районы и заключаются в:

гибели десятков, сотен и тысяч людей; физических увечьях и психических травмах многих пострадавших от наводнений; временном отселении в другие районы до нескольких сотен тысяч

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02-05-64115).

** По грантам РФФИ № 99-05-65477, 01-05-06200, 02-05-64115, 02-05-06390.

человек; проживании значительной части населения в течение нескольких дней, а нередко и месяцев в домах, лишенных водо-, газо-, электроснабжения и телефонной связи. Проживание в этих домах связано с большим риском для здоровья, так как стены, полы и потолки пропитаны влагой;

затоплении, подтоплении и разрушении промышленных предприятий и самых различных объектов инфраструктуры (школ, больниц, магазинов, складов и т.п.), железных и автомобильных дорог (в особенности мостов), линий электропередачи и связи, водопроводов, нефте- и газопроводов и т.д. и т.п. Затопление и разрушение многих из указанных объектов вызывают нарушение условий жизни не только в районах, подверженных наводнениям, но и в регионах страны, связанных многими организационными и экономическими нитями с районами, подвергшимися бедствию;

затоплении и порче сельскохозяйственных угодий, гибели урожая, гибели сельскохозяйственных животных.

Короче говоря, в полном нарушении на большей или меньшей площади, на больший или меньший срок всех условий нормального существования населения и развития хозяйства.

3. К числу актуальных проблем исследования наводнений и их социально-экономических и экологических последствий следует отнести:

унификацию данных, характеризующих наводнения и их социально-экономические и экологические последствия в масштабе всех стран мира;

уточнение методов предсказания сроков наступления наводнений и расчета их параметров (продолжительности, высоты стояния вод);

уточнение единой методики подсчета прямых и разработку косвенных ущербов от наводнений;

районирование паводкоопасных территорий по частоте, силе и продолжительности наводнений;

разработку классификации наводнений в зависимости от их социально-экономических и экологических последствий;

разработку унифицированных правил хозяйственного использования паводкоопасных территорий;

разработку комплексных показателей в географических работах, характеризующих значение наводнений в жизни общества и их всесторонние экологические последствия для речных долин и морских побережий;

расширение и углубление исследований экономических, социальных, экологических и медико-биологических последствий

наводнений (в том числе и их влияние на психическое состояние людей, пострадавших от них);

разработку моделей рациональных видов хозяйственной деятельности, учитывающих экологические, социальные и экономические особенности тех или иных паводкоопасных районов;

исследование влияния изменения климата на наводнения (увеличение осадков, усиление таяния ледников, повышение уровня мирового океана и затопление низменных участков суши).

4. Территории, подверженные затоплению, в особенности длительному, когда вода стоит в течение многих месяцев, относятся к районам с чрезвычайной экологической ситуацией. Здесь создаются условия для развития водных и околоводных организмов, являющихся возбудителями инфекционных заболеваний и природноочаговых инфекций, малярии. Вымывание выгребов, а в наше время и канализационных сооружений, приводит к цепи последующих эпидемиологических осложнений, связанных с кишечными инфекциями. Голод и сопутствующие всему сказанному выше переживания пострадавших нередко уносят больше жизней, чем бедствия в период самого наводнения.

5. Для организации оптимальной противопаводковой защиты необходимы достоверные знания о наводнениях и причиняемом ими ущербе. К сожалению, в настоящее время не только жители нашей планеты, но и специалисты не имеют объективных сведений о глобальных масштабах этого явления. В печати, как правило, освещаются наиболее крупные наводнения, происшедшие в той или иной стране [7]. Однако систематического, всестороннего исследования ущерба, причиненного каждым из таких наводнений, не производится даже и в настоящее время. Данные, которые могли бы использовать и тщательно проанализировать специалисты для выработки рациональных мероприятий по борьбе со стихийным бедствием, не публикуются.

6. Наводнения порождают целый комплекс проблем, отражающих взаимосвязь природы и человеческого общества. Вопросы организации защиты территорий и предотвращения или минимизации ущерба от паводков и половодий интересуют население практически во всех районах мира. Однако до сих пор нет не только общепринятой концепции защиты от наводнений, но и сколько-нибудь достоверного учета вызванных ими последствий [1, 2, 10]. И это несмотря на то, что в последние десятилетия XX в. и в первые два года настоящего столетия катастрофические наводнения и размеры причиняемого ими ущерба резко возросли.

7. Цельной картины, дающей представление о наводнениях в масштабе земного шара за прошлые годы, нет ни в одном литературном источнике. Наиболее полную картину наводнений в глобальном масштабе нам впервые удалось получить благодаря работе, проводимой коллективом Дармутской обсерватории при Гановерском колледже в США. Начиная с 1996 г. и по настоящее время, ее сотрудники собирают данные о наводнениях, используя самые разные источники: официальные правительственные сообщения, данные метеорологических служб, телевизионные и радионовости, газетные и журнальные материалы [12]. Учитывая разнохарактерность материала, полученного по отдельным странам из разных источников и, надо полагать, основанных на различных методиках расчета ущерба от наводнений, а также неполноту приводимых материалов, в настоящее время нет оснований утверждать, что обработанные материалы дают адекватную картину бедствий, вызванных наводнениями в 1998–2001 гг. Но первые шаги в этом направлении, несомненно, сделаны. Очень важно, чтобы мировое сообщество не прекращало и год от года совершенствовало методику сбора данных о наводнениях в разных странах. Нам представляется, что все государства должны уделить внимание этой проблеме. Необходимо под эгидой соответствующих организаций ЮНЕСКО выработать единую согласованную представителями всех стран программу и методику подсчета последствий ущерба от наводнений. Поскольку о числе жертв при стихийных бедствиях сообщают многие средства массовой информации, проявляющие к этому большой интерес, можно полагать о достаточной достоверности цифр, указывающих число погибших в период наводнений, хотя и в этих случаях бывают досадные просчеты. Менее надежны данные о временно эвакуированных из зон затопления и количестве домов и различного рода строений, пострадавших от наводнения. Но приводимый порядок цифр, за некоторым исключением, особых сомнений не вызывает. Данные о площадях затопления имеются менее чем по одной трети наводнений, и к тому же в ряде случаев характеризуют не общую площадь затопления, а площадь сельскохозяйственных и в большинстве случаев лишь пахотных угодий, на которых погиб урожай [4].

К данным об ущербе от наводнений следует относиться с большой осторожностью, так как неизвестна методика подсчета ущерба в разных странах. В большинстве случаев обычно учитывается прямой ущерб, связанный с непосредственным физическим контактом па-

водковых вод с хозяйственными объектами. Размер ущерба обычно определяется затратами на восстановление хозяйства или текущей рыночной стоимостью разрушенных (или нарушенных) хозяйственных объектов. Таким образом оценивается ущерб от нарушения или разрушения хозяйственных и жилых построек, имущества, находящегося в них, а также от разрушения мостов, автомобильных и железных дорог, линий связи и электропередачи, газо- и нефтепроводов [2, 4]. В сельском хозяйстве ущерб, как правило, определяется потерями сельскохозяйственной продукции, затратами на восстановление нарушенного плодородия почв. Сюда также относят затраты на выплаты по страхованию имущества в случае стихийных бедствий, единовременные выплаты денежных и натуральных пособий, а также затраты на организацию спасательных мероприятий, включающих эвакуацию населения и вывоз материально-технических ценностей, строительство временных защитных сооружений и т.п.

Практически, за редким исключением, не определяется и не учитывается косвенный ущерб, который представляет собой потери из-за нарушения хозяйственных связей, спада производства, торговых и банковских операций и т.п. [4]. Также практически не оцениваются последствия ущерба от разрушения нефте- и бензохранилищ, нефте- и газопроводов, навозохранилищ, скотомогильников и т.п. Далеко не полностью учитывается ущерб, причиненный населению, в результате перенесенных заболеваний, психологического стресса и т.п. Косвенный ущерб, общепринятых методик оценки которого до сих пор еще нет, может сказываться в течение многих лет после наводнения. С учетом сказанного мы полагаем, что приводимые цифры ущерба, как правило, занижены, нежели завышены.

Проведенные нами (с Истоминой М.Н.) обработка и анализ данных, собранных сотрудниками обсерватории при Гановерском колледже, дают возможность с достаточной степенью достоверности утверждать о количестве наводнений, имевших место в 1998 - 2001 гг., об их распределении по материкам, месяцам, о продолжительности наводнений. Эти данные приводятся в нашей совместной статье, опубликованной в этом сборнике.

8. О наводнениях в России наиболее полные данные приведены в недавно вышедшей книге А.А. Таратунина [9], который в течение многих лет, сотрудничая с различными организациями, проводил сбор данных о наводнениях и ущербах, причиненных ими. У нас нет сомнений в добросовестности автора при выполнении этой работы. Мы проанализировали и обработали данные, содержащиеся в каталоге, завершающем книгу. Из этого

анализа со всей очевидностью следует, что, как и во многих других странах, оценке ущербов от наводнений не уделялось должного внимания. Процент имеющихся, при этом очень неполных, данных по ущербу от учтенных наводнений колеблется по 15 административным единицам от 6,6 до 62,5%. При этом более чем в половине из них он не превышает 25%. Удивляет, что хуже всего дела обстоят с учетом ущербов от наводнений в бассейне рек Волги и Дона — 6,6% и в Северо-Западном экономическом районе — 7%.

Не намного лучше обстоят дела и в настоящее время. Ознакомившись с материалами по наводнениям, представленными пресс-службой МЧС России в Интернете, хотелось бы высказать следующие соображения. Ежедневные справки о чрезвычайных ситуациях, вызываемых наводнениями, несомненно, полезны для ознакомления руководства МЧС, которое может, как говорится, держать руку на пульсе и, вероятно, способствовать при необходимости оперативному вмешательству в создающиеся ситуации. Но представляется, что следует продумать их большую информативность и стандартизацию [8]. Анализ чрезвычайных ситуаций по наводнениям за год носит очень формальный характер. В нем отсутствуют научные и практические выводы. Учет сделанных замечаний в будущей работе с нашей точки зрения резко повысил бы научное и практическое значение этих материалов. Нам представляется, что материалы по каждому наводнению следует систематизировать, анализировать, делать выводы и публиковать ежегодно сводные отчеты в отдельных книгах.

Обзор наводнений в книге [6] — информативен и представляет существенный интерес для специалистов, занимающихся этой проблемой. Данное мнение сделано на основании знакомства с двумя статьями «Тайфун и наводнение в Приморском крае» (1989 г.) и «Прорыв плотины Киселевского водохранилища» (1993 г.).

9. Из всех стран мира более всего страдает от наводнений Бангладеш. Равнинные территории, затопляемые реками Ганг, Брахмапутра, Мегхна и небольшими реками составляют ~ 80% всей площади страны. Наводнения в Бангладеш стали регулярным явлением. В это время жизнь страны полностью парализуется. Людям приходится спасаться на возвышенностях, на высоких насыпях, на крышах домов и даже на деревьях и оставаться там без еды и питьевой воды до тех пор, пока не придет помощь.

С 1950 по 1988 гг. на территории Бангладеш произошло 25 сильнейших наводнений. В 1970 г. от наводнения погибло 300 тыс. человек. Внимание всего мира приковали к себе наводнения 1987

и 1988 г. По официальной оценке в 1988 г. из общей площади территории страны, равной 144,8 тыс. км², было затоплено более половины — 82 тыс. км². От наводнения пострадало 7,2 млн. домов, погибло 2379 человек, 172 тыс. крупного рогатого скота, 2 млн. т риса. Было затоплено 3000 км магистральных и 10 тыс. км сельских дорог, 898 мостов и подземных трубопроводов, 1300 км железных дорог и 270 железнодорожных мостов. Пострадали 1990 км противопаводковых дамб, 283 км оросительных каналов, 18 электростанций, 2000 км линий электропередачи, более 1000 промышленных предприятий, 1400 больниц, 19 тыс. школ. Материальный ущерб составил около 2 млрд. долл. [12].

Мы специально привели столь подробные данные, чтобы показать, что обычно наиболее часто приводимые цифры о числе погибших и временно отселенных жителей далеко не исчерпывают характер бедствий, причиняемых наводнениями. А ведь оценить ущерб от наводнений и наметить необходимые противопаводковые мероприятия можно только при наличии достоверных и полных данных о масштабах нарушений, которые вызываются наводнениями. Без указанных данных нельзя разработать конкретные мероприятия по предотвращению наводнений и защите от них.

10. Тенденция значительного роста ущербов от наводнений во всех странах мира, включая Россию, вызвана, в первую очередь, усилением хозяйственного развития на паводкоопасных территориях. Из многолетнего опыта всех стран мира следует, что инженерно-технические мероприятия не обеспечивают стопроцентную защиту от наводнений, так как они не могут предотвратить основные причины роста ущербов. Необходима разработка и принятие единой концепции организации противопаводковой защиты, включающей как инженерные, так и неинженерные мероприятия. Причем последние должны быть направлены, главным образом, на стимулирование землепользователей организовать хозяйство в паводковых зонах таким образом, чтобы в случае стихийного бедствия ущерб был бы сведен к минимуму.

Под управлением хозяйственного использования поймы подразумевается в первую очередь ограничение или полное запрещение таких видов хозяйственной деятельности, в результате которых возможно усиление наводнений, а также расширение мероприятий, направленных на создание условий для уменьшения максимального стока. На территориях, подверженных периодическим затоплениям, должно ограничиваться или полностью запрещаться лесосведение, и в то же время делаться максимум возможного для

лесовосстановления. При развитии земледелия должны осуществляться в обязательном порядке определенные агротехнические приемы обработки земли, в частности с обязательным применением зяби, сток с которой (в зависимости от географических условий) меньше, чем со стерни или с залежи в 2 – 3 раза. В районах с сильно развитой эрозией следует осуществлять контурную вспашку или же вообще отказаться от пахотной обработки почвы, переходя на безотвальную. Все это должно осуществляться на основе применения всего доступного комплекса агролесотехнических мероприятий [1]. Кроме того, следует ограничивать все виды хозяйственной деятельности, которым в период наводнений наносится существенный ущерб (например, размещение капиталоемких производств и ценных объектов). По данным прогнозирования наводнений и на основе районирования по степени затопления различной обеспеченности должны выбираться и осуществляться такие виды хозяйственной деятельности, которым при затоплении будет нанесен наименьший ущерб. В принципе, если строительство защитных инженерных сооружений связано с неприемлемыми затратами, а прохождение катастрофического паводка связано с тяжелыми последствиями и большими затратами, возможен вывод территории из хозяйственного использования с превращением ее в национальный парк, заповедную зону и т.п. Для выбора наиболее рациональных видов хозяйственной деятельности следует применять модели, использующие данные об обеспеченности и повторяемости паводков и половодий в различных условиях, данные об эффективности разных защитных мероприятий, а также критерии социально-экономических условий (состав и количество населения, структура занятости и т.д.).

Прогнозируемое возможное потепление климата и неизбежный дальнейший рост хозяйственного освоения речных долин, несомненно, приведут к увеличению повторяемости и разрушительной силы наводнений. Поэтому неотложной задачей правительств всех стран мира, различных органов местной власти является разработка действенных мер предотвращения и защиты от наводнений. Следует не забывать, что предотвращение стихийных бедствий позволит во много раз, а по некоторым оптимистическим расчетам в 50 – 70 раз, уменьшить затраты на ликвидацию последствий наводнений. Представляется, что реализация предлагаемой нами концепции может сыграть значительную роль в уменьшении бедствий и ущербов, вызываемых наводнениями. В этом плане несомненно важную роль играет выполнение каждого пункта предлагаемой концеп-

ции, но существенный эффект может быть достигнут только при полной реализации всех предлагаемых мер и действий [1]:

а) при хозяйственном освоении паводкоопасных территорий как в долинах рек, так и на морских побережьях, страдающих от нагонных наводнений и цунами, следует проводить детальные технико-экологические исследования. Их цель — выявление путей получения максимально возможного экономического эффекта от освоения этих территорий и вместе с тем сведение к минимуму возможного ущерба от наводнений. Выявление оптимального решения этой сложнейшей задачи и его практическое осуществление — надежный фундамент, на котором базируются все остальные перечисляемые ниже положения концепции;

б) при разработке противопаводковых мероприятий в долинах рек следует рассматривать весь водосбор, а не его отдельные участки, поскольку локальные противопаводковые мероприятия, не учитывающие всю ситуацию прохождения паводка в долине реки, могут не только не дать экономического эффекта, но и существенно ухудшить ситуацию в целом и привести в результате к еще большому ущербу от наводнения.

Характерным примером в этом отношении могут служить последствия предпринятых во второй половине XIX в. мер по защите от наводнений территорий в среднем и нижнем течении р. Тисы в Венгрии. Для увеличения пропускной способности в период прохождения паводков русло реки в особенно извилистых местах было спрямлено и углублено, длина его в результате сократилась на 480 км. Участки, не охваченные русловыправительными работами, были обвалованы. Во время паводка в 1879 г. углубленные и спрямленные участки р. Тисы пропустили гораздо больший объем вод, нежели в естественных условиях. Однако в неуглубленных и неспрямленных участках, где пропускная способность русла осталась прежней, уровень воды резко повысился. В результате нагрузка на дамбы обвалования превысила проектную, и они были прорваны во многих местах. Это привело к затоплению огромной территории. Особенно сильно пострадал г. Сегед, практически полностью разрушенный наводнением [3];

в) необходимо умело сочетать инженерные методы защиты (регулирование стока водохранилищами, строительство дамб обвалования приречных территорий, спрямление и углубление речного русла в целях ускорения стока паводковых вод, строительство каналов для отвода вод в естественные понижения рельефа, подсыпка территорий и др.) с неинженерными. К последним отно-

сится разработка экономических и юридических норм с учетом особенностей использования паводкоопасных территорий. К ним, в первую очередь, принадлежат: ограничение или полное запрещение таких видов хозяйственной деятельности, в результате которых возможно усиление наводнений (лесосведение и др.), а также расширение мероприятий, направленных на создание условий, ведущих к уменьшению стока (применение зяби, переход на безотвальную обработку почвы и др.). Кроме того, должны выбираться и осуществляться такие виды хозяйственной деятельности, которым при затоплении будет нанесен наименьший ущерб;

г) инженерные сооружения по защите земель и хозяйственных объектов должны быть надежны, и вместе с тем их осуществление должно быть связано с минимальными нарушениями природной среды. Так, в комплексе мер проекта «Дельта» в Нидерландах грандиозные работы проводились при перекрытии дельты Восточной Шельды — ее ширина 9 км и глубина 40 м. По первоначальному проекту намечалось строительство глубокой дамбы. Однако это встретило сильнейшую оппозицию со стороны природоохранной общественности и представителей рыбного хозяйства, поскольку при этом нарушался водообмен между заливом и морем и тем самым экологическое равновесие в заливе, что имело бы крайне отрицательные последствия как для природы, так и для хозяйства. В результате в 1976 г. после дополнительных исследований данная часть проекта была пересмотрена и переделана. Технические усложнения проекта привели к удорожанию работ почти в 3 раза, но зато был обеспечен беспрепятственный водообмен между морем и заливом при его надежной защите от нагонов;

д) должно быть осуществлено четкое районирование и картирование пойм с нанесением границ паводков различной обеспеченности. С учетом вида хозяйственного использования территории рекомендуется выделить зоны с 20% обеспеченностью паводка (для сельскохозяйственных угодий), 5% обеспеченностью (для строений в сельской местности), 1% обеспеченностью для городских территорий и 0,3% обеспеченностью для железных дорог. Само собой разумеется, что в разных природных зонах и экологических районах число зон и принципы их выделения могут в какой-то степени измениться. Однако практически везде участки поймы, затопляемые чаще, чем один раз в 5 лет, могут использоваться только для косыбы сена.

Разработка и издание карт паводкоопасных территорий, помимо их прямого назначения, окажут существенную помощь эксп-

ресс-оценкам ущербов от каждого прошедшего наводнения, в том числе и оценкам затопления земель, которые в настоящее время отсутствуют по большей части наводнений;

е) в стране должна существовать четко работающая система по прогнозированию паводков и по извещению населения о времени наступления наводнения, о максимально возможных отметках его уровня и продолжительности в сутках. Прогнозирование паводков и половодий должно осуществляться на основе развития широкой службы наблюдений за гидрометеорологической обстановкой (с большим сожалением следует заметить, что за последние годы произошло значительное сокращение наблюдательных постов гидрометеослужбы). Необходимо непрерывно осуществлять обеспечение гидрометеослужбы современным оборудованием — автоматизированными системами сбора и обработки информации, использовать радарные установки и искусственные спутники;

ж) особое значение следует уделять заблаговременному информированию населения о возможности наводнения, разъяснению о вероятных его последствиях и мерах, которые следует предпринимать в случае затопления строений и сооружений. С этой целью следует широко использовать телевидение, радио и другие средства информации. В паводкоопасных районах должна быть широко развернута пропаганда знаний о наводнениях. Все государственные структуры, а также каждый житель должны ясно представлять, что им надлежит делать до, в период и после наводнения;

з) весьма важна разработка и дальнейшее совершенствование методик расчета как прямых, так и косвенных ущербов от наводнений.

Объективное определение ущерба от наводнений имеет важнейшее значение для правильного выбора стратегии и тактики борьбы с этим стихийным бедствием. Точная оценка фактических и возможных потерь как в период, так и после наводнения (из-за нарушения транспортных связей, снижения урожайности полей, увеличения расходов по линии здравоохранения и т.п.) позволяет выбрать оптимальный вариант мероприятий как по предотвращению, так и ликвидации нарушений и ущербов, вызываемых наводнениями. Определение ущербов очень важно, в частности, для оценки экологической целесообразности и эффективности систем инженерной защиты, а также страхования населения и юридических лиц;

и) регулирование использования паводкоопасных территорий должно быть прерогативой республик, краев, областей, районов и городов. Государство может направлять и стимулировать их деятельность лишь принятием тех или иных законов о регулировании землепользования;

к) в систему мероприятий по защите от наводнений должны быть включены как государственные и общественные организации, так и частные лица. Успешная работа такой системы должна координироваться и направляться центральным органом на федеральном уровне;

л) важным инструментом по регулированию землепользования на паводкоопасных территориях может быть гибкая программа по страхованию от наводнений, сочетающая как обязательное, так и добровольное страхование. Основным принцип этой программы должен базироваться на том, что в случае принятия рационального с позиций противопаводковой защиты вида использования территории страхователю выплачивается существенно большая страховая сумма, чем в случае игнорирования соответствующих рекомендаций и норм. Программа страхования должна состоять из двух разделов: обязательного и добровольного страхования. Это вытекает из самого феномена наводнений и связанных с ними последствий. Ущерб, причиняемый наводнениями, следует четко подразделить на три категории:

ущерб, затрагивающий интересы общества и государства, нередко далеко выходящий по своему значению за пределы района, непосредственно затронутого затоплением. Это ущерб, вызываемый затоплением железных и шоссейных дорог, линий электропередачи и связи, трубопроводов, а также промышленных предприятий, технологически тесно связанных со многими предприятиями страны. Нарушение их работы вносит дезорганизацию в нормальное функционирование хозяйственных объектов во многих регионах, непосредственно не затрагиваемых наводнениями. Естественно, что экономическая необходимость незамедлительного восстановления подобных объектов требует больших средств и обязательного страхования;

ущерб жилому фонду и предприятиям, обеспечивающим жизнедеятельность населения в районах затопления. Поскольку государство не может допустить, чтобы его граждане оставались без крыши над головой, без снабжения хлебом и другими продуктами первой необходимости, оно вынуждено иметь средства на восстановление указанных объектов, поэтому страхование и в этом случае должно быть обязательным;

к третьей категории мы относим ущерб, причиненный личному имуществу физических лиц (мебель, одежда и т.п.), их подсобным постройкам (склады, сараи, хлева, бани и т.п.) и находящемуся в них имуществу. Страхование в этом случае может быть добровольным.

Осуществление указанной программы страхования будет стимулировать скорейшее издание карт паводкоопасных зон с выделени-

ем границ затопления паводками различной обеспеченности. Оно будет способствовать осуществлению регулирования хозяйственно-го развития в пределах каждой зоны повышенной опасности, а также проведению ряда мероприятий, таких как подготовка передвижных домиков, создание резервной системы водоснабжения и канализации, резервов стройматериалов, спасательной техники, горючего и провианта, подготовке общественных групп (бригад) экстренной помощи в период наводнения и т.п.

11. Комплекс мероприятий в паводкоопасных районах, включающий прогнозирование, планирование и осуществление работ, должен проводиться до наступления наводнения, в период его прохождения и после окончания стихийного бедствия.

Современное состояние прогнозирования и расчета наводнений, организации хозяйственного использования паводкоопасных территорий, оценки последствий наводнений для экономики, социальных и экологических условий со всей очевидностью свидетельствует о необходимости в первую очередь достоверного учета ущерба, наносимого наводнениями, и разработки действенных мер борьбы с ними.

12. Проблема наводнений по своей сути глобальна и комплексна. Разработчики Федерального закона защиты от наводнений должны будут рассмотреть и затронуть в законе следующие вопросы:

- значение наводнений в жизни общества;
- природные и антропогенные причины наводнений;
- экономические, социальные и медико-биологические последствия наводнений;
- оценка ущербов от наводнений и причины их роста с каждым столетием и десятилетием;
- классификация наводнений по их экономическим, социальным и экологическим последствиям;
- особенности организации хозяйства на паводкоопасных территориях;
- инженерные мероприятия защиты от наводнений;
- методы прогноза и расчета наводнений;
- методы оценки прямого и косвенного ущербов от наводнений;
- исследование влияния наводнений на психическое состояние людей, пострадавших от них;
- исследование влияния наводнений на морфологию долин, почвенный и растительный покров, животный мир;
- исследование проблем, возникающих в долинах рек, огражденных дамбами, в особенности там, где дно этих рек превышает отметки окружающей местности;

исследование влияния изменения климата на наводнения;
разработка концепций защиты от наводнений различного генезиса.

Естественно, что эти темы могут быть существенно детализированы. Представляется правильным внести приведенные здесь и в ряде других работ предложения по улучшению обеспечения безопасности населения от стихийных бедствий и снижению ущерба от разрушений гидротехнических сооружений на обсуждение научной общественности и с их учетом принимать решения об изменении законодательства в этой сфере [5].

Выводы

1. Наводнения сопутствуют человеческому обществу с древнейших времен и до наших дней. В силу разных причин наводнения происходят в бассейнах всех рек земного шара, а также на значительных участках побережий океанов и морей (нагонные наводнения, цунами).
2. По числу жертв и ущербу, причиненному обществу, наводнения занимают первое место среди стихийных бедствий, вместе с тем, как это ни парадоксально, до сего времени нет надежных долгосрочных прогнозов их появления, достоверных и общепринятых методик подсчета причиняемых ими ущербов и общепринятой концепции защиты.
3. За последнее время, особенно во второй половине XX в., увеличиваются число наводнений антропогенного характера и размеры причиняемых ими ущербов.
4. За исторический период четко прослеживается рост интенсивности и разрушительной силы наводнений природного характера.
5. В перспективе, в силу ряда природных и антропогенных причин, ущерб, причиняемые наводнениями, будут расти, поэтому насущно необходимо усиление научно-исследовательских, организационных и практических работ, направленных на уменьшение ущербов от наводнений.
6. Предлагаемая нами концепция защиты от наводнений может служить основой для дальнейших детальных разработок в этом направлении.
7. Особое и безотлагательное внимание ученых, проектировщиков и государственных деятелей должно быть уделено тем районам, где дно рек, огражденных дамбами, выше окружающей местности, поскольку без малейшего преувеличения можно говорить, что население этих районов живет, как на вулкане.
8. Учитывая глобальный масштаб проблемы, ее исследованию и практическому решению должно быть уделено самое серьезное внимание соответствующими правительственными органами всех стран и международными организациями.

9. В Федеральном законе должны быть четко сформулированы действия в паводкоопасных районах, которые должны выполняться федеральными органами, органами субъектов федерации, муниципальными управлениями и гражданами, проживающими в таких районах постоянно или временно (в периоды отпусков, командировок и т.п.).

10. В законе следует четко указать на права, ответственность и действия субъектов федерации и населения на каждом этапе жизни в паводкоопасном районе до наводнения, в период его прохождения и после завершения стихийного бедствия.

11. Помимо общих рекомендаций должны быть сформулированы и обоснованы положения, учитывающие генезис того или иного наводнения. Естественно, что на всех стадиях развития наводнения в паводкоопасных районах есть определенная специфика самих наводнений и вызываемых ими социально-экономических, экологических, медико-биологических и других последствий и характера поведения местных органов власти.

12. Виды на жительство, строительство домов и инфраструктуры имеют свою специфику в районах, где наводнения вызываются весенними половодьями; затяжными дождями и ливнями; ледовыми заторами и зажорами; нагонными наводнениями морских и океанических вод; цунами; прорывами озер, образованных завалами и языками ледников; прорывом и разрушением плотин и ограждающих дамб. Это тоже с нашей точки зрения должно быть отражено в Федеральном законе.

13. Как видно из изложенного, разработка федерального закона чрезвычайно сложная и трудоемкая задача. К его разработке должны быть привлечены специалисты самого различного профиля: юристы, гидрологи, метеорологи, географы, экономисты, гидротехники, медики и многие, многие другие. Нам представляется, что некоторые сведения и соображения, указанные в данной статье, могут оказаться полезными тем, кому будет поручена эта ответственная работа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян А.Б. Наводнения. Концепция защиты //Известия РАН. Сер. географическая. 2000. № 5.
2. Авакян А.Б., Истомина М.Н. Наводнения в мире в последние годы XX //Водные ресурсы. 2000. Т. 27. № 5.
3. Авакян А.Б., Полюшкин А.А. Влияние наводнений на жизнь общества и защиты от них // Известия АН СССР. Сер. географическая. 1989. № 2.
4. Авакян А.Б., Полюшкин А.А. Наводнения. Проблемы определения ущербов и защиты //Водные ресурсы. 1991. № 4.

5. Асариш А.Е. Наводнения — природные и рукотворные — недавний опыт и давние мысли //Использование и охрана природных ресурсов в России. 2002. № 7.
6. Катастрофы конца XX в. Под ред. В.А. Виноградова. М.: УРСС. 1998.
7. Нежиновский Р.А. Наводнения на реках и озерах. Л.: Гидрометеониздат. 1988.
8. Сообщения пресс-службы МЧС России. <http://www.emercom.gov.ru>.
9. Таратуниш А.А. Наводнения на территории Российской Федерации. Екатеринбург: РосНИИВХ. 2000.
10. Уайт Гильберт. География, ресурсы и окружающая среда. М.: «Прогресс». 1990.
11. Bednarouk S., Ovcharov E. Flood Prevention and Protection in Russian. United Nation. Seminar on Flood Prevention and Protection. Berlin, 7–8 oct. 1999. № 37.
12. Brammer H. Floods in Bangladesh, I — Geographical Background to the 1987 and 1988 Floods //Geographical Journal. GEOAREA: Southeast Asia, Bangladesh. 1990. Vol. 156. Part 1.
13. Global Register of Large River Flood Events. <http://www.dartmouth.edu/artsci/geog/floods/>

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО НАВОДНЕНИЯ НА ЭЛЕМЕНТЫ ЗАСТРОЙКИ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

*Низметов Г.М. кандидат техн. наук, Бабусенко М.С, инженер
(ФЦ ВНИИ ГОЧС)*

Летом 2002 г., в результате интенсивного выпадения осадков за короткий период времени, в Германии произошло сильное наводнение — случай для западной Европы редкий, но не уникальный. В ряде рек существенно поднялся уровень воды. В частности на р. Эльбе в районе городов Магдебург и Виттенберг уровень воды превысил обычную отметку почти на пять с половиной метров (рис. 1). Затопление характеризовалось достаточно плавным поднятием уровня, без резких гидравлических ударов и образования волны прорыва.

Рельеф местности, подвергшейся наводнению (низменная равнина), предрасполагает к периодическому подтоплению населенных пунктов, расположенных на низких террасах рек.

Грунты — преимущественно озерно-речного происхождения неоднородно слоистого строения с чередованием глинистых и песчаных грунтов. В большинстве случаев, непосредственно под фундаментами зданий и сооружений, залегают мелкие глинистые пески, которые при замачивании теряют свою несущую способность примерно на 30%. Такие грунты подвержены вымыванию при подтоп-

9. В Федеральном законе должны быть четко сформулированы действия в паводкоопасных районах, которые должны выполняться федеральными органами, органами субъектов федерации, муниципальными управлениями и гражданами, проживающими в таких районах постоянно или временно (в периоды отпусков, командировок и т.п.).

10. В законе следует четко указать на права, ответственность и действия субъектов федерации и населения на каждом этапе жизни в паводкоопасном районе до наводнения, в период его прохождения и после завершения стихийного бедствия.

11. Помимо общих рекомендаций должны быть сформулированы и обоснованы положения, учитывающие генезис того или иного наводнения. Естественно, что на всех стадиях развития наводнения в паводкоопасных районах есть определенная специфика самих наводнений и вызываемых ими социально-экономических, экологических, медико-биологических и других последствий и характера поведения местных органов власти.

12. Виды на жительство, строительство домов и инфраструктуры имеют свою специфику в районах, где наводнения вызываются весенними половодьями; затяжными дождями и ливнями; ледовыми заторами и зажорами; нагонными наводнениями морских и океанических вод; цунами; прорывами озер, образованных завалами и языками ледников; прорывом и разрушением плотин и ограждающих дамб. Это тоже с нашей точки зрения должно быть отражено в Федеральном законе.

13. Как видно из изложенного, разработка федерального закона чрезвычайно сложная и трудоемкая задача. К его разработке должны быть привлечены специалисты самого различного профиля: юристы, гидрологи, метеорологи, географы, экономисты, гидротехники, медики и многие, многие другие. Нам представляется, что некоторые сведения и соображения, высказанные в данной статье, могут оказаться полезными тем, кому будет поручена эта ответственная работа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян А.Б. Наводнения. Концепция защиты // Известия РАН. Сер. географическая. 2000. № 5.
2. Авакян А.Б., Истомина М.Н. Наводнения в мире в последние годы XX // Водные ресурсы. 2000. Т. 27. № 5.
3. Авакян А.Б., Полюшкин А.А. Влияние наводнений на жизнь общества и защиты от них // Известия АН СССР. Сер. географическая. 1989. № 2.
4. Авакян А.Б., Полюшкин А.А. Наводнения. Проблемы определения ущерба и защиты // Водные ресурсы. 1991. № 4.

5. Асарин А.Е. Наводнения — природные и рукотворные — недавний опыт и давние мысли //Использование и охрана природных ресурсов в России. 2002. № 7.
6. Катастрофы конца XX в. Под ред. В.А. Виноградова. М.: УРСС. 1998.
7. Нежиновский Р.А. Наводнения на реках и озерах. Л.: Гидрометеонздат. 1988.
8. Сообщения пресс-службы МЧС России. <http://www.emercom.gov.ru>.
9. Таратунин А.А. Наводнения на территории Российской Федерации. Екатеринбург: РосНИИВХ. 2000.
10. Уайт Гильберт. География, ресурсы и окружающая среда. М.: «Прогресс». 1990.
11. Bednarouk S., Ovcharov E. Flood Prevention and Protection in Russian. United Nation. Seminar on Flood Prevention and Protection. Berlin, 7–8 oct. 1999. № 37.
12. Brammer H. Floods in Bangladesh, I — Geographical Background to the 1987 and 1988 Floods //Geographical Journal. GEOAREA: Southeast Asia, Bangladesh. 1990. Vol. 156. Part 1.
13. Global Register of Large River Flood Events. <http://www.dartmouth.edu/artsci/geog/floods/>

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО НАВОДНЕНИЯ НА ЭЛЕМЕНТЫ ЗАСТРОЙКИ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

*Нигметов Г.М. кандидат техн. наук, Бабусенко М.С, инженер
(ФЦ ВНИИ ГОЧС)*

Летом 2002 г., в результате интенсивного выпадения осадков за короткий период времени, в Германии произошло сильное наводнение — случай для западной Европы редкий, но не уникальный. В ряде рек существенно поднялся уровень воды. В частности на р. Эльбе в районе городов Магдебург и Виттенберг уровень воды превысил обычную отметку почти на пять с половиной метров (рис. 1). Затопление характеризовалось достаточно плавным поднятием уровня, без резких гидравлических ударов и образования волны прорыва.

Рельеф местности, подвергшейся наводнению (низменная равнина), предрасполагает к периодическому подтоплению населенных пунктов, расположенных на низких террасах рек.

Грунты — преимущественно озерно-речного происхождения неоднородно слоистого строения с чередованием глинистых и песчаных грунтов. В большинстве случаев, непосредственно под фундаментами зданий и сооружений, залегают мелкие глинистые пески, которые при замачивании теряют свою несущую способность примерно на 30%. Такие грунты подвержены вымыванию при подтоп-

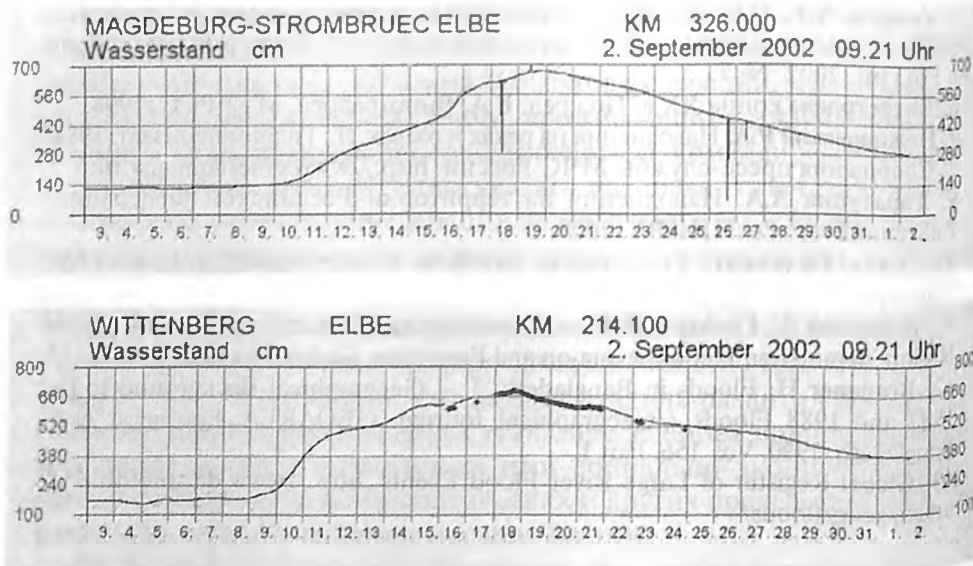


Рис. 1. Уровни подъема воды в районе городов Магдебург и Виттенберг

лении фундаментов мелкого заложения. Наиболее неблагоприятными явились территории, сложенные с поверхности иловатыми глинами, мелкими песками, предрасположенными к вымыванию. Участки с такими грунтами имеются в районе населенных пунктов Зеегрена, Преттин где провалы и оседания почв могут продолжаться.

Из-за равнинного рельефа затопляемой территории, фундаменты, цокольные части и нижние этажи многих зданий и сооружений подверглись длительному замачиванию. Как видно из графиков на рис. 1, время затопления составило срок до трех и более недель.

В большинстве сельских населенных пунктов жилые дома и хозяйственные постройки возведены в конце 19 — начале 20 веков. Значительная часть малых городов застроена приблизительно в этот же период. Очевидно, время строительства определяло применение тех или иных строительных материалов и технологию строительства. В Германии (в Западной Европе), как правило, применялись природные мелкоштучные материалы, добываемые в карьерах, и полнотелые глиняные кирпичи. Растворы, как правило, были известковые, сложные глиняные и цементно-известковые.

Здания более ранней постройки (18 ... начало 19 в.), имеющие историческую ценность, представляют собой деревянный каркас с саманным заполнителем, установленный на мелко заглубленный фундамент из бутового камня на известковом или сложном

глиняном растворе, при этом подвалы расположены только под частью здания. Междуетажные перекрытия — деревянные балки.

К преимуществам каменных конструкций относится простота изготовления, возможность применения местных материалов, долговечность, огнестойкость, относительно высокая прочность, влаго-, морозо-, химическая стойкость. Это и определяет их широкое применение. К недостаткам можно отнести значительные трудовые затраты на возведение, большую массу и высокую теплопроводность. Каменная кладка представляет собой неоднородное тело, состоящее из камней и разделенное вертикальными и горизонтальными швами, заполненными раствором. Эта неоднородность в основном и определяет особенности ее физико-механических свойств.

Анализ работы каменной кладки при сжатии показывает, что вертикальные швы практически не участвуют в работе из-за нарушения сцепления раствора с камнем вследствие его усадки в процессе твердения. Нагрузка на нижележащие слои кладки передается через горизонтальные швы. Причем передача нагрузки происходит неравномерно, так как плотность и жесткость раствора по длине шва неодинаковы, да и плоскости камней могут иметь неровности. Известковые, сложные глиняные растворы медленно твердеют, имеют низкую прочность и быстро разрушаются при увеличении влажности, поэтому они могут применяться лишь при небольших нагрузках и в относительно сухом климате.

Особенности каменных конструкций при длительном намокании достаточно ярко проявились во время сильного наводнения в Западной Европе.

С 24.08 по 3.09 2002 г. в Германии работала оперативная группа по обследованию зданий и сооружений ФЦ ВНИИ ГОЧС *. Группа работала в городах Магдебург и Виттенберг. Для определения степени повреждения и, в конечном итоге, устойчивости зданий применялась комплексная технология определения технического состояния зданий.

Технология включает в себя высокоточное обследование геометрии строительной площадки и объектов, неразрушающего контроля прочности основных конструктивных элементов и грунтового массива, динамических параметров грунтового массива и объектов.

При высокоточном изучении геометрии производится проверка вертикальности и горизонтальности несущих конструктивных элементов, привязка обнаруженных дефектов и их сравнение с нормативными показателями. Для снятия геометрических параметров применяются высокоточные цифровые лазерные тахеометры.

*Федеральный центр Всесоюзного научно-исследовательского института по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций

Неразрушающий контроль прочности производится с применением цифровых склерометров и ультразвуковых приборов. Полученные данные сравниваются с проектными показателями, и делается вывод о степени повреждения конструктивных элементов.

Контроль физико-механических и геометрических параметров грунтового массива производится с применением методов сейсморазведки и электроразведки, георадаров и динамического зондирования грунтов.

Динамические параметры грунтов и объектов снимаются с применением мобильного диагностического комплекса «Струна-2».

Полученные геометрические, физико-механические и динамические параметры сравниваются с нормативными значениями: моделируются воздействия на здание опасных нагрузок с новыми полученными в результате инструментального контроля значениями основных параметров.

Использование этой технологии позволило оценить реальное состояние зданий, подвергшихся длительному затоплению, оказывая на них сверхслабые неразрушающие воздействия и проводя измерения высокочувствительной аппаратурой. Результатом обследований явились заключения о техническом состоянии зданий и рекомендации по их дальнейшей эксплуатации и ремонту.

В ходе работы было обследовано 11 объектов, из них 10 — кирпичных зданий и одно здание с деревянным каркасом и саманным заполнителем. Здания имели слабые фундаменты, при этом многие дома подвергались реконструкции. Грунты оснований в большинстве случаев также оказывались слабыми. Стены почти всех обследуемых зданий имели старые вертикальные трещины, что говорит о просадках фундаментов еще до наводнения. Воздействие воды ускорило процессы разрушения, в некоторых случаях эти процессы стали необратимы.

Реконструкция, как правило, заключалась в замене покрытия и кровли. В ряде случаев, при разрушении перекрытия подвала, часть подвала засыпалась грунтом (песком), что оказывало дополнительное боковое воздействие на стены подвала. При устройстве нового пола лаги укладывались прямо на засыпной грунт. При перепланировке внутренней части дома, фундаменты стен, в том числе и несущих, устраивались также в насыпном грунте. Глубина заложения таких фундаментов составляла 0,3...0,5 м. После понижения уровня воды, вследствие уплотнения и вымывания насыпного грунта, наблюдались разрушения стен (рис. на цветной вкладке) и проседание полов.

Прочность каменной кладки на слабых растворах во многом зависит от содержания в ней влаги. Содержание строительной влаги

в конструкциях обусловлено спецификой их изготовления и в начальный период обычно не превышает для каменных и армокаменных конструкций 8...12%. При неблагоприятных условиях эксплуатации влажность материала конструкций может существенно увеличиваться. Повышение содержания влаги в кирпичной кладке ведет к снижению ее несущей способности.

Следует отметить, что для стен, у которых отсутствует горизонтальная гидроизоляция или когда гидроизоляция расположена ниже отсыпки (каменной отсыпки по внешнему периметру наружных стен), характерно увлажнение капиллярным подсосом грунтовой влаги. В случае наводнения уровень воды почти всегда находится выше горизонтальной гидроизоляции.

Механизм капиллярного увлажнения основан на действии сил притяжения между молекулами твердого тела и жидкости (явление смачивания). При отсутствии в материале стены гидрофобных (водоотталкивающих) веществ вода смачивает стенки капилляров и поднимается по ним. Высоту поднятия воды в капилляре можно определить по формуле Д. Жюрена:

$$h = \frac{2\sigma}{r \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot g},$$

где h — высота поднятия воды в капилляре; r — радиус капилляра, см; ρ_1 и ρ_2 — соответственно плотность воды и воздуха; g — ускорение свободного падения; σ — поверхностное натяжение воды

В капиллярно-пористых материалах, к которым относятся кирпич и цементно-песчаный раствор, радиус капилляров находится в пределах $1 \cdot 10^{-6}$... $1 \cdot 10^{-2}$ см. Поверхностное натяжение воды при температуре $+20^\circ\text{C}$ составляет $72,8 \cdot 10^{-5}$ Н/см. Если пренебречь плотностью воздуха, то максимальная высота подъема воды в капиллярах за счет сил смачивания составит примерно 1,5 м.

Учитывая, что уровень воды при наводнении находился на уровне пола первых этажей жилых зданий, стены при капиллярном эффекте намокали на высоту 3...4 м от уровня отсыпки.

Сочетание нескольких неблагоприятных факторов, а именно снижение связующих свойств раствора кладки вследствие намокания, неравномерная глубина заложения частей фундаментов здания, просадочные грунты оснований, естественный уклон местности и т.п., привело к тому, что некоторые здания оказались в аварийном состоянии и даже под угрозой обрушения (рис. на цветной вкладке).

Анализируя результаты обследований, можно сделать некоторые обобщения.

Большинство домов, оказавшихся в зоне затопления, имели фундаменты, сложенные из природного камня высотой 10...20 см на известковом или сложном известково-глиняном растворе, с глубиной заложения до двух метров. Из-за отсутствия вертикальной гидроизоляции и защиты фундаментов в виде отмостки атмосферная вода, в ходе эксплуатации здания, размывала раствор, открывая доступ влаги к внутренним рядам кладки. При длительном замачивании (наводнении) раствор существенно потерял свою связывающую способность, что ослабило несущую способность и прочность фундамента по всей его толщине. Появились трещины, камни вынимаются из кладки.

Наблюдается также неравномерная глубина заложения частей фундамента одного здания, что приводит к неравномерному распределению нагрузки. В условиях грунтов, которые при замачивании теряют свою несущую способность, это привело к образованию сквозных вертикальных трещин в несущих стенах (рис. на цветной вкладке).

Стены сложены из обыкновенного глиняного кирпича на известковом или цементно-известковом растворе. Ширина стен — 38 ... 40 см. В результате деформаций фундамента большинство домов имеет вертикальные трещины в стенах, в том числе в несущих стенах. Трещины заделаны без соблюдения строительной технологии, что приводит к вымыванию раствора из кладки и разрушению материала стен атмосферными осадками. Наводнение усугубило положение тем, что при отсутствии горизонтальной гидроизоляции несущие стены намокли на большую высоту. Переувлажнение слабых растворов привело к появлению новых трещин и ослаблению жесткости конструкций.

В большинстве аварийных зданий нарушена целостность кровли, что также приводит к вымыванию раствора кладки стен и развитию гнилостных процессов в деревянных балках перекрытия. Балки перекрытий, как правило, не менялись в течение всего срока эксплуатации: их возраст составляет 100 и более лет.

Подвал в кирпичных строениях, за редким исключением, располагается под всем зданием. Перекрытие подвала практически всех зданий — каменный свод по металлическим балкам. Затопление подвалов привело к развитию интенсивных коррозионных процессов металлических составляющих сводов.

Для определения типа здания при диагностике использовалась следующая классификация:

тип А1 — местные здания. Здания со стенами из местных строительных материалов, со стенами из самана или сырцового кирпича, с каменными, кирпичными или бетонными фундаментами;

тип Б — местные здания. Здания с деревянным каркасом с заполнителем из самана или глины и легкими перекрытиями; здания из жженого кирпича, тесаного камня или бетонных блоков на известковом, цементном или сложном растворе;

тип В — местные здания. Деревянные дома рубленые; железобетонные, каркасные, крупнопанельные и армированные крупноблочные дома; уникальные здания и сооружения.

Экспресс-оценка степени повреждения зданий может быть получена методом динамических испытаний.

Результаты диагностирования зданий по методу динамических испытаний приведены в таблице.

Таблица

Адрес здания	Период собственных колебаний по X, нормативный/измеренный, с	Период собственных колебаний по Y, нормативный/измеренный, с	Степень повреждения
Gübs, Dorfstraße, 43	0,201/0,147	0,262/0,104	Средняя
Gübs, Dorfstraße, 46	0,252/0,173	0,298/0,180	Легкая
Wittenberg-Pratau, Wittenberger Straße 2, блок №1.	0,235/0,093	0,328/0,122	Легкая
Wittenberg-Pratau, Wittenberger Straße 2, блок №2.	0,182/0,104	0,266/0,213	Легкая
Seegrehna, Wittenberger Straße, 38, Landkreis Jerichower Land	0,27/0,307	0,29/0,116	Средняя
Iserbegka, Hauptstraße, 10, Landkreis Lutherstadt Wittenber	0,207/0,1	0,351/0,079	Средняя
Prettin, Hohestraße, 24, Landkreis Lutherstadt Wittenberg	0,35/0,146	0,4/0,187	Тяжелая

Большинство из испытанных зданий имеют среднюю и легкую степени повреждения.

Из таблицы видно, что традиционный критерий по увеличению периода собственных колебаний не всегда срабатывал. Однако наблюдалось заметное изменение соотношений периодов колебаний по продольной и поперечной осям.

Анализ выполненных работ по диагностированию зданий, подвергшихся воздействию наводнения, показывает, что для оперативного определения устойчивости вполне пригоден метод динамических испытаний. Используя этот метод в сочетании с методами неразрушающего контроля прочности, сейсморазведки, динамического зондирования грунтов и высокоточной геодезии можно дать более точный ответ о состоянии здания и пригодности его к дальнейшей эксплуатации.

МЕТОД ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ ОТКОСОВ С УЧЕТОМ РЕЖИМОВ ФИЛЬТРАЦИИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ СПАДЕ ПАВОДКОВ

*Стефанишин Д. В., доктор техн. наук
(ОАО «ВНИИГ им Б.Е. Веденеева»),*

*Кузюк Н.Т., кандидат техн. наук (Украинский государственный
университет водного хозяйства и природопользования)*

Для обеспечения безопасной работы верховых откосов грунтовых плотин и противопаводочных дамб, устойчивости береговых склонов рек важное значение имеет учет влияния режима фильтрации, возникающей в зоне обводнения грунтовых массивов при снижении уровня воды при спаде паводков, а также при прорыве напорного фронта. Схему расчета устойчивости грунтового откоса при этом следует выбирать в зависимости от того, в какой мере скорость изменения уровня воды в водотоке отличается от скорости изменения положения кривой депрессии.

Для идентификации различных режимов снижения уровня воды предложены соответствующие критерии. Среди них критерий, характеризующийся параметром α , который согласно [1] – [3] может быть записан в виде:

$$\alpha = K_{\phi} / \mu v m^2, \quad (1)$$

где K_{ϕ} , μ — соответственно коэффициенты фильтрации и водоотдачи грунта; v — скорость снижения уровня воды; m — коэффициент заложения откоса.

В зависимости от значения параметра α условно различаются три режима снижения уровня воды, определяющие расчетные схемы фильтрации при расчетах устойчивости грунтовых откосов:

1) при $0 < \alpha \leq 0,05$ — режим так называемого «быстрого» (мгновенного) снижения уровня, при котором скорость v значительно

превышает скорость вертикального снижения кривой депрессии; при расчетах устойчивости грунтового откоса силы неустановившейся фильтрации не учитываются, но обводненный грунт рассматривается как взвешенный;

2) при $0,05 < \alpha \leq 5$ — режим снижения уровня воды, при котором возникает фильтрация, направленная в сторону водоема; при расчетах устойчивости откоса необходимо учитывать силы неустановившейся фильтрации;

3) при $5 < \alpha < \infty$ — режим «медленного» снижения уровня воды в водоеме, когда скорость v и скорость вертикального изменения положения кривой депрессии в грунтовом массиве отличаются незначительно; фильтрация считается установившейся и направленной в сторону водоема.

При традиционной, детерминистической постановке задачи параметр α однозначно определяет расчетную схему фильтрации, а следовательно схему расчета устойчивости грунтового откоса и значение коэффициента устойчивости.

Однако на практике фильтрационные характеристики K_f и μ , скорость снижения уровня воды v , а иногда (особенно в случае естественных откосов) и коэффициент заложения откоса m нельзя определить однозначно. Им свойственна как природная изменчивость, так и неопределенность, связанная с несовершенством методов измерения характеристик, ошибками изысканий, прогноза и пр.

При традиционных расчетах устойчивости грунтовых откосов изменчивость характеристик принято учитывать посредством задания так называемых расчетных значений, которым предписывается обеспеченность p (для первой группы предельных состояний p обычно назначается равной 95%, так что расчетное значение характеристики не окажется хуже принятого). Таким образом достигается определенный уровень безопасности сооружения и минимизация риска.

Результаты проведенного авторами стохастического моделирования параметра α как функции случайных аргументов K_f , μ , v , m методом статистических испытаний (Монте Карло) указывают на то, что значение α обеспеченностью p , полученное непосредственно с интегральной кривой вероятностей α , как правило, не совпадает со значением α , полученным при расчетных значениях $K_{f,p}$, μ_p , v_p , m_p , которым предписана та же обеспеченность p . Более того, нередко «расчетные» значения α_p обеспеченностью p , полученные этими двумя способами, «попадают» в разные интервалы, определяя таким образом различные расчетные схемы фильтрации.

Кривые плотности вероятности параметра α , полученные при стохастическом моделировании α как функции случайных аргу-

ментов, обычно распространяются на все указанные интервалы. Это доказывает принятое в [4] допущение, что параметр α может находиться в каждом из вышеуказанных интервалов с разной вероятностью $P(\alpha_j) = P(a_j < \alpha < b_j)$, где a_j, b_j — значения соответствующего критерия, определяющего j -й режим снижения уровня воды и условия фильтрации в грунтовом клине. Однако допущение о нормальном законе распределения параметра α следует признать не вполне адекватной моделью для описания реальной картины его изменчивости. Даже при использовании гипотезы о нормальном законе распределения «входных» характеристик K_ϕ, μ, v, m наблюдается существенное отклонение реального распределения параметра α от нормального закона.

С целью упрощения последующего вероятностного анализа «выходной» случайной величины α при проведении статистических испытаний удобным оказалось использовать аппроксимацию расчетных гистограмм полиномами. При этом сравнительно легко удавалось получить высокую достоверность модельного распределения (от 80% и выше). Степень аппроксимации, при этом, обычно не превышала 8. Для подбора соответствующих аппроксимирующих полиномов для плотности распределения вероятности параметра α при численных расчетах авторы использовали программу Mathcad Professional.

Если установлена плотность распределения параметра α , то вероятность реализации j -го режима снижения уровня воды $P(\alpha_j)$, определяющего соответствующий режим фильтрации в грунтовом массиве,

$$P(\alpha_j) = \int_{a_j}^{b_j} p d(\alpha) d(\alpha), \quad (2)$$

где a_j, b_j — пределы изменения параметра α для j -го режима ($j = 1, 2, 3$) снижения уровня воды и условий фильтрации в грунтовом клине; $p d(\alpha)$ — плотность распределения параметра α .

Вероятность реализации любого из j -х режимов должна равняться единице ($\sum P(\alpha_j) = 1$). Таким образом формируется полная группа событий по $j = 1, 2, 3$. Тогда вероятность обрушения грунтового откоса $P(k_S < 1, \alpha)$ с учетом возможной реализации любого из j -х режимов снижения уровня воды определится по формуле полной вероятности:

$$P(k_S < 1, \alpha) = \sum_{j=1}^3 P(k_S < 1 | \alpha_j) P(\alpha_j), \quad (3)$$

где $k_S < 1$ — условие нарушения устойчивости откоса; $P(k_S < 1 | \alpha_j)$

— условная вероятность обрушения грунтового откоса при j -м режиме снижения уровня воды; $P(\alpha_j)$ — вероятность реализации j -го режима фильтрации.

Для количественной оценки условных вероятностей обрушения грунтового откоса при j -х режимах снижения уровня воды $P(k_s < 1 | \alpha_j)$ может использоваться метод Монте Карло, метод линеаризации, либо любой другой вероятностный метод анализа устойчивости грунтового откоса, где коэффициент устойчивости k_s представляется в виде функции случайных аргументов (плотности грунта, его влажности, показателей прочности, фильтрационных нагрузок и т. п.) [5].

В общем случае вероятностный подход позволяет учесть и влияние различных паводков на устойчивость грунтового откоса. Для этого достаточно задаться вероятностями превышения i -х расчетных паводков и произвести вероятностные расчеты устойчивости откоса по формуле (3) для условий, которые характеризуют каждый из этих паводков (уровня воды в водотоке на пике паводка, скорости снижения уровня воды при спаде паводка). Вероятность нарушения устойчивости откоса с учетом возможности реализации различных режимов фильтрации в условиях снижения уровней воды на момент спада паводков $P(k_s < 1, \alpha, h)$ по множеству из n учитываемых i -х расчетных паводков определится по формуле:

$$P(k_s < 1, \alpha, h) = \sum_{i=1}^n P(k_s < 1, \alpha | h_i) P(h_i), \quad (4)$$

где $P(k_s < 1, \alpha | h_i)$ — условная вероятность обрушения грунтового откоса при снижении уровня воды в водотоке на момент спада i -го паводка.

В заключение отметим, что предлагаемый метод учета режимов снижения уровня воды при анализе устойчивости грунтовых откосов позволяет не только получить количественную оценку вероятности нарушения устойчивости откоса в период спада паводка. Особенностью метода является возможность выявления наиболее опасных паводков и режимов фильтрации на период их спада для устойчивости откоса по относительному «вкладу» этих факторов в полную вероятность нарушения устойчивости откоса $P(k_s < 1, \alpha, h)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малаханов В.В., Рогаль М.Ф., Серков А.В. Влияние скорости сработки водохранилища на надежность сооружений гидроузла // Энергетическое строительство. 1984. №2.

2. **Можевитинов А.Л., Сулейманов И.А.** Критерий необходимости учета неустановившейся фильтрации в грунтовых плотинах при оценке устойчивости откоса //Известия ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева. 1979. Т.135.
3. **Transactions of the 19-th Int. Congress on Large Dams. Vol.3. Q.74. 26-30 May. Florence-Italy. 1997.**
4. **Пепоян В.С., Стефанишин Д.В.** К оценке надежности грунтовых плотин в условиях неустановившейся фильтрации //Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1988. Т.209.
5. **Стефанишин Д. В., Шульман С. Г.** Проблемы надежности гидротехнических сооружений. С-Пб: Изд-во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1991.

ОБ ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РАСЧЕТУ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН, ВОЗВОДИМЫХ В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Красильников Н.А., кандидат техн. наук (ОАО «НИИЭС»)

Вопрос об устойчивости естественных, в том числе оползневых, склонов, а также откосов грунтовых плотин и других сооружений, разрабатывается в отечественной и зарубежной практике более ста лет.

Основоположниками этого научного направления являются проф. К.Терцаги, Р.Р. Чугаев, Н.Н. Маслов, А.А. Ничипорович, Е.П. Емельянова, А.Л. Можевитинов, Г.Л. Фисенко и другие. В ОАО «НИИЭС» эти вопросы разрабатывали И.Н. Щербина, Ю.К. Зарецкий, В.И. Щербина, Н.А. Красильников. Некоторые представления о масштабах исследований по устойчивости грунтовых склонов и откосов можно получить из приведенного краткого перечня диссертационных работ по этой тематике за 1953–1982 гг. [6].

Данные Рекомендации [2] содержат разъяснения и дополнения к положениям раздела 5 главы СНиП 2.06.05-84* «Плотины из грунтовых материалов» [1]. Рекомендации разработаны по материалам обобщения результатов научных исследований и производственного опыта, накопленного при проектировании, расчетах и исследованиях в 1967–1988 гг. десятков грунтовых плотин различного типа и назначения. Цель Рекомендаций— обоснование и повышение эффективности проектных и изыскательских работ, а также обеспечение надежности грунтовых плотин, строящихся в сложных инженерно-геологических условиях.

Со времени выпуска в 1971 г. «Указаний по расчету устойчивости земляных откосов» ВСН-04-71 Минэнерго СССР в рассматриваемой области был получен ряд новых материалов, которые в той или иной мере были учтены при составлении настоящих Рекомендаций. Усложнились задачи расчета: кроме первой задачи, когда требуется определить значение коэффициента устойчивости откоса плотины для расчетных случаев, показанных в [1], и соответствующее положение наиболее опасных поверхностей скольжения, инженеру-гидротехнику требуется оценить влияние на степень устойчивости откоса плотины изменения ее конструкции (в процессе проектирования и строительства), степени консолидации глинистого грунта в основании или теле сооружения и т.д. Особенно возросли требования к инженерным способам расчета грунтовых плотин после того, как стали проводиться испытания опытных насыпей, а иногда даже их обрушения с целью уточнения расчетной схемы сооружения и строительных свойств грунта, а также после того, как в нормах была поставлена задача определять предельно допустимые параметры состояния грунтовых плотин по показаниям контрольно-измерительной аппаратуры.

Все эти зависимости и мероприятия должны быть получены, интерпретированы и обоснованы по материалам расчета устойчивости откосов каждого конкретного сооружения.

Расчеты выполняются на ЭВМ, что, в частности, существенно повышает их точность за счет рассмотрения большего количества вариантов расчета, а также правильного определения для сложных инженерно-геологических условий положения наиболее опасной поверхности скольжения. В лучших проектах исходные положения расчетов и расчетные показатели грунта стали проверяться при исследовании опытных насыпей и фрагментов реальных сооружений в начальный период строительства. Появились аналоги — комплексные рекомендации по оценке устойчивости откосов в горной промышленности.

Исследования последних лет показали, что в подавляющем большинстве случаев точность описанного в [2] метода расчета устойчивости откосов грунтовых плотин достаточно высока. Надежность расчета зависит, главным образом, от правильности определения исходных данных, от точности прогноза уплотнения и разуплотнения грунта во времени. Расчеты устойчивости откосов грунтовых плотин по описанной в [2] методике могут выполняться по программам «Откос-Пл».

Устойчивость рассчитываемых элементов конструкции плотин должна быть обеспечена при всех возможных условиях эксплуатации, а также в процессе возведения плотины. Основные фак-

торы, влияющие на значение коэффициента устойчивости откоса грунтовой плотины, и их количественная оценка показаны в [3].

При расчетах устойчивости откосов плотин в [1] рекомендуется рассматривать расчетные случаи, показанные в табл.1 и 2. Кроме того, для тех или иных конкретных грунтовых плотин при надлежащем обосновании могут рассматриваться и другие расчетные случаи.

Таблица 1

Расчетные случаи при расчете устойчивости низового откоса грунтовой плотины

Расчетный случай	Уровень воды в верхнем бьефе	Сейсмическое воздействие	Основные условия расчета
а) Основной	Нормальный подпорный уровень, НПУ	—	Дренажи работают нормально, в теле и основании плотины установившаяся фильтрация
б) Особый	НПУ	Учитывается	То же, что в п. "а" (в случае, если плотина находится в сейсмическом районе)
в) Особый	Форсированный подпорный уровень, ФПУ	—	То же, что в пункте "а"
г) Строительный	В случае, если тело, ядро, экран или основание плотины выполнены из глинистого грунта, должна быть проверена устойчивость откоса с учетом порового давления консолидации. Поровое давление в теле и основании плотины определяется расчетом.		
д) Строительный	В земляной намывной плотине необходимо учитывать фильтрацию из грунта в период намыва плотины с учетом смоченного состояния грунтов откосов. Фильтрационный напор определяется расчетом или экспериментом.		
е) Строительный	Для плотин, указанных в пунктах г), д), проверяется устойчивость откосов с учетом фактической технологии строительных работ, состава, плотности и влажности, прочностных свойств уложенного грунта, а также порового давления консолидации (или фильтрационных напоров), измеренных при помощи контрольно-измерительной аппаратуры. Эти расчеты должны повторяться не реже 1-2 раз в год и учитывать динамику изменения порового давления консолидации (или фильтрационных напоров) во времени.		

Таблица 2

Расчетные случаи при оценке устойчивости
верхового откоса грунтовой плотины

Расчетный случай	Сейсмическое воздействие	Основные условия расчета
а) Основной	—	Принимается максимально возможное снижение уровня воды в водохранилище от НПУ с наибольшей возможной скоростью, при этом учитываются фильтрационные силы, возникающие в откосе.
б) Особый	Учитывается	То же (в случае, если плотина находится в сейсмическом районе). Для плотин с центральным ядром (при водонасыщенной верховой упорной призме) проверяется также случай, когда уровень воды находится на самой высокой отметке.
в) Основной	—	Уровень воды в верхнем бьефе находится на самой низкой отметке. Уровень воды в теле плотины находится на той же отметке, что в водохранилище.

Несколько примеров результатов расчетов приводится на рис. 1 – 3.

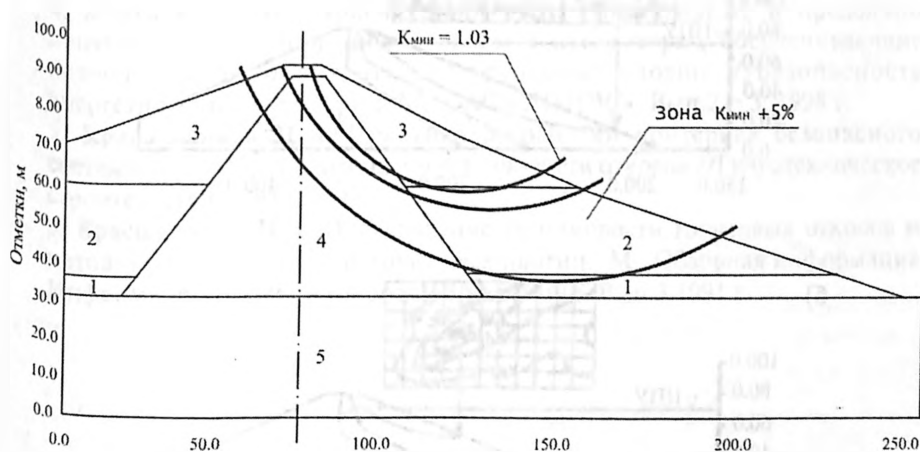


Рис. 1. Зона повышенного внимания в грунтовой плотине высотой 64 м. Основание — гравелисто-галечниковый грунт с заполнителем. Плотина разрушена.

Примечание: цифрами показаны слои грунтов с разными значениями плотности и сопротивления сдвигу.

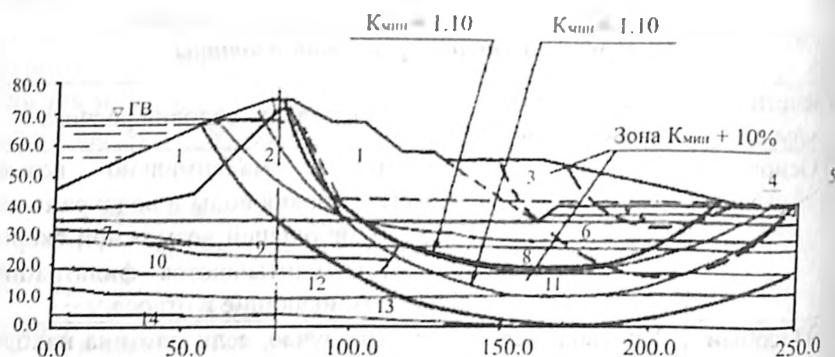
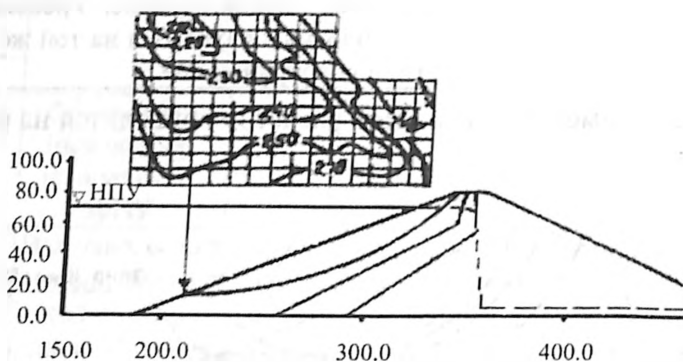


Рис. 2. Зона повышенного внимания плотины высотой 40 м на слабом глинистом основании.

Примечание: цифрами показаны слои грунтов с разными значениями плотности и сопротивления сдвигу.

а)



б)

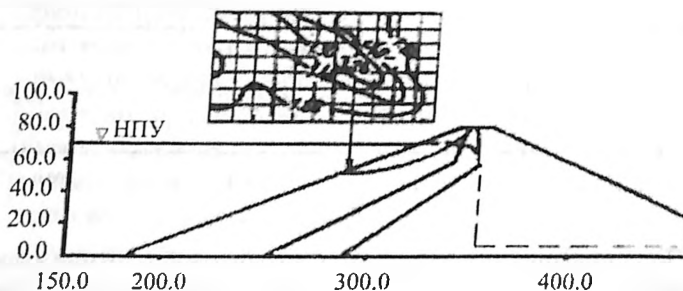


Рис. 3. Результаты расчета устойчивости верхнего откоса каменно-земляной плотины при действии статических (а) и сейсмических (б) нагрузок.

Как показал опыт, при возведении грунтовых плотин в сложных инженерно-геологических условиях наибольшую и своевременную информацию можно получить при исследовании фрагмента реального сооружения, оборудованного контрольно-измерительной аппаратурой. Материалы этих исследований позволяют определить свойства грунта тела и основания плотины в массиве естественного сложения, согласовать между собой применяемые при изысканиях методики и условия определения деформативных, фильтрационных и прочностных свойств грунта, и, кроме того, установить характер взаимодействия сравнительно жесткого тела плотины с основанием, сложенным более слабыми и деформируемыми глинистыми грунтами, особенно в тех случаях, когда они имеют мягкопластичную, текучепластичную или текучую консистенцию.

ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 2.06.05-84* Плотины из грунтовых материалов М. 1991 г.
2. Рекомендации по проектированию плотин из грунтовых материалов. Расчет устойчивости откосов грунтовых плотин. П-783-88* Гидропроект. М.: 1988.
3. Красильников Н.А. Расчеты устойчивости грунтовых откосов. //Основания, фундаменты и механика грунтов. №6. 1995 г.
4. Борткевич С.В., Красильников Н.А. Нормативные и предельно допустимые значения уровней воды в пьезометрах, обеспечивающие безопасное состояние откосов грунтовых плотин. //Безопасность энергетических сооружений М.: ОАО «НИИЭС». Вып.2 – 3. 1998 г.
5. Красильников Н.А. Практика разработки критериев безопасного состояния земляной плотины по устойчивости откосов //Гидротехническое строительство. 1993 г. №12.
6. Красильников Н.А. Исследование устойчивости грунтовых откосов и методика проектирования грунтовых плотин. М.: Обзорная информация Информэнерго. Серия гидроэлектростанции. Вып.3.1991 г.

РАСЧЕТЫ УСТОЙЧИВОСТИ НИЗОВОГО ОТКОСА ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ ГУГОНГ ПРИ ПЕРЕЛИВЕ ВОДЫ ЧЕРЕЗ ГРЕБЕНЬ СООРУЖЕНИЯ

Красильников Н. А., Олимпиев Д. Н., кандидаты техн. наук
(ОАО «НИИЭС»)

Как известно, перелив воды через гребень грунтовой плотины практически всегда ведет к ее разрушению, образованию прорана в напорном сооружении и возникновению в нижнем бьефе искусственного паводка. Из 34 разрушенных плотин, рассмотренных в [1], 60 % сооружений разрушились из-за перелива воды через гребень. Исключение составляют лишь те немногие плотины, которые сконструированы, построены и рассчитаны на перелив воды через гребень сооружения, в частности при пропуске паводка в эксплуатационный период. Одним из таких сооружений является каменно-земляная плотина Гугонг, построенная в 1975 - 77 гг. для водоснабжения г. Канберра, Австралия [2].

В статье кратко описана конструкция плотины Гугонг, технология производства строительных работ, результаты расчета устойчивости низового клина плотины по методике, описанной в [3], а также мероприятия, обеспечившие надежность сооружения даже в случаях перелива воды через гребень плотины.

Каменно-земляная плотина (рис. 1) имеет высоту 60 м и длину по гребню 360 м, несимметричное грунтовое ядро (1), переходные зоны (2) и боковые призмы из камня (3). Основание плотины — скала дацит и гранит.

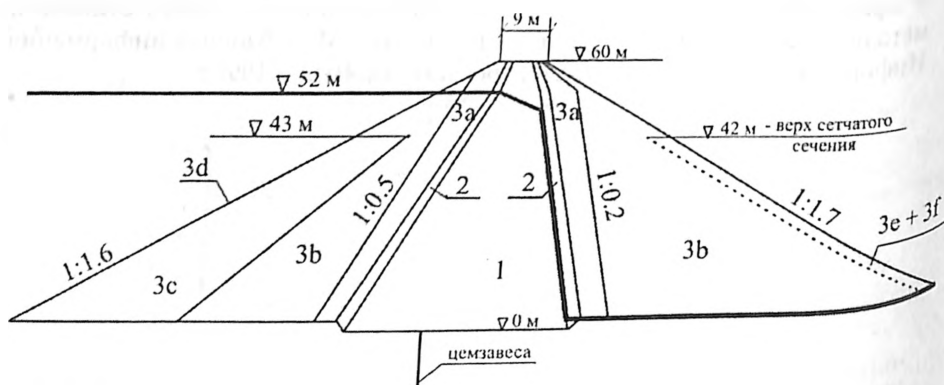


Рис. 1.

Гранулометрический состав грунта ядра показан в табл. 1.

Таблица 1

Крупность материала ядра	Ядро	Низовая треть ядра
Менее 125 мм	100 %	100 %
Менее 4,75 мм	50 %	40 %
Менее 0,025 мм	0,25 %	0,15 %

Грунт ядра укладывался при оптимальной влажности $W_{\text{опт}} \pm 1\%$ слоями по 0,17 м после уплотнения. Материал фильтра — речной песок и щебень. Отсортированная насыпь из камня, прилегающая к фильтру, используется как вторая зона фильтра. Она укладывалась слоями по 0,5 м и уплотнялась двумя проходами 10-тонного виброкатка.

Для оценки устойчивости низового откоса плотины Гугонг, в том числе при переливе воды через сооружение, авторами были выполнены расчетные исследования устойчивости низового откоса по методике, изложенной в [3]. Принятые расчетные показатели грунтов плотины показаны в табл. 2.

Таблица 2

№№ зон	Наименование грунта	$\gamma_{\text{л}}, \text{т/м}^3$	$\gamma_{\text{нас}}, \text{т/м}^3$	$\text{tg } \varphi$	$C, \text{т/м}^2$
1	Суглинисто-щебенистый грунт, уложенный слоями по 0,17 м	2,39	2,39	0,53	0,00
2	Речной песок или щебень, уложенный слоями по 0,5 м	2,10	2,24	0,58	0,00
3б	Каменная насыпь, уложенная слоями по 1 м	1,81	2,14	0,90	0,00

Рассмотрены расчетные случаи, когда плотина отсыпана на высоту 20 м и плотина возведена полностью на высоту 60 м. В каждом расчетном случае рассматривались три положения уровня воды в водохранилище, показанные в табл. 3 и рис. 2, 3.

Во всех расчетах определялись положение наиболее опасной поверхности скольжения и величина наименьшего коэффициента запаса устойчивости $K_{\text{мин}}$, а также зоны сооружения, в которых имеются поверхности скольжения, характеризующиеся значениями коэффициента запаса менее 1,0, в диапазонах от 1,0 до 1,2 и от 1,2 до 1,5.

Таблица 3

№№ п/п	Высота плотины, м	Отметка уровня воды в верхнем бьефе, м	Состояние камня низовой призмы
1	20	15	Сухой
2	20	20	Водонасыщенный
3	20	24	Водонасыщенный
4	60	52	Сухой
5	60	60	Водонасыщенный
6	60	64	Водонасыщенный

Результаты расчетов устойчивости низового откоса плотины Гугонг показаны в табл. 4 и на рис. 2, 3.

Таблица 4

№ п/п	Наименование расчетного случая	Характер по- верхности скольжения	Величина минимально- го коэффициента запаса устойчивости откоса с заложением 1 : 1,7
Высота насыпи - 20м.			
1	Низовая призма сухая	Поверхностные Глубокие	1,52 -
2	Низовая призма водонасыщена	Поверхностные Глубокие	0,81 1,06
3	Откос с перели- вающимся 4-мет- ровым слоем воды	Поверхностные Глубокие	1,00 0,89
Высота насыпи - 60м.			
4	Низовая призма сухая	Поверхностные Глубокие	1,41 1,62
5	Низовая призма водонасыщена	Поверхностные Глубокие	0,76 0,90
6	Откос с перели- вающимся 4-мет- ровым слоем воды	Поверхностные Глубокие	0,60 0,84

При интерпретации результатов расчетов устойчивости низового откоса плотины Гугонг без специальных мероприятий рекомендуется учитывать данные, приведенные в табл. 5 и 6.

Таким образом, расчеты показали, что в нормальном эксплуатационном случае, когда низовой клин остается сухим, низовой откос плотины имеет коэффициент запаса устойчивости не менее 1,41 – 1,52. После того, когда начинается перелив воды через гребень насыпи и низовая призма полностью водонасытилась.

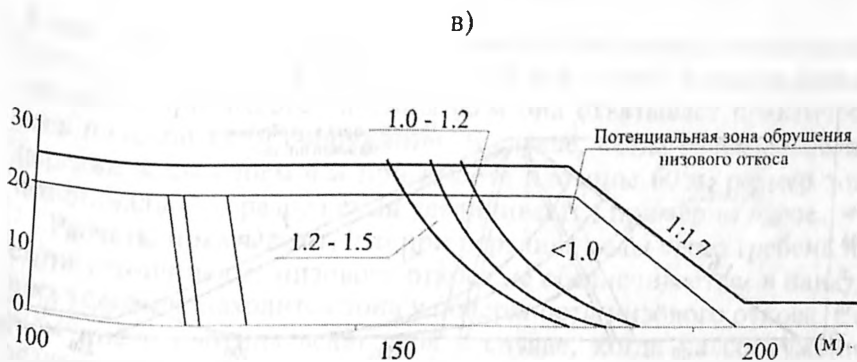
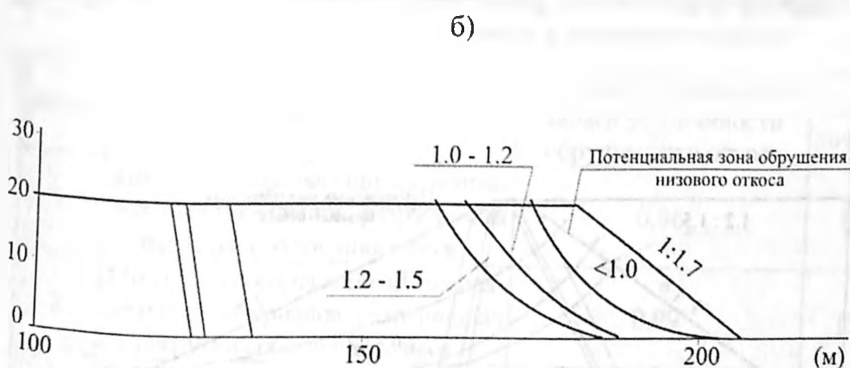
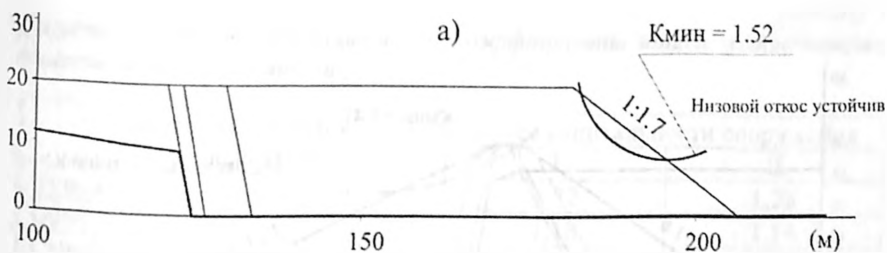


Рис. 2. Результаты расчета устойчивости низового откоса плотины Гугонг, возведенной на высоту 20 м (без учета специальных мероприятий) $K_{уст}$: а — сухой откос; б — водонасыщенный откос; в — перелив воды через гребень насыпи.

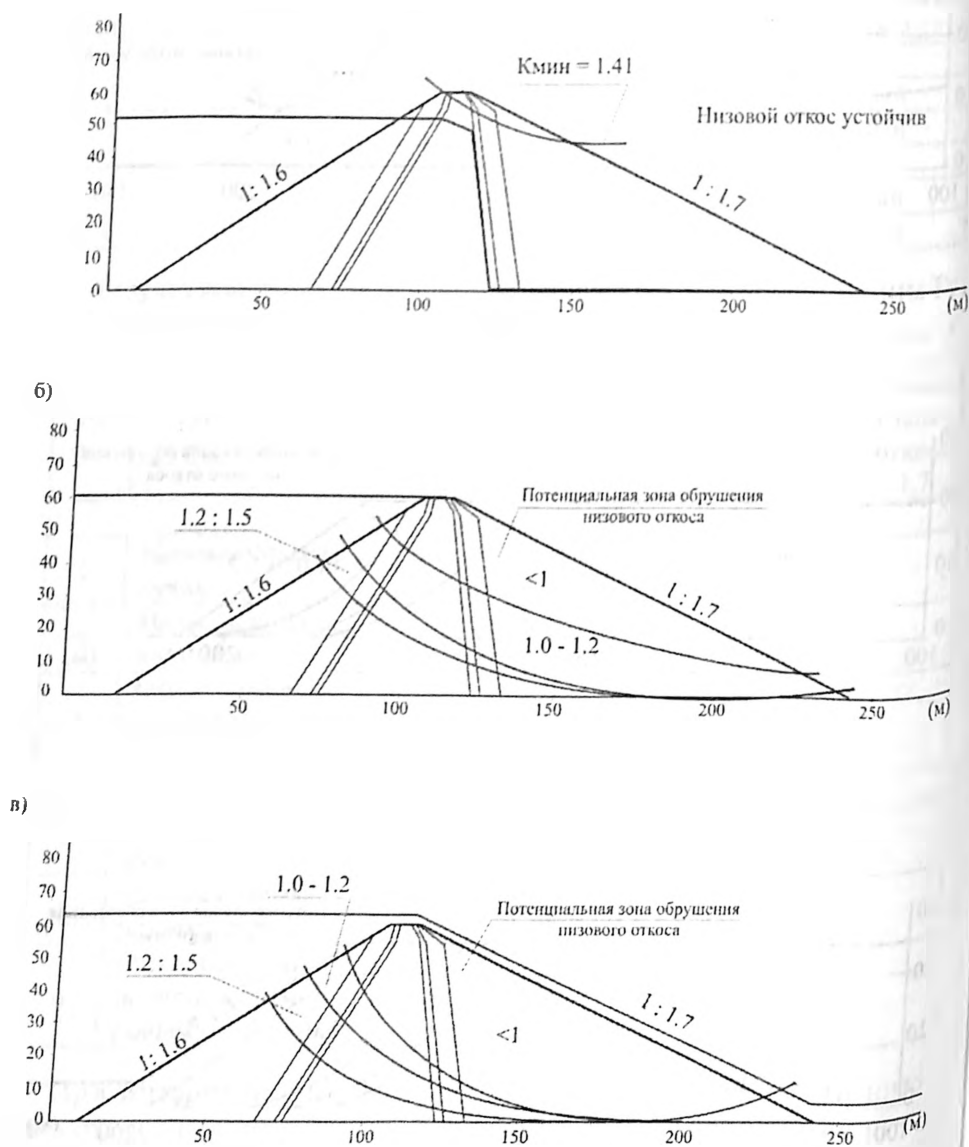


Рис. 3. Значение коэффициента устойчивости низового откоса плотины Гугонг, $K_{уст}$: а — нормальный режим эксплуатации; б — отметка воды совпадает с поверхностью насыпи; в — перелив воды через гребень плотины.

Таблица 5

Допустимые по рекомендациям [3] коэффициенты запаса устойчивости откосов грунтовых плотин

Сочетание нагрузок и воздействий	Класс капитальности сооружения	
	I	II
Основное	1,32	1,28
Особое	1,18	1,14
Строительного периода	1,25	1,20

Таблица 6

Расчетные значения коэффициента запаса устойчивости обрушенных грунтовых откосов в лабораторных и натуральных условиях

№ п/п	Объект	Значение коэффициента запаса устойчивости обрушенного откоса	Ис-точник
1	Модель откоса насыпи из эквивалентных материалов, разрушенная от нагрузки собственного веса	0,96	[4]
2	Модель откоса насыпи из эквивалентных материалов, разрушенная от нагрузки собственного веса	0,99	[5]
3	Обрушенный низовой откос плотины Мармарик, имевшей высоту 64 м	1,03	[6]

в ней появились зоны с коэффициентом запаса устойчивости меньшим 1,0. При высоте насыпи 20 м эта зона сравнительно невелика, а при высоте плотины 60 м она охватывает практически весь низовой клин сооружения. В случае, когда рассматривается перелив воды слоем 4 м при высоте плотины 60 м, размер зоны потенциального разрушения увеличивается примерно вдвое.

Расчеты показывают, что при переливе воды через гребень насыпи устойчивость низового откоса не обеспечивается, в наихудших условиях находится зона у поверхности низового откоса. Со всем иначе плотина ведет себя в случае, когда на сооружении реализуются специальные мероприятия.

Специальные мероприятия по обеспечению надежности плотины

Плотина Гугонг проектировалась с учетом возможного перелива воды при паводке через построенное сооружение. Конструкция плотины на участке пропуска воды показана на рис. 1. Проектировщики предусмотрели здесь две основные системы специальных мероприятий, обеспечивающих надежность сооружения (рис. 4).

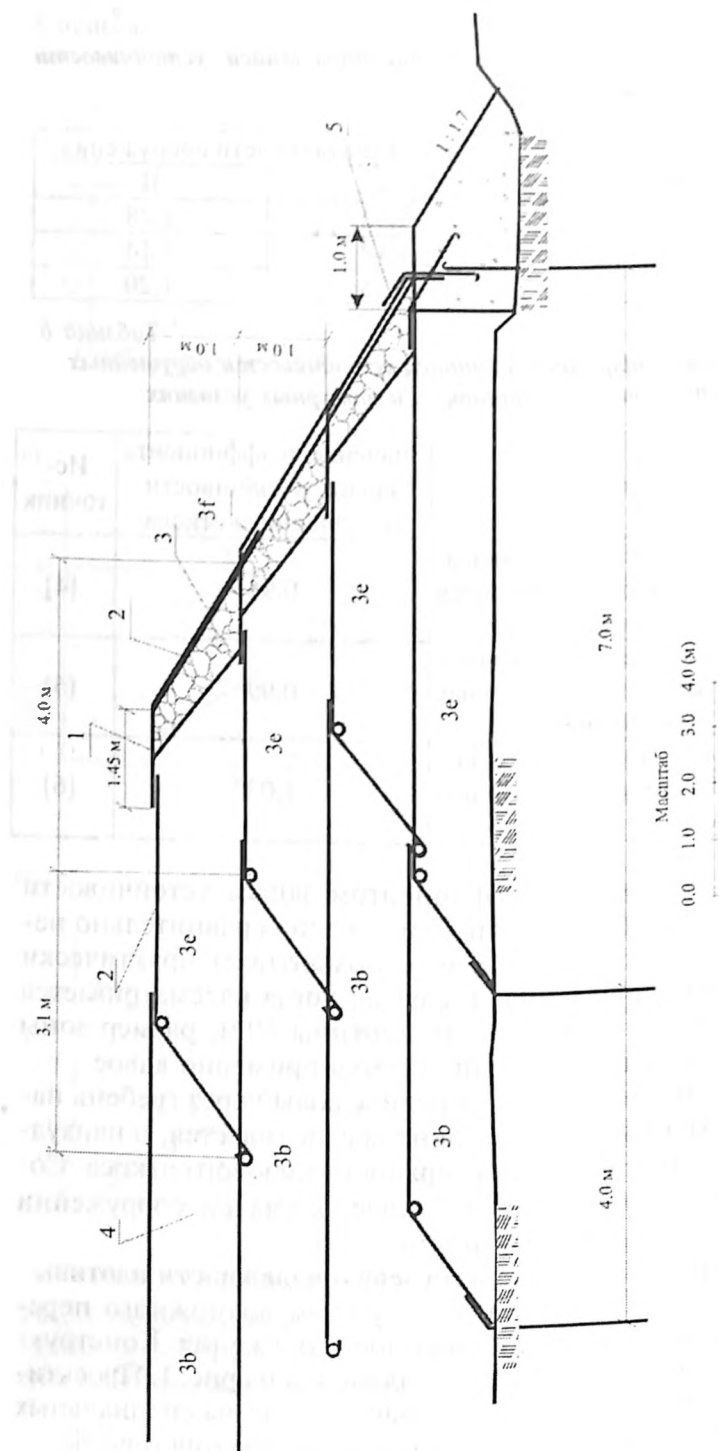


Рис. 4. Укрепление откоса насыпи плотины Гугонг.

3б, 3с, 3ф — зоны низовой призмы (см. рис. 1); зона 3а — более мелкий камень, укладываемый в качестве основания под сетку; 1 — нахлесточный шов после натяжения дократами стержней относительно каменной наброски с усилением 510 кгс; 2 — стержни из канатки диаметром 20 мм с шагом 0,5 м; 3 — сварная сетка Г-82 (квадратная сетка из проволоки толщиной 8 мм из холоднокатаной стали с квадратом 100 мм); 4 — стержни из канатки диаметром 20 мм с шагом 1,0 м; 5 — сварные стержни; 6 — стенка в виде бетонной пяты для предотвращения размыва.

Первая из них — пространственный металлический предварительно напряженный каркас, закрепленный в скальное основание и повышающий устойчивость низового клина плотины во время перелива воды через гребень сооружения.

Вторая система мероприятий — защита поверхности низового откоса плотины от размыва. С этой целью поверхность низовой упорной призмы защищалась специальным сетчатым креплением. Стальная сетка укладывалась на откос до высоты 42 м от дна реки. Нижний конец сетки заанкерен в бетонном блоке для предотвращения подмыва каменной наброски. Каждый 1-метровый слой наброски связан с нижележащим слоем арматурными стержнями диаметром 20 мм. На поверхность наброски уложена сетка, закрепленная к этим анкерам оттяжками диаметром 20 мм. Поверху сетка покрывается 20-мм стержнями, уложенными вертикально с шагом 500 мм.

Устойчивость низового клина плотины в проекте определялась на основе упрощенного метода Бишопа с учетом того, что с помощью внутреннего пространственного каркаса в теле каменной наброски было создано преднапряженное состояние. При проведении расчетов угол внутреннего трения камня принимался равным 42° . Для материала ядра расчетные характеристики получены по данным трехосных испытаний водонасыщенных консолидированных и недренированных образцов с измерением порового давления, а также неводонасыщенных недренированных образцов.

Полученные в проекте значения коэффициентов запаса устойчивости низового клина для четырех расчетных случаев приведены в табл. 7.

Таблица 7

№ п/п	Расчетный случай	$K_{мин}$
1	Установившееся состояние	2,67
2	Максимальный паводок	1,72
3	Конец строительства и период начального заполнения	1,52
4	Быстрое падение уровня воды	1,32

Перелив воды через сооружение имел место 16 и 17 октября 1976 г при возведении плотины до высоты 20 м. Насыпь в целом и сетчатое крепление при этом работали вполне удовлетворительно. Лишь на участке 6 м имел место смыв 0,5-метрового слоя камня с верха насыпи, вымыв части мелких частиц и выпучивание наброски вследствие повреждения ряда горизонтальных стержней

защитной сетки. Толщина слоя переливающейся воды составляла 2,5 м. Фильтры и каменная наброска в процессе перелива воды были заилены на 150 мм. Перед началом работ заиленный слой фильтров был снят, а каменная наброска промыта водой. Низовая перемычка была смыта полностью.

Выводы и рекомендации

1. Перелив воды во время паводка через гребень грунтовой плотины, не имеющей специальных защитных устройств, как правило, не допустим, так как приводит к образованию прорана и последующего техногенного паводка в нижнем бьефе сооружения.

2. На плотине Гугонг вопрос обеспечения надежности сооружения при прохождении паводка решен наиболее эффективным способом — во-первых, устройством в теле каменно-земляной плотины металлического предварительно напряженного каркаса, заанкеренного в основание, который обеспечил устойчивость низового клина плотины даже при обжатом профиле сооружения; во-вторых — системой защиты поверхности низового откоса плотины от размыва.

3. Расчеты устойчивости низового клина Гугонг, выполненные авторами, показали, что без этой стальной конструкции устойчивость низового откоса плотины оказалась бы не обеспеченной.

4. Разработка подобных конструкций плотин в России перспективна для Кавказа, Дальнего Востока и других районов, где наблюдаются большие и стремительно формирующиеся паводки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прудовский А.М. Образование прорана при прорыве земляной плотины. //Безопасность энергетических сооружений. М.: ОАО «НИИЭС». №2-3. 1998.
2. Murley K. Googong Dam, Canberra Water Supply. Performance Under Flood Flows during construction. National Capital Development Commission (Canberra) and Department Housing and Construction ANCOLD. Nov. 1975.
3. Рекомендации по проектированию плотин из грунтовых материалов. Расчет устойчивости откосов грунтовых плотин. П-788-88*/Гидропроект. М. 1988 г.
4. Козлов Ю.С. Моделирование предельного состояния откосов. Труды ВНИИМИ. сб. 64. 1968.
5. Козлов Ю.С. Исследование методов уплотнения откосов. Кандидатская диссертация. Л. ВНИИМИ. 1969.
6. Красильников Н.А. Причины обрушения высокой плотины из грунтовых материалов на реке Мармарик. //Гидротехническое строительство. № 7. 2001.

ТИПИЧНЫЕ АВАРИИ НА МАЛЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ И ПРУДАХ ЮГА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Осипенко Б.В., Гавриленко В.И., инженеры (Департамент государственного контроля и перспективного развития в сфере природопользования и охраны окружающей среды МПР России по Дальневосточному федеральному округу)

Специфические природно-климатические особенности юга Дальнего Востока, заключающиеся в крайне неравномерном внутригодовом распределении атмосферных осадков (с максимумом в летне-осенний период), активной солнечной радиации, интенсивном протекании геокриологических и нередко наледообразовательных процессов, в совокупности с другими факторами предопределяют своеобразные условия работы гидротехнических сооружений малых водохранилищ и прудов и, в конечном итоге, риск наступления их сверхкритического состояния. По имеющимся в мировой практике сведениям, основным фактором аварий на земляных плотинах в 80% случаях является перелив воды через гребень. В Дальневосточном регионе таких случаев аварий зафиксировано очень мало. Аварии на водохранилищах здесь отмечались преимущественно в виде внутренних (скрытых) проранов плотин в зоне расположения трубчатых водосбросных сооружений автоматического действия.

Наиболее показательны в этом плане аварии в 2001 г. на водохранилище Тополевское и пруде-накопителе Вишневокское-1, расположенных в долине р. Амура в южной части Среднеамурской низменности вблизи г. Хабаровска.

Следует отметить, что точное аналитическое описание динамики внутренних проранов плотин из таломерзлых грунтов с образованием волны прорыва выполнить сложно из-за большого количества тесно взаимосвязанных факторов. Положение усугубляется еще и тем, что даже для простейших случаев разрушения плотин при переливе воды через гребень, допускающих аналитическое решение задачи, до настоящего времени не разработаны надежные методологические основы.

В используемых до последнего времени методах оценки параметров волны прорыва при переливе воды через гребень постулируется мгновенное образование прорана заданных размеров. Применительно к земляным плотинам такая модель нереалистична [1, 2]. Поэтому ряд исследователей склоняется к необходимости учета

постепенного развития прорана. Для приближенного описания предельных состояний во времени предлагается использовать дифференциальное стохастическое кинетическое уравнение, полученное японским математиком К. Ито, приведенные в [3]. Однако решение этого уравнения может быть достигнуто только при известной плотности вероятности перехода из одного состояния в другое. При скачкообразном изменении характера случайного процесса, что чаще всего происходит при аварийном разрушении сооружений, его решение затруднено. В связи с этим рассмотрение причин аварий плотин в виде внутреннего (скрытого) прорана представляется актуальной проблемой, требующей дальнейших исследований.

Плотины водохранилища Тополевское и пруда-накопителя Вишневокское-1, на которых в весенний период 2001 г. произошли аварии (в виде внутреннего прорана), отсыпаны из тяжелых пылеватых суглинков. Основные характеристики этих плотин приведены в таблице 1.

По коэффициенту сжимаемости (0,014 ... 0,019 см/кг) и модулю осадки (45,6 ... 95,4 мм/м) при нагрузке 3 кг суглинки характеризуются повышенной сжимаемостью. Они непросадочные и ненабухающие. Сцепление грунтов в талом состоянии 12,5 ... 50,0 КПа. Распученные зимой эти грунты, имевшие до начала промерзания твердую или пластичную консистенцию, после оттаивания весной часто переходят в текучепластичное или даже в текучее состояние и практически не могут нести нагрузки [4].

Конструктивные схемы водосбросов представлены на рис 1, 2. Отмечается, что при строительстве водосбросного сооружения на пруде-накопителе Вишневокское-1 были допущены следующие отступления от проекта:

водопроводящий тракт состоит из 9 раструбных трехметровых сборных ж/б труб, уложенных на бетонную подготовку, стыки зачеканены смоляной прядью (в проекте 5 труб x 5 м);

вместо рассеивающего порога устроена водобойная стенка из сборных ж/б плит, заанкеренных двумя парами ж/б свай;

выходное звено труб уложено нижней образующей на уровне дна водобойного колодца, т. е. без проектного перепада ~ 0,6 м.

При обследовании сооружений пруда-накопителя в период аварии выявлено, что сквозной проран в теле плотины образовался в районе водосброса и имел форму, близкую к овалу, оконтуренного мерзлым грунтом. Общий вид прорана со стороны верхнего и нижнего бьефов приведен на рис. на цветной вкладке.

Осевая линия прорана в плане криволинейна. До места ее пересечения с осью водосборного сооружения проран развивался прак-

тически по нормали к оси плотины, а затем плавно разворачивался по направлению проложения труб (65° к оси плотины). В нижнем бьефе поток обмыл последние 2 трубы водосброса. Суглинистый грунт, с включением щебня, на этом участке полностью вынесен в сбросной канал.

Верхний свод прорана ограничивался мерзлым слоем. После сброса максимального расхода глубина потока уменьшилась. За счет специфических условий оттаивания грунта форма прорана стала приближаться к грибовидной. Отметка его дна соответствовала отметке нижней шельги первой трубы, вбетонированной входным концом в заднюю стенку водоприемного ковша. Общие размеры прорана со стороны верхнего бьефа: высота — 2,2 м, ширина по дну — 1,65 м, на выходной части соответственно: 1,8 м и 3,6 м. Откосы близки к отвесным. На дне за счет обрушения откосов и кровли формировались массивы из разрушенного грунта, местами почти наполовину перекрывающие проран. Разрушенный грунт водным потоком частично выносился в нижний бьеф. Обвалившиеся фрагменты суглинистого грунта имели вид пластин слоистой текстуры толщиной 1 — 3 см и длиной до 15 см с мелкими кристаллами льда. Общий объем вынесенного грунта более 160 м³.

Первые признаки развития фильтрационных деформаций, предшествующих образованию прорана, отмечены весной 1999 г. На участке крепления верхнего бьефа в 1,5 м от задней стенки ковша водосброса был обнаружен свищ диаметром около 5 см. В ранневесенний период 2001 г. (18 апреля) размер свища на дневной поверхности монолитного покрытия составил около 10 см. По глубине он доходил до верха трубы.

После аварии трубчато-ковшовый водосброс сохранил целостность конструкции, за исключением некоторых подвижек (растыковки) звеньев труб (до 210 мм).

Водопроводящая часть шахтного водосброса водохранилища Топольское состоит из 20 ж/б труб с гладкими концами (каждая длиной 2,0 м), уложенных на лекальные блоки, соединение труб выполнено в виде металлического бандажа. Для гидроизоляции использована пропитанная битумом пакля.

Аварийное разрушение плотины водохранилища Топольское по схеме развития двух проранов в районе водосброса произошло за время менее 0,5 суток. Их форма со стороны верхнего бьефа была близка к усеченной воронке с большими диаметрами около 1,0 и 2,0 м. Далее на контакте с водопроводящей частью форма прорана изменилась: здесь он имел вид двух щелей по обе стороны водо-

Таблица 1
Характеристика земляных плотин в Хабаровском крае, подверженных внутреннему (скрытому) прорыву

Наименование водохранилища	Дата возведения плотины	Дата разрушения	Материал плотины, грунты основания	Протяженность напорного фронта, м	Максимальная высота плотины, м	Ширина гребня, м	Заложение откосов		Тип водосборного сооружения	Длина водосборного тракта, м	Емкость водохранилища, млн. м ³	Объем сброшенной воды при аварии, млн. м ³	Начальный перепад уровней в бьефах	Суммарный объем выноса материала из тела плотины, м ³
							верхового	низового						
Топольское	1969	10.04.2001	Суглинок тяжелый пылеватый	441	8,0	6,0	1:2,5	1:2	шахтный	45	0,37	0,15	7,4	~ 300
Вишневское-1	1980	28.04.2001	Суглинок тяжелый пылеватый	676	7,1	4,6	1:2,5	1:2	трубчатого-ковшовый	27	1,0	0,46	5,8	~ 160

сброса (рис. на цветной вкладке). Размеры сформированной слева от оголовка щели: ширина — около 2 м, высота 1,5 м, справа — соответственно 6 — 7 м и 1,8 — 2,0 м. Водопроводящий тракт и сбросной лоток в нижнем бьефе во время аварии были полностью заполнены льдом (рис. на цветной вкладке).

Кроме вышеизложенных конструктивных недостатков водосборов и отсутствия надлежащей эксплуатации гидроузлов развитию аварий во многом способствовали метеорологические условия 2001 г., которые на рассматриваемой территории существенно отличались от среднемноголетних. Почва в зиму ушла в переувлажненном состоянии. В ноябре 2000 г. во время оттепелей наблюдался сток, в ночное время — рост наледей. Во второй половине зимы выпало большое количество осадков (166% к норме). В середине марта начались оттепели. Поверхностный сток, дополнительно спровоцированный дождевыми осадками (вторая декада марта — 245% к норме), был повышенным.

Ночные отрицательные температуры воздуха обусловили рост наледей. При обследовании гидротехнических сооружений в начале апреля установлено, что водопроводящая часть трубчатых водосборных сооружений отдельных водохранилищ, в том числе Топольевского, была полностью заполнена льдом, а на Вишневецком-1 — частично. Причем на последнем интенсивный рост наледи в нижнем бьефе на каменной отмостке привел к значительному ограничению сброса воды. Трубы работали в различном, в том числе напорном гидравлическом режиме с ограничением расхода до минимума из-за уменьшенного живого сечения. В частности, по свидетельству очевидцев, в апреле 1999 г. водосброс работал в напорном режиме из-за образования мощной наледи в выходном отверстии сооружения.

При ликвидации прорана в плотине водохранилища Вишневецкое-1 собственником сооружений по калькуляции было уложено свыше 1,0 тыс. м³ грунта и 0,3 тыс. м³ камня. Однако несмотря на выполненные ремонтные работы общее состояние сооружений по результатам обследования в октябре 2002 г. оценивается, как предаварийное (таблицы 2, 3).

Из представленных в таблицах 2, 3 данных следует: фактическое превышение гребня плотины над форсированным подпорным уровнем воды меньше допустимого на 0,65 м; недопустимое смещение сборных ж/б плит крепления верхнего бьефа приобрело массовый прогрессирующий характер; критерии предельно-допустимых значений расстыковки труб водопроводящей части водо-

Основные показатели состояния сооружений пруда – накопителя
Вишневское – 1 (октябрь 2002 г.)

Тип	Контролируемые параметры	Способ определения	Показатели	
			Предельно допустимые	Фактические
Земляная плотина	Превышение гребня над ФПУ, м	Минимальное из полученных нивелированием гребня по оси и бровкам откосов через 50 м	1,20	0,55
	Осадка гребня, мм	Средняя по данным нивелирования фиксированных точек на оси гребня	250	310 - средняя по длине гребня плотины; 650 – сквозная по ширине гребня выбоина на ПК4+56
	Взаимосмещение сборных ж/б плит крепления верхнего откоса, мм	Линейные измерения в контрольных створах	104	150 (массовое прогрессирующее)
	Заложение откосов: верхового (m_1), низового (m_2)	По данным визуального обследования и нивелирования трех контрольных поперечников	2,50 2,00	2,55 2,05
Трубочато – ковшовый водосброс ТВАМ – 150	Абсолютная отметка порога водослива, м	Средняя по результатам нивелирования 8-ми марок	68,57	68,57
	Осевое (продольное) раскрытие стыков труб водопроводящей части, мм	Линейные измерения в контрольных створах	60 – на промежуточных стыках; 40 – на последнем стыке труб	95 – максимальное (см. таблицу 3) 210
	Абсолютная отметка дна водобойного колодца, м	Средняя по данным площадного нивелирования	64,12	64,95

Продолжение таблицы 2

Тип	Контролируемые параметры	Способ определения	Показатели	
			Предельнодопустимые	Фактические
Трубчато – ковшовый водосброс ТВАМ – 150	Абсолютная отметка верха водобойной стенки (рассеивающего порога), м		64,72 (65,32)	стенка разрушена
Трубчатый донный водоспуск	Утечки воды через неисправную запорную арматуру, л/с	Объемный	0,0009	9,4

Таблица 3

Расстыковка труб водосброса ТВАМ – 150 пруда – накопителя Вишневецкое – 1 (октябрь 2002 г.)

Нумерация стыков между трубами со стороны верхнего бьефа	Расстыковка по направлениям, мм (местоположение измерительного створа)		
	вверху	слева	справа
1	2	3	4
1-2	15	60	95
2-3	40	67	20
3-4	8	40	40
4-5	-	50	50
5-6	-	40	50
6-7	-	5	10
7-8	-	58	47
8-9	-	210	200

сброса превышены в 1,6 – 5,2 раза, причем наибольшая расстыковка отмечается на стыках последних звеньев труб; в результате локального оползания откосов отметка дна водобоя оказалась на 0,35 м выше низа выходного отверстия водосброса (отсутствие перепада в месте выхода потока из трубы привело к заилению части ее внутреннего пространства); водобойная стенка полностью разрушена; утечки воды через неисправную запорную арматуру донного водоспуска обусловили снижение уровня в водохранилище практически до отметки мертвого объема.

Основные причины низкой эффективности типовых решений водосбросов заключаются в слабой изученности и, следовательно, недостаточном учете возможности развития наледных процессов, условий механического взаимодействия элементов системы «инженерная конструкция (в частности, сборная ж/б труба ВТ) — промерзающие и оттаивающие морозоопасные (пучинистые) грунты основания и обратной засыпки», а также гидродинамических особенностей ее функционирования в период пропуска весеннего паводья и летне-осенних паводков. Именно этим объясняется наличие в типовом проекте водосброса слабо развитого фильтрационного контура и, главное, малоприспособленной к работе в условиях неравномерных вертикальных перемещений элементов под воздействием сил морозного пучения грунтов конструкции стыков труб с ковшом и между собой, в особенности на концевом участке водопроводящего тракта сооружения.

Для устранения вышеотмеченных конструктивных недостатков в проекте реконструкции трубчато-ковшового водосброса на пруде-накопителе Вишнево-1 и в других подобных случаях, кроме традиционных ремонтно-восстановительных работ, с учетом ранее выполненных прикладных исследований [7] следует предусмотреть следующее:

противофильтрационный экран (диафрагму) из полиэтиленовой пленки, устроенный в теле плотины в зоне сопряженной с ковшом сборной раструбной ж/б трубы;

гибкие грунтоводонепроницаемые стыки труб ВТ с ковшом и между собой с использованием в качестве основного герметика эластичного гидрофобного морозостойкого материала, например пороизолового каната;

локальную замену пучинистого грунта непучинистым материалом (щебнем, гравием, гравийно-галечниковой смесью и т. п.) в основании и обратной засыпке труб концевого участка водопроводящего тракта сооружения;

расположение выходного (последнего) звена труб ВТ (с перепадом высот 0,60 м) выше дна водобойной части и отводящего канала.

В дополнение вышеуказанному целесообразно разработать эксплуатационные мероприятия по предотвращению недопустимого наледообразования в экстремальных условиях развития этого процесса в зоне выходного отверстия водопроводящего тракта сооружения.

Практическая реализация комплекса инженерно-технических предложений позволит более чем вдвое повысить эксплуатационную надежность и соответствующим образом уровень безопасности реконструированного трубчато-ковшового водосброса по сравнению с типовым его решением [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Прудовский А.М. Образование прорана при прорыве земляной плотины. //Безопасность энергетических сооружений М.: ОАО «НИИЭС». вып. 2 – 3. 1998.
2. Давлетшин В. Х. Динамика разрушения однородных земляных плотин при переливе воды через проран //Гидротехническое строительство. 2001. №4.
3. Мирцхулава Ц.Е. Оценка опасных состояний на гидротехнических объектах //Гидротехническое строительство. 2001. №3.
4. Далматов Б.И., Ласточкин В.С. Устройство газопроводов в пучинистых грунтах. Л.: Недра. 1978.
5. Барабанова Е.А. Типичные случаи повреждения гидротехнических сооружений и меры по обеспечению их безопасности //Гидротехническое строительство. 1995. №3.
6. Качан А.А., Кривоногова Н.Ф. Инженерно-геологические изыскания при ремонте и реконструкции гидротехнических сооружений //Гидротехническое строительство. 2000. №6.
7. Пособие по проектированию и строительству гидротехнических сооружений в условиях пучинистых грунтов Дальнего Востока /Сост.: А.Н. Степанов, В.И. Гавриленко. Рукопись, деп. ВНИИТЭИагропром МСХ РФ, 1997. №26 ВС- 97.
8. СНИП 2.06.05 - 84. Плотины из грунтовых материалов. /Госстрой СССР. М.: АПП ЦИТП. 1991. 56 с.
9. СНИП 2.02.02 - 85. Основания гидротехнических сооружений /Госстрой СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР. 1988. .

НАТУРНЫЕ ОБСЛЕДОВАНИЯ ПРОТОЧНЫХ ТРАКТОВ ВОДОСБРОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ ГИДРОУЗЛА КАПАНДА В ПРЕДДВЕРИИ ПРОПУСКА ПАВОДКА

Куприянов В.П., Юрченко А.Н., кандидаты техн. наук
(ОАО «НИИЭС»)

Безопасность и безаварийная работа гидроузлов неразрывно связана с подготовкой их водосбросных сооружений к пропуску паводков. Это особенно важно, когда скорости движения потока в пределах проточного тракта превышают 15...20 м/с. Поток при этих скоростях имеет огромную разрушительную энергию и, в случае несоответствия возводимых сооружений проектным требованиям, может вызвать большие разрушения. Тому есть множество примеров в отечественной и мировой практике: Саяно-Шушенская ГЭС, Братская ГЭС, Гранд-Кули (США), Порто (Колумбия), Супхун (КНДР), Корун I (Иран) и ряд других. Одной из причин повреждения водосбросных сооружений могут быть дефекты обтекаемых поверхностей, вызывающие кавитационную эрозию. Вследствие этого к качеству выполнения поверхностей водосбросов предъявляются высокие требования, призванные обеспечить кавитационную стойкость сооружений.

Ниже, основываясь на результатах натурального обследования водосбросов гидроузла Капанда, даны общие рекомендации по устранению строительных дефектов и подготовке водосбросных сооружений к пропуску первого паводка.

Гидроузел Капанда расположен в Народной Республике Ангола на территории провинции Маланже в среднем течении р. Кванза в 380 км на восток от столицы Луанды. В состав основных сооружений гидроузла входят глухая гравитационная плотина из укатанного бетона, высотой 110 м и длиной по гребню более 1200 м, четырехагрегатная гидроэлектростанция с установленной мощностью 520 МВт, поверхностный и глубинный водосбросы (рис. 1).

Гидроузел запроектирован в ОАО «Институт Гидропроект», его строительство осуществляется фирмой «OSEL» (филиал Бразильской строительной компании «Odebresh»), а поставки и монтаж гидромеханического оборудования выполняет «ВО ГУП «Технопромэкспорт».

Поверхностный плотинный водосброс (рис. а на цветной вкладке), имеющий четыре пролёта шириной по пятнадцать метров каждый, обеспечивает пропуск расхода до 8310 м³/с при отметке ФПУ 951,5 м. Регулирование осуществляется сегментными затворами. Во-

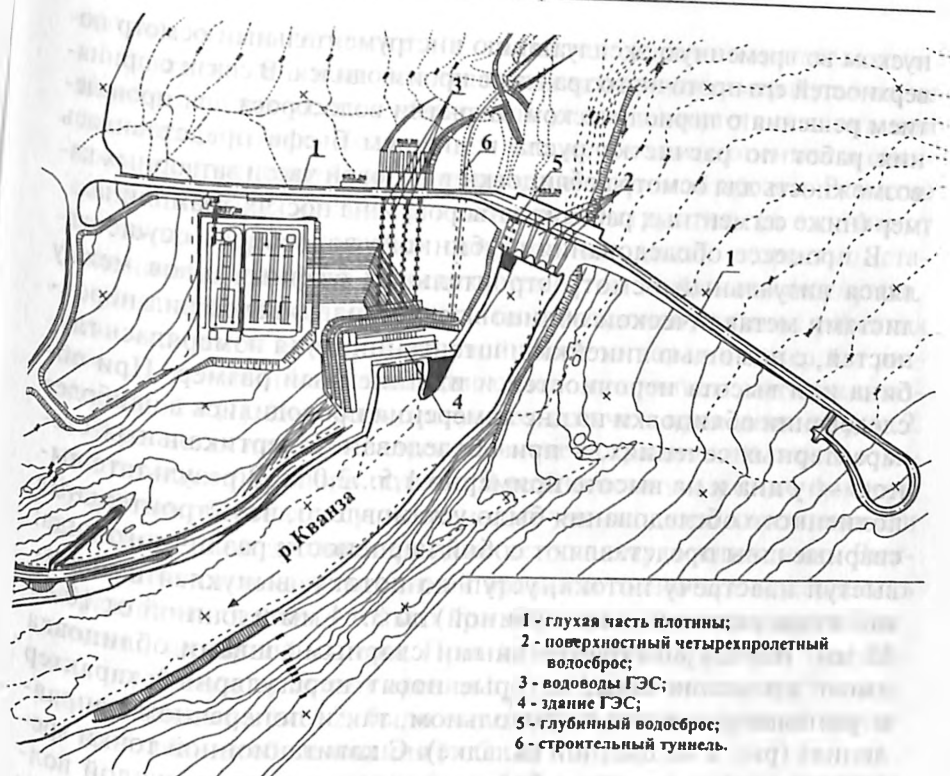


Рис. 1. План гидроузла Капанда

досброс выполнен в виде водослива практического профиля и имеет носки-трамплины в форме «ласточкиного хвоста», позволяющей организовать рассредоточенный отброс потока в яму гашения.

Расположенный в правобережной части плотины глубокий водосброс (рис. б на цветной вкладке), состоящий из двух ниток, имеет ключевое сечение перед рабочими сегментными затворами 2,8 x 3,6 м и рассчитан на пропуск максимального расхода 790 м³/с. В концевой части водосброса имеется плановый поворот проточного тракта и устроены цилиндрические носки-трамплины.

Для оценки качества выполнения работ и соответствия их проектным требованиям нами было выполнено натурное обследование турбинных водоводов ГЭС, металлической облицовки в нижней части затворных камер глубокого водосброса и бетонной водосливной поверхности паводкового плотинного водосброса.

После перекрытия строительного туннеля пропуск воды в створ гидроузла начал осуществляться через глубокий водосброс. Перед

пуском во временную эксплуатацию инструментальный осмотр поверхностей его проточного тракта не производился. В связи с принятием решения о периодическом закрытии водосброса для проведения работ по расчистке русла в нижнем бьефе представилась возможность для осмотра облицовки в низовой части затворных камер (ниже сегментных рабочих затворов) и на носках-трамплинах.

В процессе обследования глубинного водосброса осуществлялся визуальный осмотр строительных сварных швов между листами металлической облицовки, устанавливался вид неровностей, с помощью линейки и штангенциркуля измерялась глубина или высота неровностей и их линейный размер. При обследовании облицовки на дне измерения проводились в наиболее характерных сечениях, а при обследовании вертикальных стенок — у дна и на высоте примерно 1,5...2,0 м. В результате выполненного обследования было установлено, что строительные сварные швы представляют собой неровности различного вида: выступ навстречу потока, уступ по потоку, выпуклая и вогнутая волна высотой (или глубиной) до 3...4 мм и длиной от 10 до 35 мм. Наряду со строительными сварными швами облицовка имеет заводские швы, которые носят нерегулярный характер и располагаются как в продольном, так и поперечном направлениях (рис. а на цветной вкладке). С кавитационной точки зрения они представляют собой неровность в виде выпуклой волны высотой от 0 до 3 мм и шириной около 30 мм. Практически все сварные швы тщательно заглажены и в целом их параметры кавитации соответствуют параметру кавитации гладкой облицовки с равномерной естественной шероховатостью. В процессе обследования также было выявлено наличие на дне и боковых стенках облицовки ряда каверн механического происхождения (рис. б на цветной вкладке). Данные каверны, с большой степенью вероятности, будут являться наиболее интенсивными источниками кавитации и поэтому их было рекомендовано повсеместно заварить и тщательно зачистить. Установлено, что листы горизонтальной и вертикальной облицовки сварены между собой накладным угловым швом шириной порядка 20 мм (рис. в на цветной вкладке). По всей длине указанный шов является неоднородным и представляет собой чередование одиночных выступов высотой до 10 мм. Было рекомендовано зачистить данный шов с формированием гладкой фаски, по крайней мере, на участке от затвора до конца поворота водовода в плане, т.е. на участке, где происходит изменение направление движения

потока и его течение не является плоскопараллельным.

Известно, что в высоконапорных затворных камерах далеко не во всех случаях удастся обеспечить условия отсутствия кавитации при всех режимах. Поэтому для них необходимо оценивать опасность возникновения и развития кавитационной эрозии. Развитие кавитационной эрозии на стальных конструкциях (в отличие от бетонных) характеризуется относительно малой скоростью, стабильностью процесса и предсказуемостью конечного результата.

Для глубинного водосброса был выполнен прогноз развития кавитационной эрозии в низовой части затворных камер для различных источников кавитации с использованием методики, изложенной в [1]. Некоторые результаты расчета приведены на рис. 2.

В расчетах не учитывалось развитие пограничного слоя и аэрация пристенных слоев потока. В реальности указанные факторы будут способствовать существенному уменьшению интенсивности кавитационной эрозии или даже ее полному исключению. Выявить источники кавитационной эрозии и оценить интенсивность ее развития возможно только при выполнении регулярных обследований затворной камеры. Приняв в качестве критерия предельно допустимую величину эрозии $h_{эр пр} = 1$ мм и используя данные, приведенные на рис. 2, были определены рекомендуемые периоды выполнения обследования (табл. 1).

Таблица 1

Периодичность выполнения обследования затворной камеры глубинного водосброса

Отметка уровня воды в водохранилище, м	917	920	925	930	935	940	945	950	953,5
Время работы водовыпуска, ч	650	570	480	420	370	320	280	260	250

Рекомендации по периодичности выполнения обследований, приведенные в табл. 1, носят предварительный характер и впоследствии должны быть скорректированы по результатам осмотров. В случае обнаружения в затворной камере кавитационной эрозии необходимо будет выявить источники ее развития и разработать конкретные конструктивные мероприятия по её ликвидации.

Поверхность водослива плотинного водосброса изготовлена из монолитного бетона. В соответствии с проектом от оголовка (отметка $\nabla 935,5$ м) до отметки $\nabla 919,0$ м укладывался бетон класса В25 (М350), а ниже, включая носок-трамплин (отметка 887,67 м), — бетон класса В30 (М400). Значения пороговых ско-

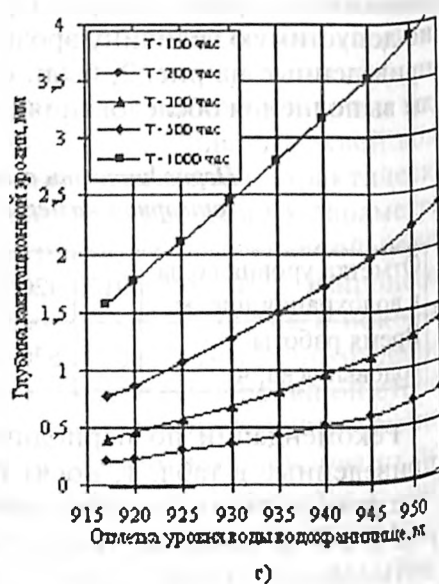
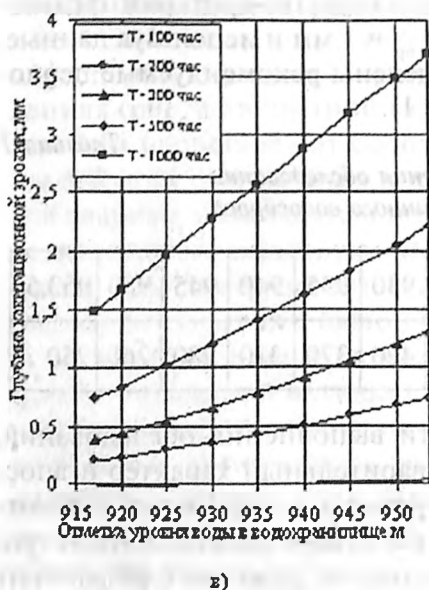
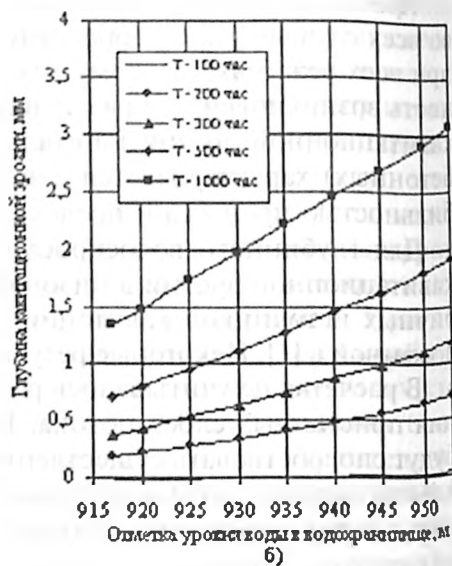
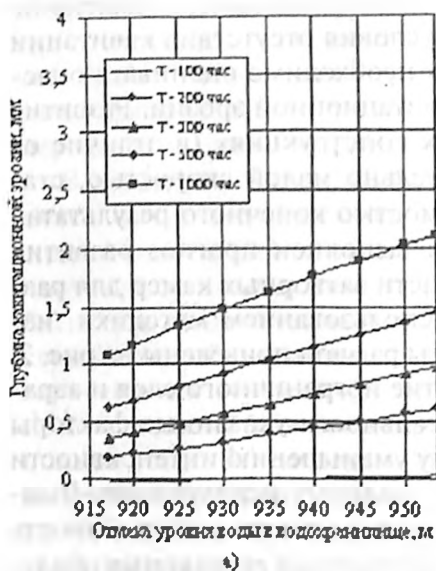


Рис. 2. Прогноз развития кавитационной эрозии в затворной камере ниже сегментного затвора в зависимости от продолжительности работы водоброса за выступом высотой: $z_{н} = 1$ мм (а), $z_{н} = 2$ мм (б), $z_{н} = 3$ мм (в), $z_{н} = 4$ мм (г)

ростей для указанных зон при отсутствии аэрации пристенного слоя соответственно равны $v_{\text{пор } B25} = 17,0$ м/с и $v_{\text{пор } B30} = 18,6$ м/с [2]. Из анализа кинематических характеристик потока на водосливе было установлено, что практически по всей его длине скорости течения превышают пороговые, достигая 34,3 м/с на носке, и, следовательно, здесь может развиваться кавитационная эрозия.

В технических требованиях на выполнение бетонных работ приведены высоты допустимых неровностей, заданные в зависимости от максимальных скоростей потока на различных участках водосливной поверхности. Отметки поверхности водослива, соответствующие этим скоростям, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Проектные требования к качеству бетонной поверхности

Наименование неровностей	Максимальная скорость потока, м/с					
	до 20		до 30		выше 30	
	Участок водосливной поверхности					
	выше $\nabla 927,0$ м		от $\nabla 927,0$ м до $\nabla 902,0$ м		ниже $\nabla 902,0$ м	
	Высота неровности z , мм	Уклон обработки неровности i	Высота неровности z , мм	Уклон обработки неровности i	Высота неровности z , мм	Уклон обработки неровности i
Поперечный выступ	до 3	1:5	до 3	1:10	до 2	1:15
Поперечный уступ	до 3	1:8	до 3	1:15	до 2	1:20
Продольный уступ	до 4	1:3	до 3	1:5	до 2	1:15
Изолированный выступ	до 5	-	до 3	-	до 2	-

Обследование плотинного водосброса проводилось в левом пролете в пределах водосливной грани от отметки $\nabla 926,0$ м до носка трамплина (отметка $\nabla 887,5$ м). Данный пролет был выбран как наиболее характерный по качеству выполнения бетонных работ. В процессе обследования и оценки соответствия качества водосливной поверхности проектным требованиям был выявлен ряд недостатков. Например, отклонение бетонной поверхности от пря-

мой линии на наклонном участке водослива достигает 18...22 мм при базовом расстоянии 2000 мм, а отклонение бетонной поверхности на носке водослива от лекала, выполненного по радиусу кривизны носка-трамплина, также достигает 20 мм на длине лекала 2000 мм (рис. а на цветной вкладке). В то время, согласно проекту, данные отклонения не должны превышать 4 мм. Практически вся водосливная грань ниже отметки $\nabla 926,0$ м примерно до отметки $\nabla 896,0...892,0$ м покрыта многочисленными потеками и наплывами бетона с высотами неровностей порядка 10...12 мм (рис. б на цветной вкладке). На водосливной грани присутствуют отдельные технологические неровности в виде приливов бетона, углублений, выступов и уступов с глубинами или высотами отдельных неровностей, достигающими 8...10 мм. Имеются многочисленные места заделки строительных швов и выпусков арматуры, которые заглажены, но не зачищены. На поверхности водослива образовался ряд трещин, причём трещины располагаются как в продольном, так и поперечном направлениях. В месте примыкания водосливной поверхности к боковым стенкам разделительных бычков имеются многочисленные наплывы из монолитного бетона, высота наплывов относительно водосливной поверхности составляют 30...40 мм, а местами даже 60 мм (рис. в на цветной вкладке). На некоторых участках, в месте сопряжения водосливной поверхности с разделительным бычком, отмечаются углубления, а сами разделительные бычки по всей боковой поверхности имеют неровности в виде выступов и уступов, образовавшихся за счет смещения опалубки. Размер смещения между блоками бетонирования достигает 12 мм. Боковая поверхность разделительных бычков имеет многочисленные каверны диаметром до 10 мм, образовавшиеся из-за защемления при бетонировании пузырьков воздуха.

Таким образом, после проведения обследования на грани водослива и боковых стенках разделительных бычков были выявлены следующие виды технологических неровностей: уступ по потоку; выступ по потоку; прилив на ровной поверхности; изолированный выступ; углубление на поверхности; каверна из-за защемления воздушных пузырьков. Основным размером, характеризующим неровность, является ее высота (или глубина) z_n , измеряемая по нормали к обтекаемой потоком поверхности. В табл. 3 приведены предельно допустимые размеры неровностей.

Для недопущения кавитационных разрушений все более крупные неровности, размеры которых превышают приведенные в

табл. 3, должны быть тщательно зачищены и обработаны до получения относительно гладкой поверхности, соответствующей равномернoзернистой шероховатости. Рекомендуемые схемы обработки неровностей на водосливной грани, боковых стенках и в месте их сопряжения показаны на рис. 3 и 4.

Таблица 3

Допустимые высоты технологических неровностей

Участок водосливной поверхности	выше $\nabla 927,0$ м	от $\nabla 927,0$ м до $\nabla 902,0$ м	ниже $\nabla 902,0$ м
Допустимая высота неровностей $z_{н}$, мм	5...10	до 3	до 2

При большой высоте все неровности срезаются в соответствии с приведенными схемами, а их поверхность затем шлифуется с применением специальных механизмов. При малой, но большей чем допустимая высота неровностей, выполняется только их шлифовка. Края мелких и широких впадин, без обнажения заполнителя, выравниваются под углом не более 10° к плоской поверхности. Крупные каверны разделяются с обнажением заполнителя, наполняются высокомарочным цементным раствором и гладко выравниваются. Отдельные каверны от пузырьков воздуха заполняются высокомарочным цементным раствором и затираются по поверхности.

Обработка неровностей должна осуществляться на всей ширине водослива и на боковых стенках в пределах глубины потока. Данные об изменении глубины потока по длине водослива, отсчитываемые по нормали от водосливной поверхности, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Изменение глубины потока по длине водослива

Отметка сечения на водосливной грани ∇ , м	935,25	930,0	926,0	920,0	915,0	910,0	905,0	900,0	895,0	890,0	887,5
Глубина потока, м	10,8	6,9	6,2	5,6	5,2	4,9	4,6	4,4	4,2	4,1	4,1

В ходе обследования было установлено, что в слое бетона, покрывающем водосливную поверхность плотины, образовались температурно-усадочные трещины, простирающиеся как в продольном, так и в поперечном направлениях. Сейчас эти трещины, как

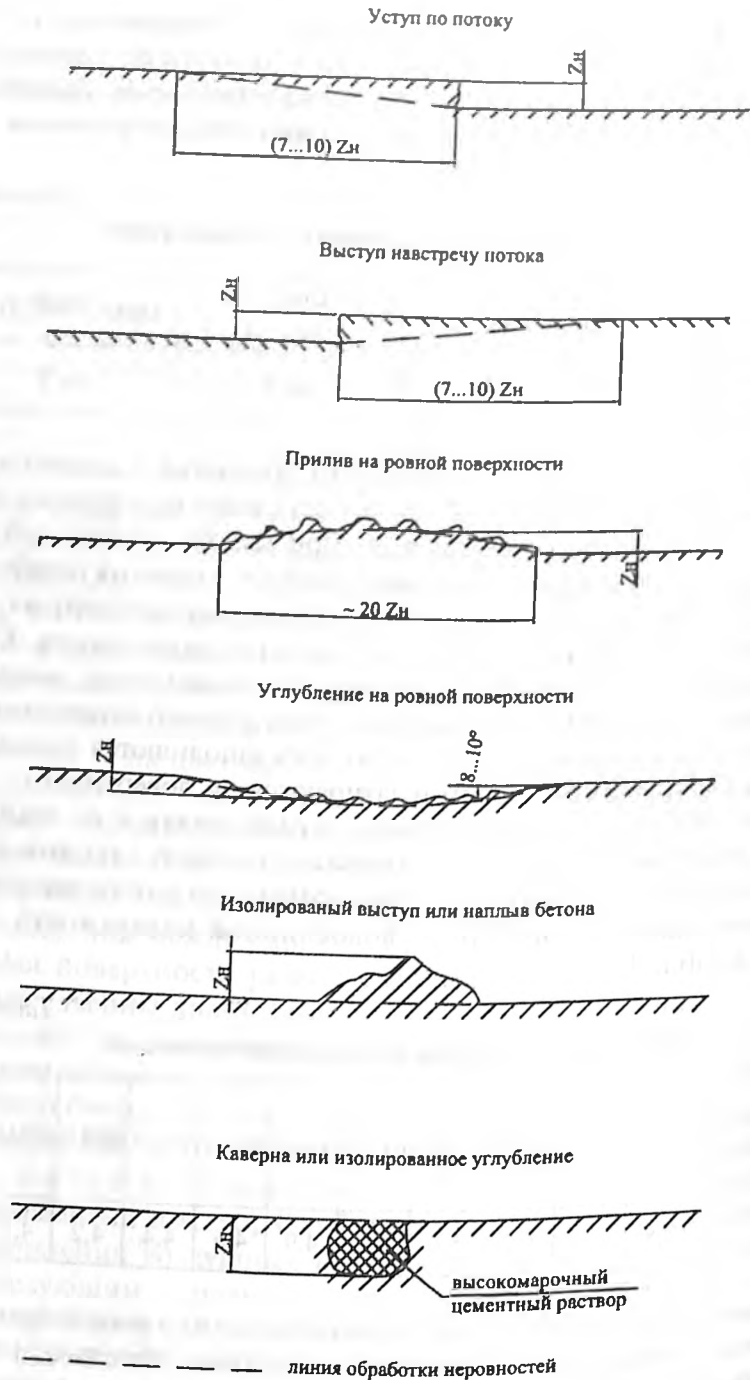


Рис. 3. Схема обработки неровностей на водосливной грани и боковых стенках разделительных бычков

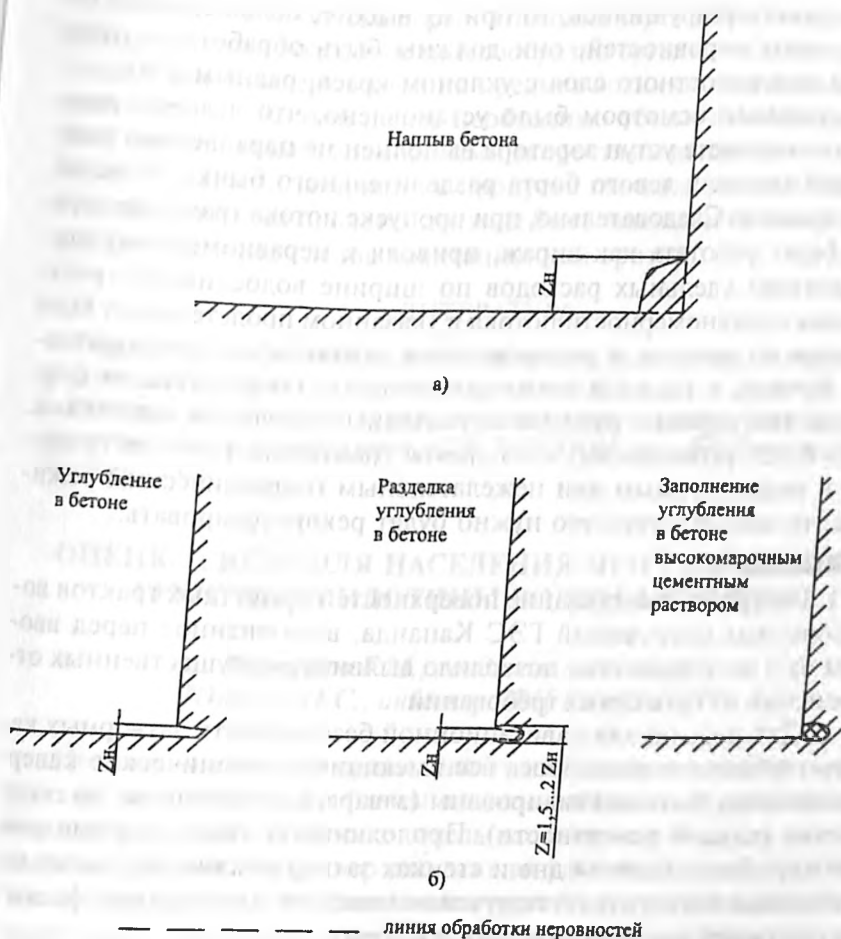


Рис. 4. Схема обработки неровностей в месте сопряжения водосливной грани и боковых стенок разделительных бычков: при наличии наплыва бетона (а) и углубления в бетоне (б)

правило, имеют ширину менее 1,5 мм, а их края не выходят за плоскость поверхности. При пропуске первого паводка они, по-видимому, не будут являться очагами кавитации. Однако за несколько лет работы водосброса края трещин под действием атмосферных факторов могут разрушаться и в этом случае на них могут возникнуть очаги кавитации. Данные трещины целесообразно залечить, и в дальнейшем, при эксплуатации водопропускного сооружения, должен осуществляться постоянный контроль за текущим состоянием бетонной поверхности. Если будет обнаружено, что участки

краёв трещин разрушились, то при их высоте, большей допустимой высоты неровностей, они должны быть обработаны путём снятия поверхностного слоя с уклоном краёв, равным 1:10.

Визуальным осмотром было установлено, что в левом водосбросном пролете уступ азратора выполнен не параллельно водосливной грани: у левого борта разделительного бычка он выше, чем у правого. Следовательно, при пропуске потока трамплин азратора будет работать как вираж, приводя к неравномерному распределению удельных расходов по ширине водосливной грани. Степень неравномерности потока в указанном пролете может быть оценена по данным о распределении глубин вдоль разделительных бычков, а также, в некоторой степени, по результатам формирования воронки размыва за указанным пролетом водосброса. Если будет установлено, что перекося трамплина азратора приводит к недопустимым или нежелательным гидравлическим режимам, то впоследствии его нужно будет реконструировать.

Выводы

1. Натурное обследование поверхностей проточных трактов водосбросных сооружений ГЭС Капанда, выполненное перед вводом их в эксплуатацию, позволило выявить ряд существенных отклонений от проектных требований.

2. Для повышения кавитационной безопасности затворных камер глубинного водосброса все имеющиеся механические каверны должны быть ликвидированы (заварены и зачищены до получения гладкой поверхности). Продольные угловые сварные швы между облицовкой на дне и стенках затворной камеры также необходимо зачистить до получения относительно гладкой фаски с допустимой высотой неровностей 1 мм.

3. В процессе эксплуатации глубинного водосброса требуется регулярно проводить обследования состояния облицовки в затворных камерах. Рекомендуемые периоды выполнения обследования приведены в табл. 1.

4. Бетонные поверхности водослива и боковые поверхности разделительных бычков имеют многочисленные дефекты, размеры которых превышают предельно допустимые, указанные в табл. 3. Для обеспечения безэрозионных условий пропуска паводка на поверхности водосливов и боковых стенках разделительных бычков в пределах глубины потока обязательно должны быть выполнены специальные работы, направленные на ликвидацию или сглаживание неровностей. Рекомендуемые схемы обработки неровностей показаны на рис. 3 и 4.

5. В период пропуска первого паводка через эксплуатационный поверхностный водосброс целесообразно организовать испытания водосливных поверхностей на предмет возникновения кавитационной эрозии. С этой целью необходимо обеспечить пропуск потока с максимально возможными скоростями движения в течение 80...100 ч. После завершения пропуска паводка водосливные поверхности во всех пролетах должны быть тщательно осмотрены на предмет наличия следов кавитационной эрозии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гидравлические** расчеты водосбросных гидротехнических сооружений. Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. **Рекомендации** по учету кавитации при проектировании водосбросных гидротехнических сооружений. ПЗ8-75/ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. Л.: Энергия, 1976.

ОЦЕНКА РИСКА ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ ВОДОХРАНИЛИЩА

*Нигметов Г.М., кандидат техн. наук,
Юзбеков Н.С., инженер (ФЦ ВНИИ ГОЧС)*

Несмотря на то что в прошедшие годы у нас в стране было много сделано по решению проблемы защиты населения от наводнений, суммарный ущерб экономике отдельных регионов страны с течением лет не уменьшается, а нередко даже возрастает. Это связано с тем, что темпы освоения затопляемых территорий существенно опережают темпы реализации защитных противопаводковых мероприятий.

На территории России эксплуатируются более 30 тыс. водохранилищ и несколько сотен накопителей промышленных стоков и отходов [1]. Многие из них эксплуатируются без реконструкции и ремонта дольше расчетного периода времени, что создает опасность возникновения аварийных ситуаций.

Аварийные разрушения грунтовых плотин могут привести к катастрофическому затоплению обширных территорий, разрушению населенных пунктов и промышленных предприятий, гибели людей, прекращению подачи электроэнергии в энергетические системы, выходу из строя коммуникаций и других элементов инфраструктуры, уничтожению посевов и гибели скота, выводу из хозяйственного оборота сельскохозяйственных угодий, уничтожению материальных, культурных и исторических ценностей [2].

Прорыв плотины гидротехнического сооружения (ГТС) в мирное время может произойти в результате: природных воздействий (землетрясений, ураганов, обвалов, оползней); конструктивных дефектов; нарушения норм и правил проектирования, строительства и эксплуатации; воздействия паводков; разрушения основания; недостаточной пропускной способности водосбросов; потери прочности, устойчивости; больших осадок, воздействия фильтрующей воды, суффозии, а также террористических актов и т.п., а в военное время — в результате воздействия средств поражения [3].

За период с 1902 по 1977 гг. из 300 аварий в различных странах в 35% случаев причиной аварий было превышение расчетного максимального сбросного расхода, т.е. перелив воды через гребень плотины [4].

Так, на гидроузле Мачху II (Индия) с плотиной высотой 60 м поверхностный водосброс был рассчитан на пропуск 6000 м³/с. В паводок, расход которого достигал почти 14000 м³/с, не удалось открыть 3 из 18 затворов водосброса. Разрушение плотины привело к затоплению расположенных ниже по течению г. Морви 68 деревень. Погибло около 2000 человек [4].

Тяжелая авария, вызванная заклиниванием сегментных затворов водосброса, произошла в 1994 г. на Тирлянкой грунтовой плотине на Урале [4]. При переполнении водохранилища перелив воды через гребень плотины высотой 9,85 м привел к ее разрушению. Был затоплен ряд населенных пунктов в нижнем бьефе, погибло 22 человека.

От прорыва плотины в июне 1993 г. Киселевского водохранилища на р. Каква в Свердловской области пострадало 6,5 тыс. человек, из них 12 человек погибли, местонахождение 8 не было установлено, 43 человека было госпитализировано. В зону затопления попало 1772 дома.

В последние годы угрозу нормальному функционированию гидроузлов создают военные действия и террористические акты в зонах этно-социальных конфликтов. Одно из самых последних подтверждений этого — реальная опасность разрушения Дубоссарской ГЭС в период конфликта в Приднестровье, когда во время ракетно-артиллерийского обстрела была повреждена турбина ГЭС и создалась угроза затопления 60 населенных пунктов левобережья Днестра. Существовала угроза разрушения Нурекской ГЭС войсками оппозиции в Таджикистане. Были повреждены небольшие плотины в Нагорном Карабахе и т.д.

В январе 1993 г., впервые после окончания второй мировой войны, была предпринята попытка разрушить напорный фронт крупного гидроузла: взорваны заряды на плотине ГЭС Перуча на р. Це-

тина в Республике Хорватия. Всего на плотине Перуча было произведено 5 взрывов: в головной части поверхностного водосброса, в левобережном и правобережном примыканиях и в центральной части плотины при расположении зарядов в инспекционной галерее. Оперативное открытие регулирующего затвора донного водовыпуска позволило резко сбросить уровень воды в водохранилище и тем самым существенно снизить статическую нагрузку на плотину, предотвратив возможное её разрушение. Изложенные обстоятельства, наряду с самоотверженной работой аварийно-ремонтной бригады по ликвидации последствий взрыва, позволили предотвратить затопление густонаселенного региона с населением около 60 тыс. человек, а также разрушение ГЭС Перуча мощностью 41,6 МВт и расположенной в 20 км ниже по течению р. Цетина ГЭС Дале мощностью 40 МВт. Кроме того, большая часть грунтового материала плотины объемом 874000 м³ была бы вынесена в Адриатическое море, что привело бы к катастрофическому нарушению экологических условий прилегающего курортного побережья.

Вышеописанные примеры показывают, какую особую остроту приобретает проблема оценки риска для населения и территорий в зоне возможного динамического воздействия волны прорыва, образующегося при разрушении грунтовых плотин водохранилищ или аварийном сбросе воды из водохранилища при их переполнении.

Риск тесно связан с расходами на строительство: чем меньше риск, принятый при проектировании, тем будет дороже конструкция. Допускаемый риск определяется на основе статистических данных и зависит от условий и срока эксплуатации конструкции, а также от её назначения или степени ответственности. Метод вычисления риска основан на общих теоремах теории вероятности, однако в понятие риска вкладывается более обширный круг вопросов — этим риск существенно отличается от вероятности.

В качестве поражающих факторов при расчете последствий разрушения грунтовой плотины принимаются: высота волны прорыва; максимальная скорость волны прорыва; площадь и длительность затопления; давление гидравлического потока, которые вызывают основные разрушения и поражения.

Риск, определяемый как вероятность смертельного исхода или потери здоровья населения при разрушении грунтовой плотины, определяется по формуле [5]:

$$R_c = \sum_i^n P_{pn} \cdot M(N), \quad (1)$$

где $P_{рп}$ — вероятность разрушения грунтовой плотины; n — количество зон, характеризующих гидравлическим давлением потока во фронте волны прорыва; $M(N)$ — математическое ожидание потерь населения при условии, что плотина разрушена.

Математическое ожидание потерь населения от разрушения грунтовой плотины вычисляется по формуле:

$$M(N) = \sum_i^n (P_{р.зд} \cdot P_{в.зд} \cdot N_{зд} + P_{о.м} \cdot N_{о.м}), \quad (2)$$

$P_{р.зд}$ — вероятность разрушения зданий, находящихся в зоне возможного катастрофического затопления при разрушении грунтовой плотины; $P_{в.зд}$ — вероятность потерь населения при разрушении грунтовой плотины, находящегося в зданиях; $N_{зд}$ — количество населения, находящегося в зданиях различных конструктивных решений, попадающих в зону возможного затопления; $P_{о.м}$ — вероятность потерь населения, находящегося на открытой местности, при разрушении грунтовой плотины; $N_{о.м}$ — количество населения, находящегося на открытой местности на момент разрушения грунтовой плотины.

Оценка степени повреждения грунтовой плотины производится на основе сравнения проектных (нормативных) значений динамических параметров грунтовой плотины с экспериментально полученными значениями. Одним из основных динамических параметров для сравнения является период собственных колебаний плотины.

Анализ известных методов расчета периода собственных колебаний показывает, что для расчета необходимо, в первую очередь, знать геометрические, массовые и физико-механические параметры тела плотины.

Геосейсмические параметры плотины, необходимые для расчета нормативного значения периода собственных колебаний (плотность материала тела плотины — ρ , динамический модуль сдвига — G_d , динамический модуль упругости — E_d), упругие и физико-механические характеристики грунтов предлагается получать методом инженерной сейсморазведки — корреляционным методом преломленных волн (КМПВ).

Физико-механические свойства грунтов (ρ , G_d , E_d) определяются по корреляционным зависимостям через продольную V_p и поперечную V_s скорости распространения волны в грунтах:

$$\rho = (V_p + 7,85)/5, \text{ г/см}^3; \quad (3)$$

$$G_d = V_s^2 \rho, \text{ МПа}; \quad (4)$$

$$E_d = 2V_s^2 \rho (1 + \mu), \text{ МПа}. \quad (5)$$

Фактическое значение периода собственных колебаний получается путем измерения сейсмовибрационным комплексом «Струна-2», позволяющим определить динамические параметры тела плотины в заранее выбранных 10 трехкомпонентных точках.

В результате обработки полученных сейсмограмм получаются спектры колебаний по первому и более высоким тонам, по которым определяются периоды собственных колебаний плотины.

Сравнивая проектное значение периода собственных колебаний с экспериментальным, можно определить степень износа и вероятность разрушения грунтовой плотины.

Вероятность разрушения зданий $P_{р.зд}$ определяется сравнением динамических нагрузок, действующих на здания на момент разрушения грунтовой плотины, т.е. фактической динамической нагрузки $\Delta P_{ф.зд}$ с максимальными расчетными нагрузками, вызывающими выход из строя зданий $\Delta P_{ф.зд}$ с учетом обобщенного показателя устойчивости зданий $U_{зд}$, которым определяется состояние зданий при воздействии волны прорыва. Фактическая динамическая нагрузка $\Delta P_{ф}$ определяется, исходя из средних значений скорости и высоты волны прорыва, определяемых по программе расчета параметров волны прорыва в рассматриваемом створе.

Риск для населения определяем по пяти зонам катастрофического затопления в зависимости от значений поражающих факторов волны прорыва и распределения людей в рассматриваемой зоне.

Первая зона примыкает непосредственно к ГТС и простирается примерно до 12 км от ГТС. Скорость течения в волне прорыва очень велика и составляет 30 км/ч и более. Время прохождения волны прорыва примерно 30 мин. Вторая зона, протяженностью до 20 км, характеризуется скоростью течения в пределах от 10 до 20 км/ч. Время прохождения волны прорыва в среднем 50 ... 60 мин. В третьей зоне скорость течения в волне прорыва составляет 10 ... 15 км/ч. Ее протяженность — до 40 ... 50 км. Время прохождения волны 1,5 ... 3,0 часа. Четвертая зона — зона относительно слабого течения. Скорость течения здесь может достигать 5-й степени завися от рельефа местности, по которой распространяется волна прорыва. В среднем протяженность зоны может составлять примерно до 70 ... 80 км. Пятая зона — зона слабого течения, характеризуется скоростью течения 3 ... 5 км/ч, протяженностью более 90 км и временем прохождения волны прорыва более 4 ч.

В жилой застройке ночью находится около 89% городского и порядка 87% сельского населения. В среднем ночью в зданиях будет находиться примерно 88% населения, соответственно на от-

крытой местности около 12%. Днем в зданиях находится примерно 34,8% сельского и 32,6% городского населения. В среднем в зданиях будет находиться порядка 33,7% населения, соответственно, на открытой местности около 66,3%.

Вероятность потерь населения определяется из соотношения количества общих потерь (n) к общему количеству людей (N), находящихся в зданиях или на открытой местности. Количество общих потерь составляет: ночью — в зданиях 97%, днем — 95%, на открытой местности ночью — 90% от общего количества населения, днем — 60%.

Оценка потерь населения при прорыве плотин осуществляется по формуле (2) по пяти зонам катастрофического затопления нижнего бьефа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абчук В.А. Теория риска в мировой практике. Л.: Судостроение. 1983.
2. Владимиров В.А. Катастрофы конца XX века. М.: Изд.УРСС. 1998.
3. Барабанова Е.А. Причины повреждения плотин гидроузлов как фактор риска и их последствия для населения //Изв. РАН. Сер. геогр. 1994. № 6.
4. Асарин А.Е., Семенов В. М. Расчетные паводки и безопасность плотин //Гидротехническое строительство. 1992. № 8.
5. Ларионов В.И. Теоретические основы реагирования на ЧС. Прогнозирование ЧС. Механика разрушения. М.: изд.ВИУ. 1999.

ПРОТИВОПАВОДКОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЮМАГУЗИНСКОГО ГИДРОУЗЛА

*Баранов А.Е., инженер (ОАО «Институт Гидропроект»)
Куприянов В.П., Ошипченко Г.Ф., кандидаты техн. наук
(ОАО «НИИЭС»)*

В среднем течении р. Белой на территории Республики Башкортостан начиная с 70-х годов прошлого столетия сложилась чрезвычайно неблагоприятная обстановка в период прохождения половодий. По данным многолетних наблюдений, пойма реки Белой затопляется практически ежегодно на протяжении от 1 до 29 суток. За последние годы наиболее высокие половодья наблюдались в 1979 и 1990 г. В эти годы затоплению различной степени подверглись семь районов Республики. Полностью было затоплено 40 населенных пунктов и частично четыре крупных города: Мелеуз, Салават, Ишимбай и Стерлитамак. Под водой оказались 6 тыс.

домов, было разрушено более 360 км автодорог, 21 мост, 70 объектов коммунального хозяйства, 100 км линий электропередач и связи. Кроме того наводнения унесли жизни 12 человек [1].

По данным республиканской противопаводковой комиссии расчетный ущерб от затопления городов, населенных пунктов и объектов экономики в отдельные годы достигал 3,5 млрд. руб. (в ценах 1991 г.), а общий ущерб только за последнее десятилетие составил более 10 млрд. руб. (рис. 1).



Рис. 1. Зависимость размера ущерба от величины максимального расхода половодья, проходящего в среднем течении р. Белой

Схема формирования паводка в указанном районе показана на рис. 2. При этом в соответствии с нормативными требованиями [2] за расчетный был принят максимальный расход с вероятностью превышения 1%. Установлено, что в замыкающем створе у г. Стерлитамак паводковый расход может достигать 5010 м³/с. Анализ максимального стока реки и ее притоков показал, что примерно половина стока формируется в верховьях реки Белой, а другая половина — за счет боковой приточности. К настоящему времени регулирование стока в регионе осуществляется только на правом притоке — р. Нугуш. Здесь в 1967 году было построено Нугушское водохранилище, полная емкость которого составляет 400 млн. м³. Однако доля регулирования стока на данном гидроузле в целом невысока. За счет аккумуляции он позволяет уменьшить сбросной расход с 1160 м³/с до 960 м³/с.

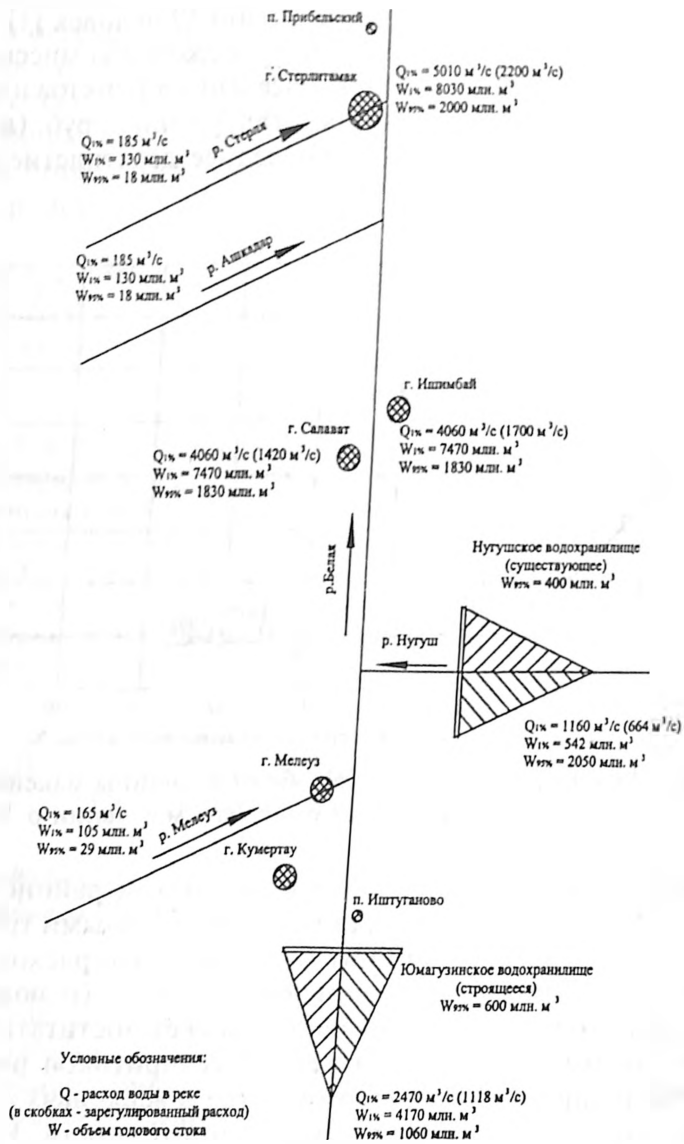


Рис. 2. Схема формирования весеннего половодья в среднем течении р. Белой

Дополнительное регулирование стока, поступающего в реку, можно было организовать только в верховьях р. Белой, где она протекает в горной долине. Здесь был выбран подходящий створ и намечено возвести Юмагузинский гидроузел. Регулирование левобережной боковой приточности оказалось невозможным из-за отсутствия достаточных емкостей для создания аккумулирующих водохранилищ. Стало очевидным, что только одним регулированием р. Белой в ее верхнем течении невозможно обеспечить полную защиту нижерасположенных территорий от затопления. Необходимо также осуществить строительство защитных дамб и сооружений на пойменных территориях в защищаемых районах.

Разработкой противопаводковых мероприятий в рассматриваемом регионе занимался ряд проектных организаций, среди которых «Институт Южгипроводхоз», ООО ПКФ «ПРОМИВХ», ОАО «Институт Гидропроект». При решении задач по инженерной защите было рассмотрено около тридцати вариантов противопаводковых схем. После их всестороннего анализа окончательно была принята следующая схема, для реализации которой необходимо осуществить ряд мероприятий:

- строительство регулирующего Юмагузинского водохранилища на р. Белой в верхнем ее течении с полной емкостью 809,0 млн. м³;
- реконструкцию входного оголовка паводкового берегового водосброса Нугушского гидроузла, заключающуюся в понижении входного порога в двух центральных пролетах. При этом за счет более глубокой предпаводковой сработки водохранилища и последующей аккумуляции части стока сбросной расход может быть уменьшен до 664 м³/с;

- строительство на р. Белой двух вододелителей облегченной конструкции и обводных русл с дамбами обвалования в районе городов Салават и Стерлитамак;

- строительство защитных дамб на левом берегу р. Белой в районах городов Мелеуз, Салават, Ишимбай и Стерлитамак.

Для выбора основных гидрологических параметров была решена задача по минимизации затрат по противопаводковой защите в целом по среднему течению р. Белой. С этой целью были определены зависимости стоимости регулирующего водохранилища от значения срезаемого расхода и стоимости русловых защитных сооружений. Установлено, что при выполнении противопаводковых мероприятий минимум суммарных затрат будет при срезке паводкового расхода с ежегодной вероятностью превышения 1% до 2200 м³/с в створе г. Стерлитамак [1]. Таким образом, выполнение отмечен-

ных мероприятий позволит осуществлять срезку максимального расчетного паводка на 56%. Основная роль в процессе трансформации паводкового стока отводится Юмагузинскому гидроузлу.

Участок створа Юмагузинского гидроузла выбран в первую очередь из условий незатопления пахотных земель и населенных пунктов и минимального негативного воздействия на окружающую среду.

Наивысший уровень воды в Юмагузинском водохранилище (ФПУ) принят на отметке 270,0 м. Его значение определилось в том числе из условия ненанесения ущерба Каповой пещере, расположенной в верховьях бассейна р.Белой и являющейся охраняемым природным памятником. При этом уровне водохранилище гидроузла имеет максимальный объем 809 млн. м³ и площадь 42,2 км². Чаша водохранилища на всем своем протяжении расположена в межгорном каньоне, сложенном из прочных скальных пород.

В состав основных сооружений гидроузла входят (рис. 3): каменно-земляная плотина; береговой паводковый водосброс; туннельный донный водосброс-водоотпуск; здание ГЭС.

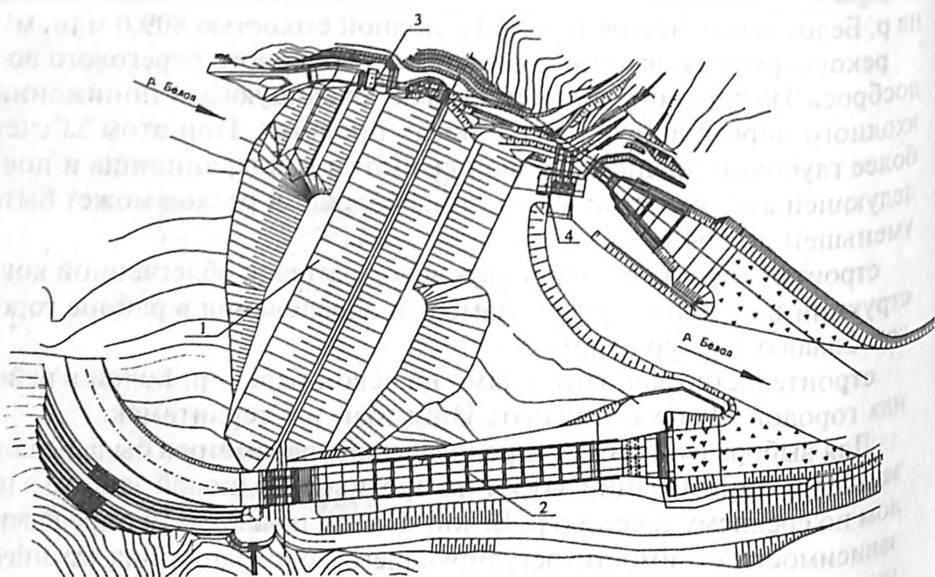


Рис. 3. План основных сооружений Юмагузинского гидроузла:
 1 — каменно-земляная плотина; 2 — береговой паводковый водосброс;
 3 — туннельный донный водосброс-водоотпуск; 4 — здание ГЭС

Каменно-земляная плотина длиной по гребню 540 м и максимальной высотой 65 м образует большую часть напорного фронта гидроузла. Плотина имеет распластанный поперечный профиль, определяемый в значительной мере инженерно-геологическими условиями основания. Противофильтрационным элементом плотины является вертикальное центрально-расположенное ядро.

Паводковый водосброс располагается на правом берегу и выполнен в виде быстротока. В его состав входят подводящий канал, проложенный в скальной выемке, четырехпролетный входной оголовок, лоток быстротока с искусственной шероховатостью, расширяющийся водобойный колодец с рисбермой и отводящим каналом. Береговой водосброс рассчитан на пропуск паводковых расходов до 2530 м³/с.

Туннельный донный водосброс-водоотпуск предназначен для осуществления регулируемого выпуска воды из водохранилища в нижний бьеф, а также для подачи воды из туннеля на турбины ГЭС по трем водоводам. Он состоит из подводящих каналов и закрытого водовода, башенного входного оголовка, туннеля корытообразного сечения, пролегающего в скальном массиве левого берега, выходного оголовка с двухпролетной затворной камерой и расширяющегося водобойного колодца с монолитной и гибкой рисбермой и отводящим каналом. Через донный водосброс-водоотпуск может быть пропущен расход до 1470 м³/с.

Здание ГЭС располагается у низовой грани откоса каменно-земляной плотины на левом берегу реки. В нем установлено три агрегата мощностью по 15 МВт каждый.

Строительство Юмагузинского гидроузла было начато в 1998 году. По состоянию на 1 октября 2002 г. освоено 3,3 млрд. рублей в ценах текущего года, что составляет 40% от сметной стоимости строительства.

Компоновочные решения по гидроузлу и конструкции всех водопропускных сооружений были обоснованы в процессе выполнения комплексных лабораторных исследований. С этой целью в ОАО «НИИЭС» была построена пространственная гидравлическая модель в масштабе 1:80. В ходе выполнения исследований на модели последовательно воспроизводились все этапы строительства, что позволяло оперативно учитывать изменения, происходящие в створе гидроузла, и вносить соответствующие корректировки при проектировании сооружений. Кроме того, более детальные исследования берегового водосброса выполнялись в Волгоградском филиале ОАО «НИИЭС» на фрагментной модели в масштабе 1:80.

Учитывая незначительный, по сравнению с объемом половодья редкой повторяемости, регулирующий объем Юмагузинского водохранилища в ОАО «Институт Гидропроект» были разработаны специальные правила пропуска максимальных расходов через створ гидроузла. В соответствии с рабочим проектом ГЭС, основные положения этих правил сводятся к следующему [3]:

основной задачей регулирования стока р. Белой Юмагузинским водохранилищем является ограничение расхода в створе г. Стерлитамака значением 2200 м³/с. Для достижения этой цели в периоды прохождения максимумов половодий на нерегулируемых притоках сбросы на Юмагузинском и Нугушском гидроузлах уменьшаются до необходимых величин за счет их аккумулирующей способности;

режим работы Юмагузинского водохранилища назначается с учетом прогноза объема предстоящего половодья текущего года по состоянию снеготазпасов на начало марта и уточняется в конце марта;

приточные расходы к створу гидроузла и боковой приточности от гидроузла до г. Стерлитамак прогнозируются на одни сутки вперед. Для этого организуется специальная сеть гидрологических наблюдений на основных притоках, впадающих в р. Белую ниже Юмагузинского гидроузла;

при прогнозе объема половодья, меньшем 2600 млн. м³, год считается маловодным, и гидроузел работает в режиме нормальной эксплуатации;

при прогнозе объема половодья, большем 2600 млн. м³, уровень водохранилища срабатывается до отметки мертвого объема 225,0 м. Приточные расходы пропускаются в нижний бьеф через туннельный водосброс-водовыпуск при остановленной ГЭС, поднятой сороудерживающей решетке и полностью открытых затворах. После достижения в водохранилище отметки 253,0 м регулирование сброса осуществляется затворами правобережного поверхностного водосброса с учетом краткосрочных прогнозов стока по притокам р. Белой и сбросов из Нугушского водохранилища. В крайне высокие половодья (при вероятности менее 1%) условие ограничения расхода $Q = 2200$ м³/с у г. Стерлитамака соблюдается до тех пор, пока уровень воды в водохранилище не достигнет отметки 265,0 м. Превышение указанной отметки допускается только при использовании полной пропускной способности обоих водосбросных сооружений гидроузла.

Принятые правила были проверены на моделях гидрографов реальных многоводных годов. Расчеты показали, что в половодье вероятностью превышения 1% Юмагузинское водохранилище гарантированно будет осуществлять срезку естественного притока

к створу г. Стерлитамак до требуемых 2200 м³/с. При этом уровень воды в водохранилище не будет превышать отметку 264,7 м, что более чем на 5,0 м ниже отметки ФПУ. Даже в случае пропуска экстремально высокого половодья вероятностью превышения 0,01% с гарантированной поправкой Юмагузинский гидроузел при совместном регулировании стока с Нугушским водохранилищем позволит осуществлять срезку естественного стока р. Белой в створе г. Стерлитамак до 2200 м³/с в течении 3...7 сут. При этом появляется возможность заблаговременного оповещения населения и соответствующих республиканских организаций о возможном наводнении в долине среднего течения реки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Технико-экономическое обоснование** строительства Юмагузинского гидроузла на р.Белой в республике Башкортостан. Общая пояснительная записка //ООО ПКФ «ПРОМИВХ». г. Ростов-на-Дону. 2000.
2. **СНиП 2.06.15-85.** Инженерная защита территории от затоплений и подтоплений. М: Госстрой СССР. 1986.
3. **Рабочий проект** здания ГЭС и ОРУ 110 кВ Юмагузинского гидроузла. Утверждаемая часть. Общая пояснительная записка //ОАО «Институт Гидропроект». г. Москва. 2000.

ОБОСНОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СХЕМЫ ПРОПУСКА ПАВОДКОВ ЧЕРЕЗ ВОЛЖСКУЮ (ВОЛГОГРАДСКУЮ) ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЮ

*Мажбиц Г.Л., кандидат техн. наук,
Буланов Е.П., инженер (ОАО «НИИЭС»)*

В процессе эксплуатации водопропускных сооружений крупнейшей в Европе Волгоградской ГЭС возникла необходимость изменения проектной схемы маневрирования затворами водосливной плотины и напорных водосбросов здания гидростанции совмещенного типа при пропуске ежегодных паводков. По проектной схеме маневрирования, после полного включения всех 22 гидроагрегатов и достижения сбросного расхода, превышающего 16,5 тыс м³/с, включаются последовательно 27 отверстий водосливной плотины с открытием затворов на 2 м, затем — 44 водосброса в здании ГЭС, открытые на 1 м, затем, поочередно, — снова отверстия плотины и водосбросы здания ГЭС. Такая схема пропуски паводков оказалась весьма затруднительной и неэффек-

тивной. Кроме того, в процессе 35-летней эксплуатации гидроузла произошло общее понижение уровней в нижнем бьефе, значительно превышающее проектные предпосылки. Все это и привело к необходимости разработать новую схему пропуска паводков с максимально поздним включением напорных водосбросов.

Компоновка основных сооружений гидроузла представлена на рис. 1. Русло Волги перекрыто земляной плотиной, состоящей из трех участков общей длиной 2350 м. Здание ГЭС совмещенного типа состоит из 22 агрегатных блоков, в каждом из которых симметрично относительно оси гидроагрегатов располагаются по два водовода донных напорных водосбросов. С нижнего бьефа здания ГЭС донные водосбросы перекрыты 88 рабочими затворами, маневрирование которыми осуществляется двумя кранами. Общая длина здания ГЭС по фронту (с монтажной площадкой) — 736 м. Слева к зданию гидроэлектростанции вплотную примыкает бетонная водосливная плотина, имеющая 27 пролетов по 20 м в свету каждый и напором на гребне 9,3 м. Максимальный напор гидроузла — 27 м, расчетный по мощности — 20 м.

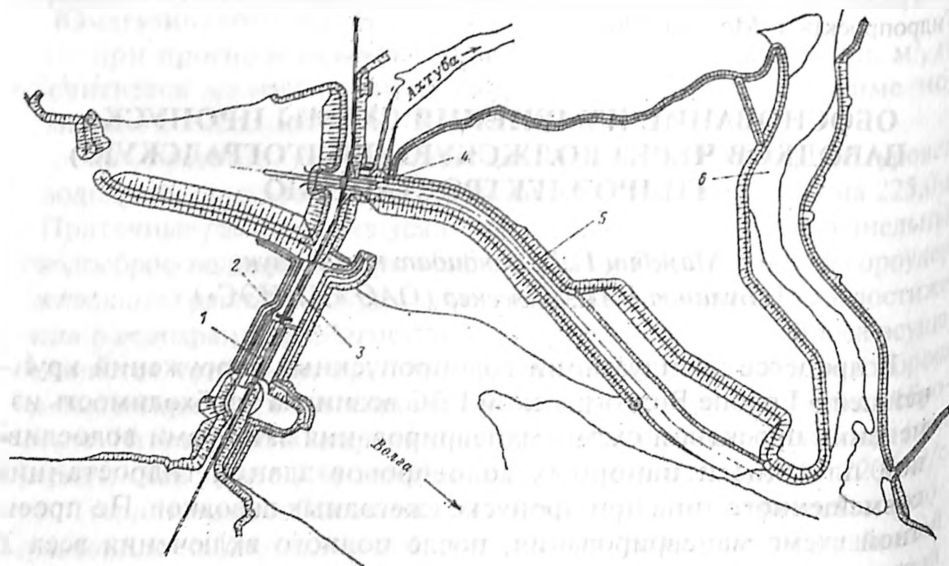


Рис. 1. Волжская гидроэлектростанция на р. Волге. Общий план. 1 — здание ГЭС; 2 — рыбоподъемник; 3 — водосливная плотина; 4 — шлюзы; 5 — нижний подходной канал; 6 — Волго-Ахтубинский канал

Суммарная пропускная способность основных сооружений при нормальном подпорном уровне (НПУ) в водохранилище составляет 63 тыс. м³/с, в том числе через гидроагрегаты 16,5 тыс. м³/с, водосливную плотину 31 тыс. м³/с, донные водосбросы здания ГЭС 15,5 тыс. м³/с.

Эксплуатационная схема пропуска паводков проектом гидроузла была ориентирована на наиболее благоприятный режим нижнего бьефа гидростанции и возможно полное использование эффекта эжекции для увеличения мощности гидроагрегатов. В соответствии с проектом [3] был предусмотрен ряд требований и ограничений к маневрированию затворами водосливной плотины и водосбросов здания ГЭС:

затворы плотины и водосбросов начинают поднимать после полной загрузки всех гидроагрегатов и достижения в верхнем бьефе НПУ;

включение в работу напорных водосбросов здания ГЭС обеспечивает подъем уровня воды в нижнем бьефе, необходимый для затопления гидравлического прыжка на водобое водосливной плотины;

оптимальные гидравлические условия в нижнем бьефе достигаются за счет максимально равномерного сброса воды по общему фронту здания ГЭС и водосливной плотины в следующей очередности:

- 1 — гидроагрегаты;
- 2 — водосливная плотина с открытием пролетов до 2 м;
- 3 — водосбросы здания ГЭС с открытием отверстий на 1 м;
- 4 — водосливная плотина (открытие 3 м);
- 5 — водосбросы здания ГЭС (открытие 1,5 м);
- 6 — водосливная плотина (открытие 4 м и полностью через один пролет),
- 7 — водосбросы здания ГЭС (открытие 2 м);
- 8 — водосливная плотина (полное открытие);
- 9 — водосбросы здания ГЭС (полное открытие).

Опыт эксплуатации показал, что включение в работу водосбросов здания ГЭС весьма затруднительно из-за малой маневренности подъемных механизмов и несовершенной конструкции затворов и их уплотнений, а также малоэффективно для увеличения мощности гидроагрегатов за счет эффекта эжекции. К тому же при работе этих водосбросов имеет место значительная вибрация здания гидростанции. Исходя из этого, целесообразно использовать водосбросы здания ГЭС после того, как исчерпана пропускная способность гидроагрегатов и водосливной плотины.

Максимальные суточные расходы паводков с момента ввода гидроузла в эксплуатацию ежегодно составляют, как правило, 26 ... 28 тыс. м³/с, а наибольшие — 34,5 тыс. м³/с — имели место

в 1979 году. Судя по этим данным, при пропуске таких расходов вполне можно обойтись без включения водосбросов здания ГЭС.

Помимо изложенного выше, имеется еще одна причина пересмотра условий пропуска расхода паводка через гидроузлы: понижение уровней р. Волги в нижнем бьефе гидростанции, связанное с общими размывами (из-за задержания наносов водохранилищем), превысило проектные предпосылки. Нарушение естественного гидрологического режима, вызванное строительством и эксплуатацией подпорных речных гидроузлов, как известно, является причиной изменения руслового процесса в их нижнем бьефе. В естественных условиях на реке преобладают обратимые деформации русла, обусловленные транзитным транспортом наносов. Создание водохранилища приводит к тому, что значительная часть наносов осаждается в нем, и в нижний бьеф вода поступает значительно осветленной. При этом в русле начинают развиваться односторонние деформации, в которых преобладает общий размыв. Следствием трансформации русла ниже гидроузла является изменение уровенного режима реки. Эти изменения характеризуются понижением кривой связи расходов и уровней $Q = f(H)$ относительно положения ее к моменту пуска гидроузла. Сооружение ГЭС существенно повлияло на изменение темпов и направленности русловых деформаций на участке Волго-Ахтубинской поймы от Волгограда до дельты (450 км ниже гидроузла). Регулирование стока обусловило его значительное внутригодовое перераспределение: 42 % в половодье в современных условиях вместо 52%. Сток взвешенных наносов сократился с 13,6 млн. т/год до 7,3 млн. т/год, средняя мутность уменьшилась с 58 г/м³ до 32 г/м³; среднемесячные расходы взвешенных наносов во время половодья уменьшились на 15% и существенно возросли в период межени [1].

Наибольшие вертикальные русловые деформации отмечены на участке, непосредственно примыкающем к створу плотины. Так, согласно исследованиям, опубликованным в [2], до строительства Волжской ГЭС зона аккумуляции располагалась на участке: от 150 км выше створа гидроузла до 350 км ниже створа гидроузла. Здесь за период с 1938 г. по 1958 г. пришлось повысить на 50–70 см отметки проектного судоходного уровня из-за повышения на такие же величины отметок дна.

Проектное понижение уровней нижнего бьефа Волжской ГЭС, связанное с общими размывами русла, было принято с некоторым запасом и должно было составить после двадцати лет эксплу-

атации при больших расходах 20 см, при малых расходах 30 см, а после пятидесяти лет — соответственно 30 см и 40 см [3]. Согласно данным, изложенным в [4], за первые 10 лет эксплуатации Волжской ГЭС (т.е. к 1970 г.) понижение уровней ниже гидроузла тогда составляло 0,4 м при расходе 8000 м³/сек, что почти вдвое превышает проектные предположения. В период 1971–1978 гг. отмечалась относительная стабилизация УНБ. Это может быть связано с многолетними колебаниями (уменьшением в этот период) стока Волги [5] и наполнением водохранилища. Наш анализ показал, что понижение УНБ для расходов до 10000 м³/с к 1998 г. уже достигло 1,55 – 1,27 м, что более чем в три раза превосходит проектные предположения (рис. 2). Для расходов выше 10000 м³/с понижение УНБ постепенно уменьшается и составляет не более 0,20 – 0,30 м при расходах порядка 30000 м³/с. Более интенсивное понижение УНБ при расходах, меньших 10000 м³/с, объясняется их большей повторяемостью. Особо следует отметить, что стабилизации уровней не наблюдается ни для меженных, ни для паводковых расходов.

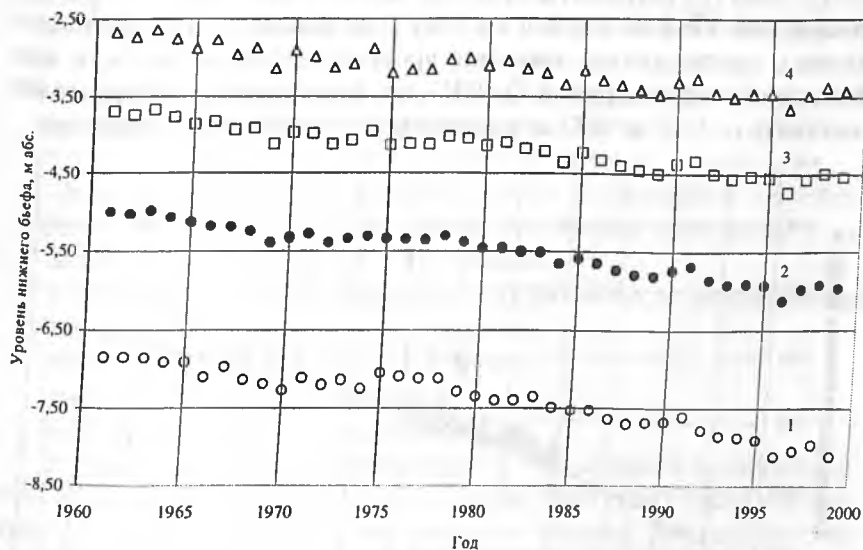


Рис. 2. Понижение уровней в нижнем бьефе Волжской ГЭС при различных расходах:
 1 — 10000 м³/с; 2 — 15000 м³/с; 3 — 20000 м³/с; 4 — 25000 м³/с

Прогноз дальнейшего понижения УНБ был сделан на основании статистической модели процесса для периода летней межени.

Данные натуральных наблюдений — среднесуточные расходы и уровни июля ... октября 1962 г. ... 1998 г. — аппроксимировались по логарифмической кривой вида:

$$H = A1 \times \ln(Q) + A2,$$

где H — уровень, м; Q — расход, м³/с; $A1$ и $A2$ — эмпирические коэффициенты.

Закономерности изменения коэффициентов $A1$ и $A2$ в выше-приведенной зависимости $Q = f(H)$ были определены методами регрессионного анализа, а оценка точности прогнозов — в соответствии с методикой, принятой в гидрологии [6]. В частности, верными оказались 26% проверочных прогнозов, удовлетворительными — 60% и неудовлетворительными — 14%, что позволило считать предложенную методику прогноза меженных уровней приемлемой. В связи с тем, что регрессионная модель не учитывает физической сущности явления, прогноз по предложенной методике может составляться на период 3-5 лет, после чего регрессионная модель должна корректироваться. По предложенной методике был составлен прогноз положения кривой связи для 1999 ... 2003 гг.; результаты прогноза приведены на рис. 3. Прогноз понижения УНБ на период до 2003 г. показывает, что предположение о продолжении снижения уровней подтверждается, и возможное снижение кривой $Q=f(H)$ для меженных расходов может составить от 0,16 до 0,45 м в зависимости от величины сбросов.

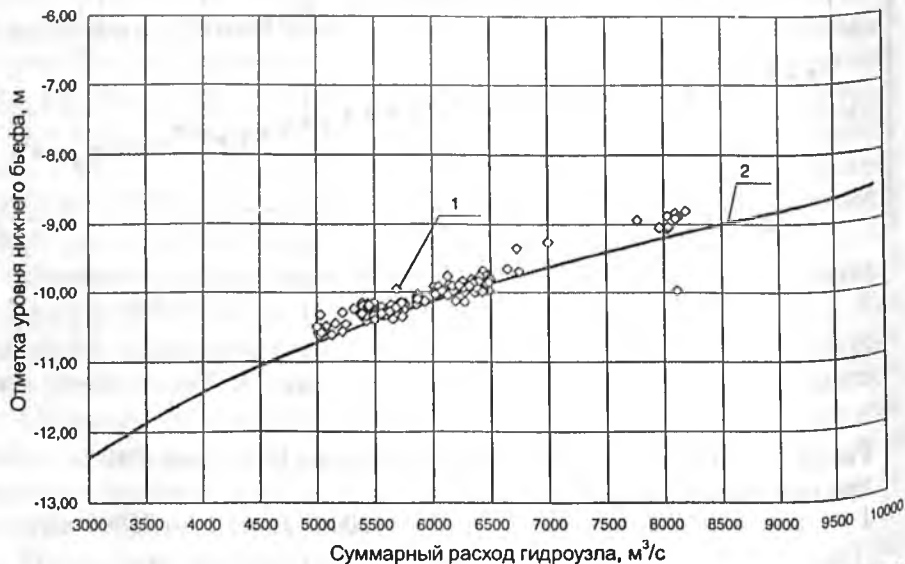


Рис. 3. Прогноз положения кривой связи расходов и уровней в нижнем бьефе Волжской ГЭС на 2001 г.: 1 — результаты натуральных наблюдений; 2 — прогноз.

На основании такого исследования была получена современная кривая связи расходов и уровней в нижнем бьефе гидроузла, показанная на рис. 4 в сравнении с кривой, принятой при проектировании гидроузла.

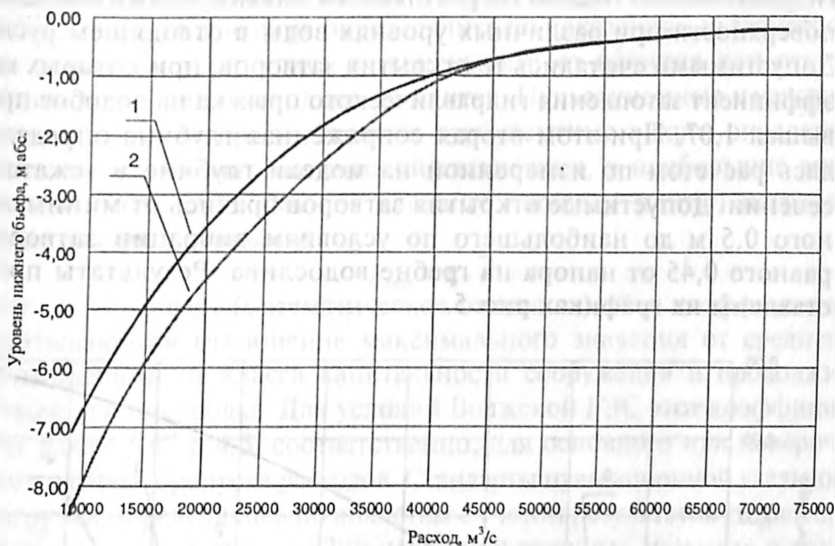


Рис. 4. Кривая связи расходов и уровней в нижнем бьефе Волжской ГЭС 1 — проектная, 1961 г.; 2 — фактическая, 2000 г

Допустимые условия в нижнем бьефе водосливной плотины и здания ГЭС назначались, исходя из следующих критериев:

- затопление гидравлического прыжка,
- устойчивость плит водобоя при гидродинамическом воздействии,
- устойчивость водосливной плотины,
- отсутствие кавитации на гасителях,
- отсутствие вибрации затворов,
- местные размывы за рисбермой.

Для расчетно-экспериментального обоснования количественных показателей перечисленных выше критериев были построены две фрагментные гидравлические модели. Моделирование осуществлялось по критерию Фруда. Модель водосбросной плотины в масштабе 1:70 включала 6 пролетов плотины с участком верхнего бьефа, водобоем, рисбермой, ковшом и участком отводящего русла. В таком же масштабе была выполнена модель здания гидроэлектростанции из 4 агрегатных блоков с 8 водосбросами. На обеих моделях фиксировались расходы, уровни

и скорости, пьезометрическое давление на водобой плотины и здания ГЭС, а также на поверхности водосбросов.

Допустимые открытия затворов водосливной плотины по условиям затопления гидравлического прыжка определялись на гидравлической модели по результатам нивелировки свободной поверхности при различных уровнях воды в отводящем русле. Допустимыми считались те открытия затворов, при которых коэффициент затопления гидравлического прыжка на водобое превышал 1,07. При этом вторая сопряженная глубина определялась расчетом по измеренной на модели глубине в «сжатом» сечении. Допустимые открытия затворов брались от минимального 0,5 м до наибольшего по условиям вибрации затворов, равного 0,45 от напора на гребне водослива. Результаты представлены на графиках рис. 5.

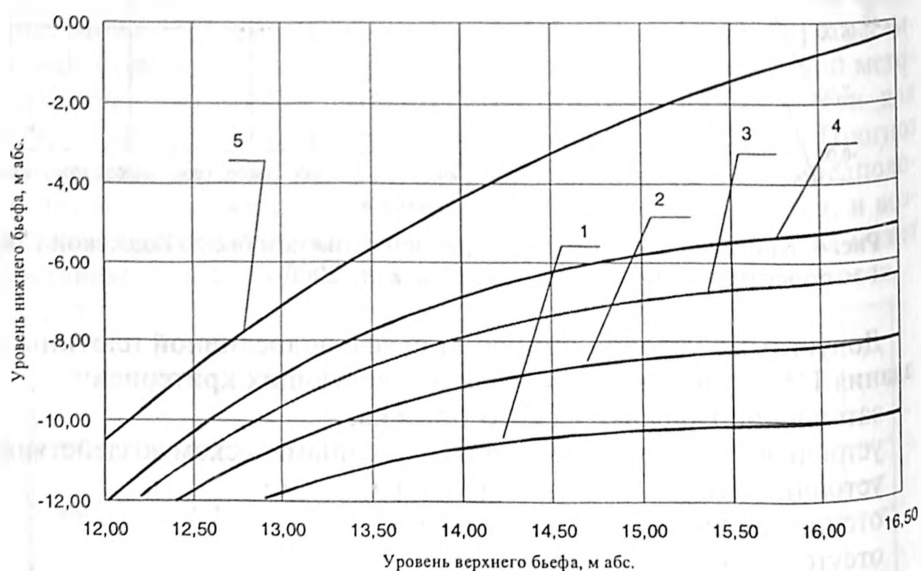


Рис. 5. Минимально допустимые уровни в нижнем бьефе Волжской ГЭС по условиям затопления гидравлического прыжка на водобое водосливной плотины: 1, 2, 3, 4 — открытие затворов, м; 5 — полное открытие затворов

Допустимые режимы, исходя из критерия обеспечения устойчивости плит водобоя и рисбермы, определялись по методике, согласно которой требуемая толщина плит крепления определяется из условия квазистатического приложения пульсационной нагрузки, так как частота собственных колебаний плит значительно

больше частот нагрузок. В соответствии с этой методикой полная гидродинамическая нагрузка (сила и момент) для расчета плиты на устойчивость против всплытия или опрокидывания определяется как сумма статического дефицита давления на плиту и нагрузки, определяемой пульсацией давления. Величины статического дефицита давления определялись по показаниям пьезометров на модели и уточнялись в зависимости от наличия или отсутствия дренажных колодцев на плитах. Пульсационные нагрузки, источником которых являются турбулентные вихри, определялись методами математической статистики, а наибольшие значения этих удельных (на единицу площади плиты) нагрузок принимались равными:

$$P_{\max} = K \cdot \bar{P}$$

где: \bar{P} — стандарт (математическое ожидание), K — коэффициент, учитывающий отклонение максимального значения от среднего и зависящий от класса капитальности сооружения и продолжительности половодья. Для условий Волжской ГЭС этот коэффициент равен 5,67 и 4,5, соответственно, для основного или поверочного случаев пропуска расходов. Стандарты пульсационной удельной нагрузки определялись по аналогам с учетом результатов гидравлического моделирования. При известной толщине, размерах и конструкции плит водобоя в результате расчетов установлено, что по данному критерию следует учитывать лишь случаи с полным открытием водосливных отверстий. В графическом виде ограничения по условию устойчивости плит крепления показаны на рис. 6.

При проведении гидравлических исследований в обосновании проекта Волжской ГЭС (1960 г.) обеспечению бескавитационной работы шашечных гасителей на водобое водосливной плотины уделялось достаточно много внимания. На основании лабораторных исследований была получена эмпирическая зависимость, по которой определяется минимальная глубина над поверхностью гасителей в зависимости от величины расхода водослива. С учетом понижения уровней воды в нижнем бьефе по этой зависимости были определены допустимые режимы пропуска паводков, исходя из условия недопущения кавитации гасителей. Как и в случае оценки устойчивости плит, при частичных открытиях водосливных отверстий граница начала кавитации лежит ниже реально возможных уровней воды в нижнем бьефе (рис. 6).

Что касается соблюдения таких условий, как устойчивость водосливной плотины и размывы за концевым креплением рисбер-

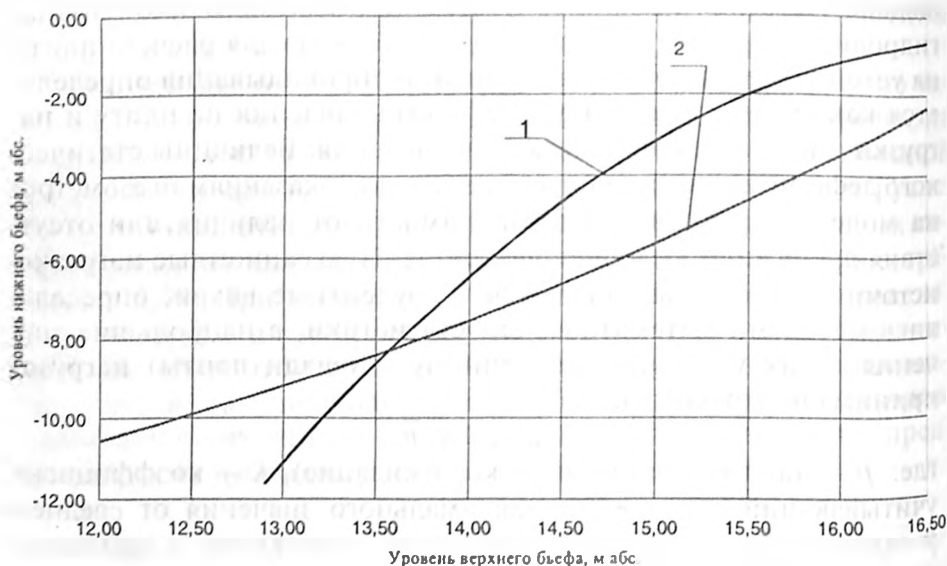


Рис. 6. Минимально допустимые уровни в нижнем бьефе Волжской ГЭС по условиям устойчивости плит водобоя водосливной плотины (1) и отсутствия кавитации шашечных гасителей (2)

мы, то они практически не изменяются при изменении схемы маневрирования затворами, если в целом соблюдается максимально равномерное распределение удельных расходов по водосливному фронту каждого сооружения.

Аналогичные исследования для водосбросов здания ГЭС показали, что при уровнях нижнего бьефа, соответствующих включению напорных водосбросов, обеспечиваются благоприятные гидравлические условия на водобое здания ГЭС и устойчивая работа гидротурбин. При этом малосущественно работает или не работает (например, находится в ремонте) гидроагрегат в блоке с открытыми водосбросами.

На основании проведенных исследований была разработана оптимальная схема пропуска паводков через гидроузел, учитывающая как опыт эксплуатации, так и изменившиеся гидрологические условия в нижнем бьефе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коротяев В.Н., Иванов В.В. Русловые деформации на нижней Волге. Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2000. №6.
2. Маккавеев Н.И. Эрозионно-аккумулятивные процессы и рельеф русла реки. Избранные труды. М.: изд-во МГУ. 1998.

3. Технический отчет о проектировании и строительстве Волжской ГЭС имени XXII съезда КПСС, том 1. М.: Энергия. 1965.
4. Векслер А.Б., Доненберг В.М. Переформирование русла в нижних бьефах крупных гидроэлектростанций. М.: Энергоатомиздат. 1983.
5. Саруханиян Э.И., Смирнов Н.П. Многолетние колебания стока Волги. Л.: Гидрометеиздат. 1971.
6. Наставление по службе прогнозов. Разд. 3, часть. 1. Л.: Гидрометеиздат. 1962.

ЗАЩИТА ОТ НАВОДНЕНИЙ САМОРЕГУЛИРУЮЩИМИСЯ ПЛОТИНАМИ

*Колосов М.А., доктор техн. наук
(Санкт-Петербургский государственный университет
водных коммуникаций)*

Последствия наводнений в бассейнах рек Ставрополя и Краснодарского края, а также на реках Дальнего Востока требуют разработки новых систем инженерной защиты.

Обычно в инженерной практике для защиты от наводнений используется обвалование, включающее устройство водозащитных дамб, ограждающих защищаемую территорию, а также систему дренажа для сбора фильтрующих вод и их отвода.

Обвалование требует сооружения дамб большой протяженности, а поэтому для защиты обычно выбирают только наиболее уязвимые объекты (населенные пункты, промпредприятия и т.д.). Сельскохозяйственные угодья остаются, как правило, без защиты, что приводит к большим экономическим потерям, особенно во время летних дождевых паводков. Кроме того, надежность дамб обвалования довольно низка. Практика эксплуатации показывает, что при наводнениях высока вероятность их прорыва. Причина таких явлений заключается в недостаточном контроле за состоянием дамб, как правило, из-за отсутствия специальных служб наблюдений. В результате происходит размыв гребня дамбы и откосов ливневыми осадками, зарастание их деревьями и кустарниками, образование в теле дамб нор грызунами. При довольно редких наводнениях наблюдения за дамбами и ремонт их повреждений не производится, так что в случае возникновения неожиданных наводнений велика вероятность их прорыва.

Другой способ защиты — сооружение крупных водохранилищ, аккумулирующих ливневой сток во время паводка и использующих запасы воды для хозяйственных целей (орошение земель, выработ-

ка электроэнергии и т.д.). Способ широко распространен, однако недостатки его общеизвестны. Водохранилище гидроузла затопливает большие площади, строительство и эксплуатация высокой плотины требует больших затрат и значительных сроков возведения. Кроме того, этот метод не эффективен на малых реках.

Довольно распространенный способ — это сооружение системы плотин малой высоты, образующих временные водохранилища только в период паводка. Такие плотины (рис. 1) возводят как на притоках реки, так и в сухих оврагах, которые могут быть водотоком при выпадении осадков. Количество плотин и объем водохранилищ рассчитываются исходя из задержания объема паводкового стока и постепенного его сброса в русло реки в течение послепаводкового периода.

Объем такого водохранилища определяется площадью водосбора и модулем паводкового стока. Место плотины и водохранилища определяется исходя из минимальных затрат на возведение плотины, а ложе временного водохранилища должно располагаться на землях, допускающих кратковременное затопление без разрушения почвы и растительности. Такими участками земли могут быть зоны кустарников, пастбищ, сенокосных угодий, на которых закончена уборка сена с вывозом его в сенохранилища. Допускается использование под водохранилища и пахотных земель, оставленных под озимые посевы.

Особые требования предъявляются к плотинам. Каждая плотина должна быть не только экономичной в строительстве, но и обеспечивать регулирование сброса воды, задерживая основной паводковый сток. Пропуск заданного «дозированного» расхода воды из водохранилища через плотину должен производиться без какого-либо вмешательства человека.

Для уменьшения стоимости плотину следует строить из местных материалов (грунт, камень). Для сброса заданного безопасного расхода воды через плотину обычно используют трубчатые водосбросы. Известно эффективное использование сифонных водосбросов (р. Верхний Рейн, Германия). При использовании трубчатых водосбросов в противопаводковых плотинах главной проблемой является защита входного оголовка труб от засорения. Наблюдение показывает, что основной причиной засорения оголовков труб является плавающая древесина в виде крон деревьев и кустарников вместе с корневой системой. Появление их характерно в период прохождения максимального расхода воды, когда происходит подмыв берегов и падение деревьев в реку. Так как к этому времени водохранилище уже

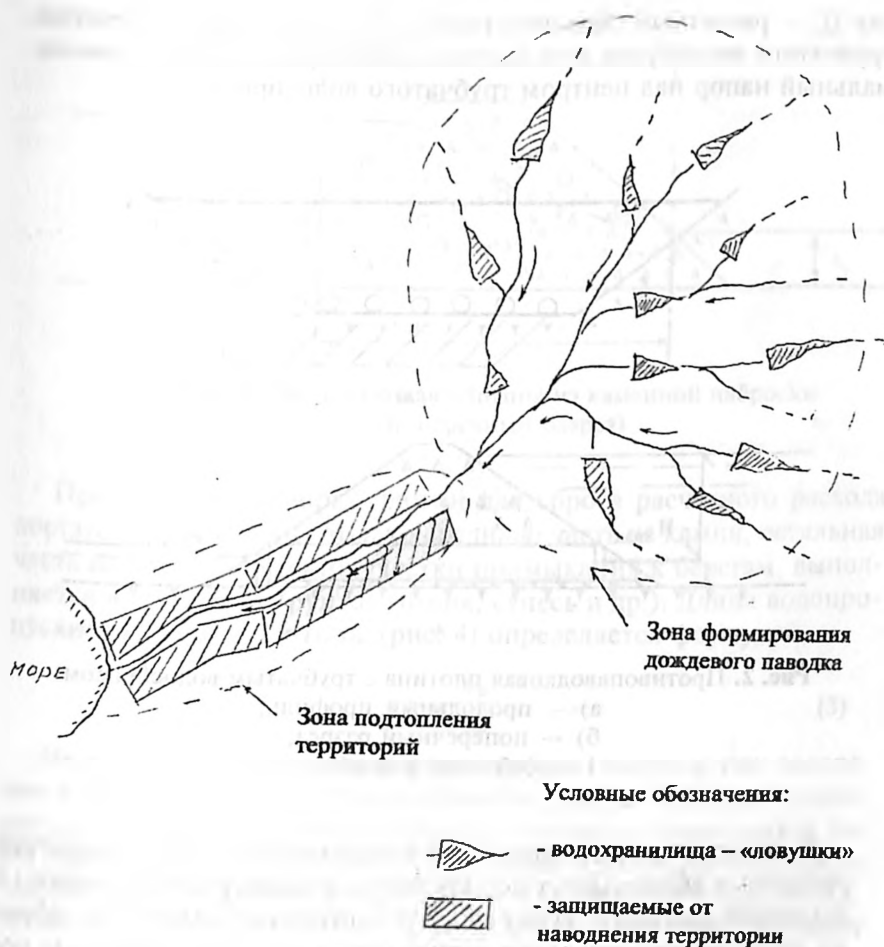


Рис. 1. Схема расположения водохранилищ-«ловушек»

заполнено, то задержание плавающего мусора происходит у гребня плотины, а засорение оголовка может происходить только в ходе подныривания плавающей древесины.

Чтобы уменьшить подныривание, желательно выполнить несколько донных отверстий, рассредоточенных по фронту плотины (рис. 2).

Необходимая площадь сечения отверстий определяется исходя из расчетного безопасного сбросного расхода по известной формуле

$$\omega = \frac{Q_p}{\mu \sqrt{2gH_{\max}}} \quad (1)$$

где Q_p — расчетный сбросной расход; μ — коэффициент расхода трубчатого водосброса или системы водосбросов; H_{\max} — максимальный напор над центром трубчатого водосброса.

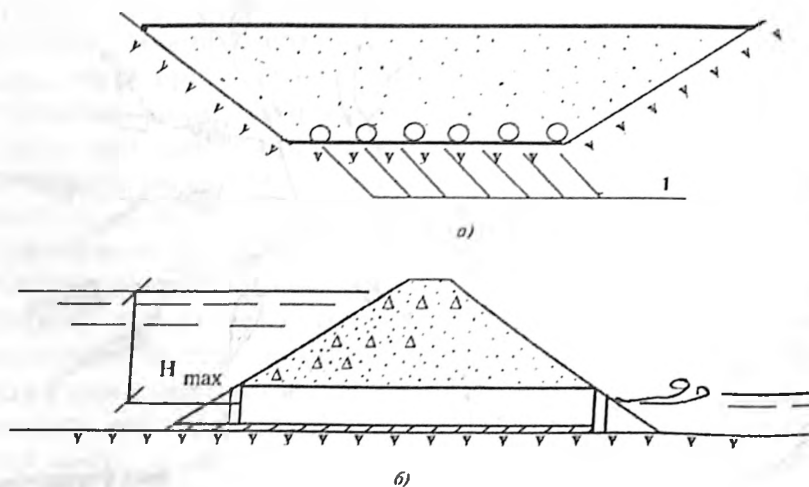


Рис. 2. Противопаводковая плотина с трубчатым водосбросом:
 а) — продольный профиль;
 б) — поперечный разрез;
 1 — трубчатый водосброс

В качестве средства временного удержания воды и саморегулирующегося сброса могут использоваться фильтрующие насыпи из каменной наброски. Известно, что плотина из каменной наброски является фильтрующим элементом, при этом фильтрация подчиняется турбулентному закону.

Исследования Н.П. Пузыревского [1] позволили получить экспериментальную формулу для расчета турбулентной фильтрации через насыпи из каменной наброски (рис. 3):

$$\left(\frac{q_{\phi}}{K}\right)^2 = \frac{(h_1^3 - h_2^3)}{3S}, \quad (2)$$

где q_{ϕ} — удельный фильтрационный расход; K — коэффициент, зависящий от размеров камня; h_1 — глубина в верхнем бьефе перед насыпью; h_2 — глубина в нижнем бьефе; S — длина фильтрационной зоны в насыпи.

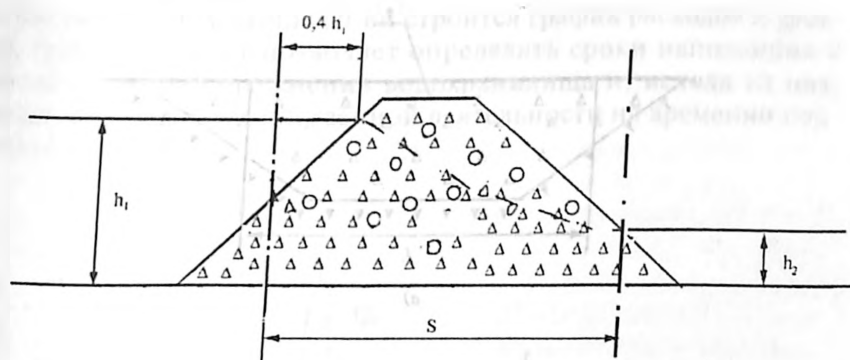


Рис. 3. Фильтрующая плотина из каменной наброски (поперечный разрез)

При длинных створах плотин для сброса расчетного расхода достаточно выполнить только среднюю часть из камня, остальная часть плотины, а именно участки примыкания к берегам, выполняется из обычных грунтов (песок, супесь и др.). Длина водопропускного участка плотины (рис. 4) определяется формулой:

$$L = \frac{Q_p}{q_{\phi}} \quad (3)$$

На случай перелива воды через гребень плотины при засорении верхового откоса водопропускного участка плотины и перенаполнении водохранилища сброс допускается производить через гребень плотины. Для этого в пределах зоны водопропускного участка гребень плотины понижается, пониженная горизонтальная часть гребня, а также часть верхового откоса и весь низовой откос закрепляются камнем.

Для расчета продолжительности наполнения и опорожнения водохранилища необходимо иметь следующие данные:

календарный график бытовых расходов, поступающих в водохранилище $Q_6 = f(t)$;

график зависимости объема проектируемого водохранилища от уровня воды $W = f(H_1)$;

зависимость значений сбросного расхода, поступающего через трубчатые водосбросы плотины или его фильтрующую зону, от уровня воды в водохранилище $Q_p = f(H_1)$.

Расчет ведется в следующей последовательности:

1. График $Q_6 = f(t)$ разбивается на равные временные проме-

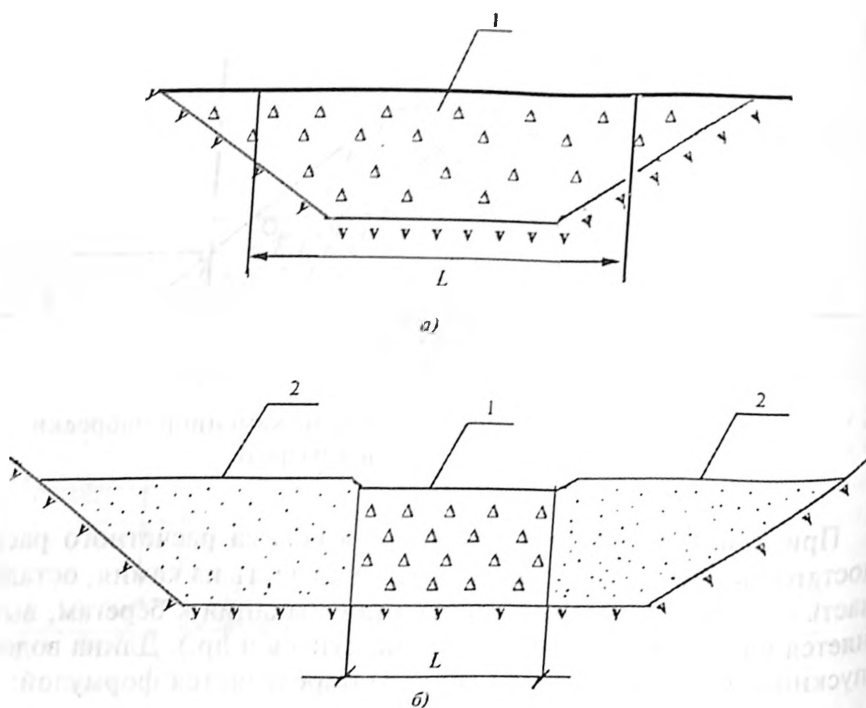


Рис. 4. Фильтрующие насыпи:

- а) — плотина из каменной наброски;
 б) — комбинированная плотина (грунт — камень);
 1 — каменная насыпь; 2 — грунтовая насыпь

жутки Δt_i . За каждый временной промежуток Δt определяется приток воды в водохранилище по формуле

$$\Delta W_i = \frac{Q_{бi} + Q_{б(i+1)}}{2} \Delta t, \quad (4)$$

где $Q_{бi}$ — расход воды, m^3/c , поступающий в водохранилище в начале временного промежутка Δt_i ; $Q_{б(i+1)}$ — расход воды, m^3/c , поступающий в водохранилище в конце временного промежутка Δt_i ; Δt — продолжительность временного промежутка, сек.

2. По графику $W = f(H)$ определяется приращение уровня воды в водохранилище и устанавливается уровень воды H_i в конце промежутка Δt_i .

3. По графику $Q_p = f(H)$ определяется зарегулированный сбросной расход при уровне H_i , а затем аналогично по формуле (4) определяется объем сброса.

По результатам вычислений строится график расходов и уровней (рис. 5). Расчет позволяет определять сроки наполнения и последующего опорожнения водохранилища и, исходя из них, составлять планы хозяйственной деятельности на временно подтопленных землях.

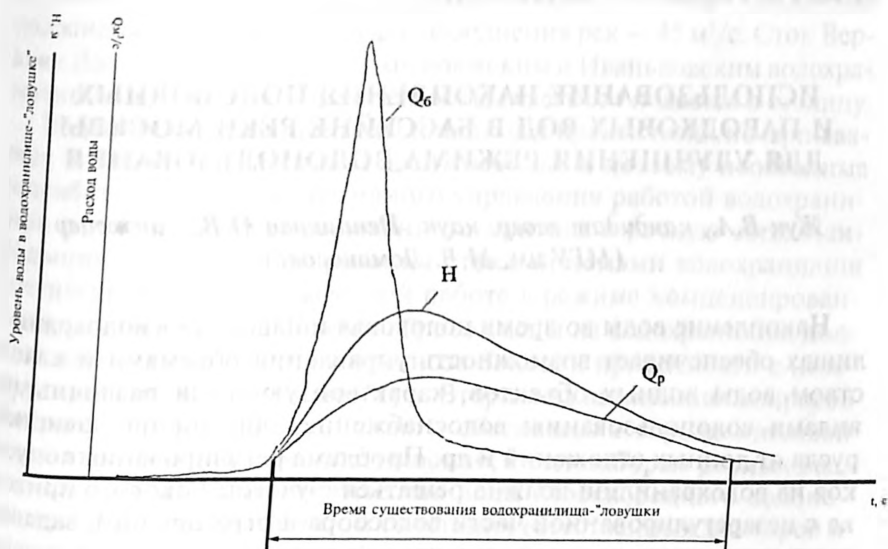


Рис. 5. График расходов и уровней в водохранилище-ловушке

В заключение следует отметить, что в отличие от обвалования или единого противопаводкового водохранилища метод малых водохранилищ-ловушек позволяет осуществить поэтапную реализацию проекта. Строительство малых плотин можно проводить в несколько очередей. В первую очередь строятся плотины на наиболее мощных водотоках. По окончании строительства I-й очереди проводится проверка их эффективности. Затем возводятся плотины последующих очередей на менее мощных водотоках. Так постепенно возводится весь противопаводковый комплекс, состоящий из системы больших и малых водохранилищ-ловушек.

Эксплуатация такой системы не потребует больших затрат. Потребуется только очистка верхового откоса плотин от растительности. Однако даже при отсутствии наблюдений и ухода за плотинами надежность системы «ловушек» остается достаточно высокой. Обусловлено это тем, что уменьшение пропускной спо-

способности трубчатых или фильтрующих водосбросов может только увеличить время задержки воды в «ловушке», при этом чем больше саморегулирующихся плотин в бассейне, тем выше надежность системы.

ЛИТЕРАТУРА:

Чугаев Р.Р. Гидравлика «Энергоиздат». Л.: 1982.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОЛОВОДНЫХ И ПАВОДКОВЫХ ВОД В БАСЕЙНЕ РЕКИ МОСКВЫ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ РЕЖИМА ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

*Жук В.А., кандидат геогр. наук, Печникова О.В., инженер
(МГУ им. М.В. Ломоносова)*

Накопление воды во время половодья и паводков в водохранилищах обеспечивает возможность управления объемами и качеством воды водных объектов, характеризующихся различными видами водопользования: водоснабжение, обводнение, очистка русла от донных отложений и др. Проблема регулирования пусков из водохранилищ должна решаться с учетом бокового притока с незарегулированной части водосбора и ограничений, задаваемых приоритетами водопользования в водных системах.

Основным приоритетом Москворецкой водной системы (МВС) является водоснабжение г. Москвы. Надежность водообеспечения города в значительной степени определяется возможностью гарантированной водоотдачи Волжского и Москворецкого источников водоснабжения. Сток рек зарегулирован системой водохранилищ, обеспечивающих равномерную подачу воды к водопроводным станциям — Истринским (ИГУ), Можайским (МГУ), Рузским (РГУ) и Озернинским (ОГУ) на р. Москве и ее притоках. Вазузская гидротехническая система включает Вазузское водохранилище, из которого вода поднимается в Яузское водохранилище, образованное Кармановским гидроузлом, а оттуда — в Верхнерузское водохранилище на р. Рузе, и далее вода поступает в Москворецкую водохозяйственную систему. Водоохранилища Вазузской системы работают таким образом, чтобы вместе с Москворецкими водохранилищами и со стоком с незарегулируемой части бассейна р. Москвы обеспечить круглый год в створе Рублевского гидроузла гарантированный расход воды 51 м³/с при 95%-м уровне обеспеченности. Водные ресурсы р. Москвы,

дополненные стоком рек Волги и Вазузы примерно в равных долях из обоих источников, используются в основном для хозяйственно-питьевого водоснабжения населения города, для промышленности и теплоэнергетики, а также для обводнительных попусков в р. Москву. Расчетная среднегодовая гарантированная водоотдача 95%-й обеспеченности для водоснабжения г. Москвы и обводнения рек из поверхностного стока составляет $128 \text{ м}^3/\text{с}$, в том числе для водоснабжения — $83 \text{ м}^3/\text{с}$, а для обводнения рек — $45 \text{ м}^3/\text{с}$. Сток Верхней Волги регулируется Верхневолжским и Ивановским водохранилищами и по каналу имени Москвы часть его подается в столицу.

В крайне маловодные годы и периоды практически исчерпывается возможная водоотдача всей системы, и поэтому необходима разработка средств оперативного управления работой водохранилищ с учетом незарегулированного притока в речную сеть. Наибольший эффект регулирования стока системами водохранилищ достигается при их совместной работе в режиме компенсированного регулирования. Объемы сбросов воды из водохранилищ должны назначаться с учетом прогноза боковой приточности с незарегулированной части водосбора. Вторым из важнейших вопросов для решения задачи устойчивого обеспечения города питьевой водой является качество поступающих к водозаборах речных вод. В современных условиях качество воды Москворецкого водоисточника является результатом сочетания естественных факторов и антропогенных нагрузок в бассейнах рек выше водохранилищ, внутриводоемных процессов, а также особенностей формирования стока воды, наносов, растворенных веществ в нижних бьефах гидроузлов. В формировании качества воды особую роль играет незарегулированная водохранилищами территория Москворецкого водоисточника — 3290 км^2 — из общей площади бассейна р. Москвы до Рублевской водопроводной станции (РВС) в 7530 км^2 . Большая часть этой территории интенсивно используется для сельскохозяйственного производства; здесь же сосредоточены города, большое число поселков и сел, много животноводческих комплексов, птицефабрик, подсобных хозяйств. Здесь имеется более 350 объектов — потенциальных загрязнителей речных вод.

К настоящему времени в результате существенных изменений условий водопользования, вызванных урбанизацией территории, массовым коттеджным строительством, неорганизованной деятельностью сельскохозяйственного производства, что приводит к увеличению стока загрязнений с водосбора в период половодья и паводков, возникает потребность оценки экологической безопасности

способности трубчатых или фильтрующих водосбросов может только увеличить время задержки воды в «ловушке», при этом чем больше саморегулирующихся плотин в бассейне, тем выше надежность системы.

ЛИТЕРАТУРА:

Чугаев Р.Р. Гидравлика «Энергоиздат». Л.: 1982.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОЛОВОДНЫХ И ПАВОДКОВЫХ ВОД В БАССЕЙНЕ РЕКИ МОСКВЫ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ РЕЖИМА ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Жук В.А., кандидат геогр. наук, Печникова О.В., инженер
(МГУ им. М.В. Ломоносова)

Накопление воды во время половодья и паводков в водохранилищах обеспечивает возможность управления объемами и качеством воды водных объектов, характеризующихся различными видами водопользования: водоснабжение, обводнение, очистка русла от донных отложений и др. Проблема регулирования пусков из водохранилищ должна решаться с учетом бокового притока с незарегулированной части водосбора и ограничений, задаваемых приоритетами водопользования в водных системах.

Основным приоритетом Москворецкой водной системы (МВС) является водоснабжение г. Москвы. Надежность водообеспечения города в значительной степени определяется возможностью гарантированной водоотдачи Волжского и Москворецкого источников водоснабжения. Сток рек зарегулирован системой водохранилищ, обеспечивающих равномерную подачу воды к водопроводным станциям — Истринским (ИГУ), Можайским (МГУ), Рузским (РГУ) и Озернинским (ОГУ) на р. Москве и ее притоках. Вазузская гидротехническая система включает Вазузское водохранилище, из которого вода поднимается в Яузское водохранилище, образованное Кармановским гидроузлом, а оттуда — в Верхнерузское водохранилище на р. Рузе, и далее вода поступает в Москворецкую водохозяйственную систему. Водоохранилища Вазузской системы работают таким образом, чтобы вместе с Москворецкими водохранилищами и со сток с незарегулируемой части бассейна р. Москвы обеспечить круглый год в створе Рублевского гидроузла гарантированный расход воды 51 м³/с при 95%-м уровне обеспеченности. Водные ресурсы р. Москвы,

дополненные стоком рек Волги и Вазузы примерно в равных долях из обоих источников, используются в основном для хозяйственно-питьевого водоснабжения населения города, для промышленности и теплоэнергетики, а также для обводнительных попусков в р. Москву. Расчетная среднегодовая гарантированная водоотдача 95%-й обеспеченности для водоснабжения г. Москвы и обводнения рек из поверхностного стока составляет $128 \text{ м}^3/\text{с}$, в том числе для водоснабжения — $83 \text{ м}^3/\text{с}$, а для обводнения рек — $45 \text{ м}^3/\text{с}$. Сток Верхней Волги регулируется Верхневолжским и Ивановским водохранилищами и по каналу имени Москвы часть его подается в столицу.

В крайне маловодные годы и периоды практически исчерпывается возможная водоотдача всей системы, и поэтому необходима разработка средств оперативного управления работой водохранилищ с учетом незарегулированного притока в речную сеть. Наибольший эффект регулирования стока системами водохранилищ достигается при их совместной работе в режиме компенсированного регулирования. Объемы сбросов воды из водохранилищ должны назначаться с учетом прогноза боковой приточности с незарегулированной части водосбора. Вторым из важнейших вопросов для решения задачи устойчивого обеспечения города питьевой водой является качество поступающих к водозаборам речных вод. В современных условиях качество воды Москворецкого водоемного источника является результатом сочетания естественных факторов и антропогенных нагрузок в бассейнах рек выше водохранилищ, внутриводоемных процессов, а также особенностей формирования стока воды, наносов, растворенных веществ в нижних бьефах гидроузлов. В формировании качества воды особую роль играет незарегулированная водохранилищами территория Москворецкого водоемного источника — 3290 км^2 — из общей площади бассейна р. Москвы до Рублевской водопроводной станции (РВС) в 7530 км^2 . Большая часть этой территории интенсивно используется для сельскохозяйственного производства; здесь же сосредоточены города, большое число поселков и сел, много животноводческих комплексов, птицефабрик, подсобных хозяйств. Здесь имеется более 350 объектов — потенциальных загрязнителей речных вод.

К настоящему времени в результате существенных изменений условий водопользования, вызванных урбанизацией территории, массовым коттеджным строительством, неорганизованной деятельностью сельскохозяйственного производства, что приводит к увеличению стока загрязнений с водосбора в период половодья и паводков, возникает потребность оценки экологической безопасности

водных объектов, используемых для хозяйственно-питьевых нужд, к которым относится р. Москва, ее притоки и водохранилища МВС. Очевидна необходимость переработки разработанных ранее правил эксплуатации водохранилищ и создания универсального математического аппарата, обеспечивающего выполнение требований по качеству, количеству и своевременности подачи воды водопользователям при изменившихся условиях.

Для решения некоторых вопросов этой проблемы разработан программный комплекс, состоящий из совокупности нескольких моделей, имитирующих процессы формирования и трансформации стока воды на водосборе и в русловой сети в пределах Московского водоисточника.

В нем для незарегулированной части водосбора последовательно реализуются алгоритмы:

- прогноза бокового притока воды к русловому тракту;
- оценки времени добегания воды до замыкающих створов отдельных элементов гидрографической сети;
- трансформации стока воды по длине речной сети;
- выбора приоритетных источников воды для гарантированного обеспечения водозаборов и для разбавления загрязнений при их аварийном поступлении с разных точек водосбора.

В данной работе на основе разработанного программного комплекса оценивались возможности разбавления поступивших в русловую сеть загрязнений попусками из водохранилищ. Исследовались объемы попусков и состав водохранилищ в зависимости от места поступления возможных загрязнений в сеть. При этом учитывалось значение бокового притока и его пространственная изменчивость в бассейне.

Как известно, неустановившееся движение воды в русле описывается системой уравнений в частных производных — уравнениями Сен-Венана, которая, с некоторыми допущениями, может быть представлена в следующем виде:

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial w(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial Q(t, x)}{\partial x} = q(t, x), \quad (1)$$

уравнение сохранения количества движения

$$Q(t, x) = \frac{R^{2/3}(t, x) I^{1/2}(t, x) w(t, x)}{n(x)}, \quad (2)$$

где t — время; x — координата расстояния, отсчитываемая вдоль

потока; $w(t, x)$ — площадь живого сечения; $Q(t, x)$ — расход воды, м³/с; $q(T, x)$ — боковой приток воды в единицу времени на единицу длины; $I(t, x) = i(t, x) - \frac{\partial h(t, x)}{\partial x}$ — уклон водной поверхности; $i(x)$ — продольный уклон дна; $h(t, x)$ — глубина (максимальная глубина в поперечном сечении); $R(t, x)$ — гидравлический радиус; $n(x)$ — коэффициент шероховатости русла. Здесь мы предположили, что коэффициент шероховатости не зависит от степени заполнения русла и изменяется только вдоль реки.

Численное решение системы уравнений (1) и (2) выполнено следующим образом.

По результатам полевых измерений на характерных участках русла реки строились поперечные профили с координатами $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, где x_1 — координата самой верхней точки русла (здесь это плотина водохранилища), x_N — координата самой нижней точки русла (обычно это устье или замыкающий створ).

Для каждого профиля предварительно рассчитываются табличные функции $\{w_j(h), R_j(h), j=1 \dots N\}$, которые в дальнейшем позволяют перейти от решений уравнения (1) к решениям уравнения (2).

Для решения уравнения (1) задаются:

- 0 — начальные условия для функций $\{w(t=0, x_j), Q(t=0, x_j), j=1 \dots N\}$;
- 1 — боковой приток на весь период расчета $\{q(t, x_j), j=1 \dots N\}$, где $q(t, x)$ — боковой приток на участке от $(j-1)$ -го до j -го профиля ($q(t, x_1) \equiv 0$); 2 — расход воды на верхнем профиле $Q(t, x_1)$ на весь период расчета; 3 — тождество $I(t, x_N) \equiv I(t, x_{N-1})$.

Указанные условия являются достаточными для решения разностной схемы для уравнения (1) относительно переменной t . Если известны значения в момент времени t_0 — $\{w(t_0, x_j), Q(t_0, x_j), j=1 \dots N\}$, тогда можно получить значения в момент времени $t_0 + \Delta t$ — $\{w(t_0 + \Delta t, x_j), j=1 \dots N\}$. Используя функции $\{w_j(h), R_j(h), j=1 \dots N\}$ и уравнение (2), получаем значения расхода $\{Q(t_0 + \Delta t, x_j), j=1 \dots N\}$.

Этот алгоритм реализован в программе расчета перемещения воды в русле реки — трансформации попусков из водохранилищ и бокового притока с незарегулированной части водосбора.

Для построения модели москворецкой речной системы на рассматриваемой части водосбора были выбраны шесть основных рек: Москва, Истра, Руза, Озерна, Малая Истра и Исконя. Важным моментом для успешного решения задачи трансформации стока является правильный выбор расчетных точек в выделенных русловых трактах. По длине каждой реки выбирались поперечные про-

фили из числа измеренных в поле так, чтобы они максимально характеризовали особенности русла, а расстояние между ними при этом было не менее 3 км и не более 7 км. При таких условиях возможно установить временной шаг расчета в одну минуту.

При проведении имитационных расчетов рассматривался верхний участок бассейна реки от Можайского гидроузла до поселка Рублево. Начальные условия на верхних профилях для рек Москвы, Истры, Рузы и Озерны определяются режимами сбросов воды на Можайском, Истринском, Рузском и Озернинском водохранилищах. Начальные условия на верхних профилях рек Малая Истра (пруд у д. Раково) и Искона (устье р. Колоповки), а также боковые притоки по длине всех шести рек определяются реальными наблюдениями или прогнозируются по метеорологическим данным по математической модели формирования талого и дождевого стока. Полученные расходы в замыкающих створах рек Истра, Руза, Искона, Малая Истра учитываются, в свою очередь, как дополнительные боковые притоки в соответствующих профилях тех рек, в которые они впадают.

Для расчетов необходимо иметь следующую информацию:
ежедневные сбросы воды на Можайском, Истринском, Рузском и Озернинском водохранилищах;

суточные данные метеозаписей по гидрометеостанциям г. Можайска и п. Н. Иерусалим;

ежедневные расходы и уровни воды на реках Искона (д. Новинки), Малая Истра (д. Киселево), Медвенка (с. Б. Сареево).

По этим данным для частных водосборов — в устьях малых рек — в соответствии с выбранными аналогами рассчитывались ежедневные расходы воды по следующему правилу:

для всех правобережных притоков Москвы-реки от устья Рузы до Рублево рассчитывается сток по модулю р. Медвенки;

для всех левобережных притоков Москвы-реки от устья Рузы до Рублево, а также для всех притоков рек Истра и Малая Истра сток рассчитывается по модулю р. Малая Истра;

для всех притоков р. Москвы выше устья р. Рузы, а также для притоков рек Рузы и Исконы сток вычисляется по модулю р. Исконы.

Рассматриваемая модель (как и любая другая система) нуждается в задании некоторых начальных и граничных условий ее функционирования. Причем при рассмотрении разных состояний системы необходимы соответственно и разные наборы условий и ее параметров.

Исследуемая с помощью модели речная система обладает определенной инерционностью. Поэтому введению вариантных

условий для расчета должно предшествовать задание фоновых параметров, наиболее близких к планируемым вариантным значениям. Для решения задачи поиска оптимальных объемов попусков московских водохранилищ при аварийных поступлениях загрязнений наиболее подходящим является задание «вариантных» параметров. Так, для всех имитационных расчетов использовалась следующая схема задания начальных и «испытуемых» условий.

Фоновые (стандартные) попуски с водохранилищ составляли: Можайское — $15 \text{ м}^3/\text{с}$; Рузское — $7 \text{ м}^3/\text{с}$; Озернинское — $1 \text{ м}^3/\text{с}$; Истринское — $4 \text{ м}^3/\text{с}$.

Боковой приток задавался по трем рекам: Искона, Малая Истра, Медвенка, и затем по этим расходам модель рассчитывает значения боковой приточности с незарегулированной территории бассейна. Для осуществления проверки работоспособности описанной выше схемы был произведен ряд расчетов с различными условиями.

Расчеты выполнялись при разных значениях одиночных шестичасовых попусков из водохранилищ:

Можайское 50, 100, 150, 200, 250, 300 $\text{м}^3/\text{с}$;

Рузское 50, 100, 150 $\text{м}^3/\text{с}$;

Озернинское 50, 100, 150 $\text{м}^3/\text{с}$;

Истринское 50, 100, 150, 200 $\text{м}^3/\text{с}$.

Кроме того производились расчеты для комбинаций попусков при разном составе водохранилищ. Стандартный расчет, проведенный при отсутствии бокового притока, позволяет рассчитать время добегания до Рублево волн попусков разного объема и выделить максимально возможные величины объемов попусков для расчета по модели. Используемые морфометрические характеристики русловых трактов основной реки и ее притоков позволяют «пропускать» в течение 6 часов по русловой сети одновременно попуски не больше приведенных расходов:

Можайское водохранилище — $300 \text{ м}^3/\text{с}$;

Рузское водохранилище — $200 \text{ м}^3/\text{с}$;

Озернинское водохранилище — $200 \text{ м}^3/\text{с}$;

Истринское водохранилище — $150 \text{ м}^3/\text{с}$.

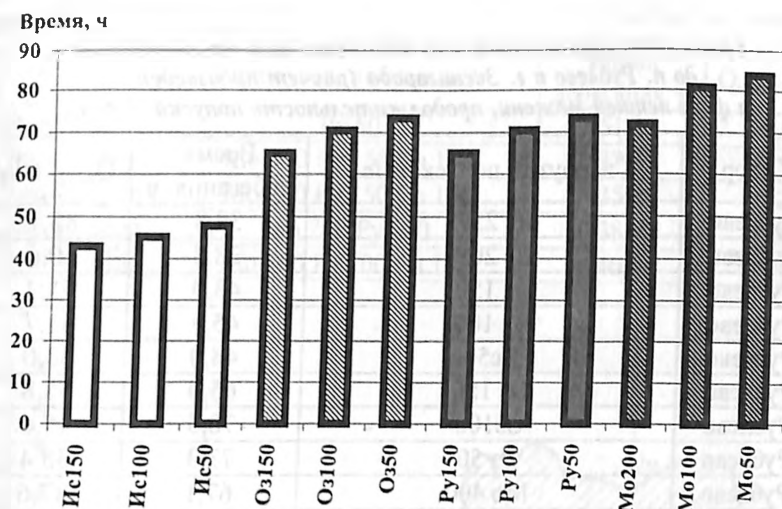
После проведения серии численных имитационных расчетов с помощью модели трансформации стока воды рассчитано время добегания воды по руслу р. Москвы до РВС и по руслам ее основных притоков. Сначала получены результаты модельных расчетов расходов воды. Затем по данным о скоростях течения на отдельных участках и расстояниях между характерными точ-

ками (профилями) было рассчитано время добегаания воды от каждого пункта в русле (от устья каждого притока или от поперечного профиля) до РВС.

Для русловых трактов основных рек водосбора выполнены имитационные расчеты трансформации стока по модели, позволяющие оценить время руслового добегаания до г. Звенигорода и до п. Рублево при различных режимах сработки водохранилищ. Для различных объемов попусков из разных водохранилищ или их комбинации рассчитывалось время добегаания максимального расхода до водозаборов в п. Рублево и собственно значение максимального расхода волны паводка (таблица). Результаты численных экспериментов представлялись в различной графической форме: графики сравнения, диаграммы зависимости времени добегаания единичных расходов до Рублево при различных значениях бокового притока, номограммы изменения времени добегаания по тракту рек Москвы, Рузы, Истры (рис. 1, 2). Результаты модельных расчетов в совокупности с базой данных о потенциальных загрязнителях Москворецкого водоисточника позволили провести районирование исследуемой территории бассейна р. Москвы по эффективности разбавления аварийных поступлений загрязняющих веществ с разных частей бассейна попусками разных объемов из москворецких водохранилищ. Один из примеров такого районирования приведен на рис. 3.

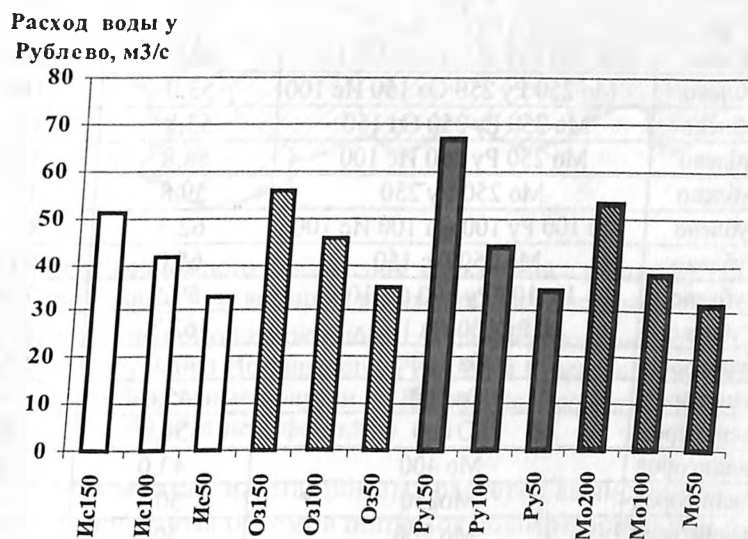
Результаты этого исследования позволяют принимать достаточно оперативно управленческие решения при негативном изменении характеристик качества воды. По итогам работы можно выделить следующие результаты:

1. Проведение многочисленных имитационных расчетов трансформации воды (различных объемов попусков и значений бокового притока с незарегулированной части бассейна) в руслах р. Москвы и ее притоков позволило создать обширную базу графических материалов, проанализировать природу и механизм формирования расхода выше рублевских водозаборов, что необходимо для выбора стратегии сохранения постоянно необходимого расхода (около $50 \text{ м}^3/\text{с}$) на РВС. Анализ механизма формирования расходов по трактам основных рек Москворецкого водоисточника (Москвы-реки, Рузы, Истры, Исконы, Малой Истры) позволяет выделять приоритетные источники подачи воды из москворецких водохранилищ при аварийных поступлениях загрязняющих веществ с различных частей бассейна.



Гидроузел, попуск воды, м³/с

Рис. 1. Время добегаания максимумов волн попусков от гидроузлов до п. Рублево (расчет произведен на фоне летней межени, продолжительность попуска 6 ч).



Гидроузел, попуск воды, м³/с

Рис. 2. Максимальные расходы р. Москвы у п. Рублево при разных попусках воды из водохранилищ (расчет произведен на фоне летней межени, продолжительность попуска 6 ч).

Время добегания максимумов волн пускков от гидроузлов до п. Рублево и г. Звенигорода (расчет произведен на фоне летней межени, продолжительность пуска — 6 ч).

Створ	Гидроузел, попуск, м ³ /с	Время добегания, ч	Q _{макс} , м ³ /с
Рублево	Ис 250	32,8	85,7
Рублево	Ис 200	38,8	60,6
Рублево	Ис 150	43,0	51,3
Рублево	Ис 100	45,3	41,7
Рублево	Ис50	48,0	33,0
Рублево	Оз 150	65,0	55,8
Рублево	Оз100	70,5	45,6
Рублево	Оз 50	73,3	35,4
Рублево	Мо 400	67,1	87,6
Рублево	Мо 250	71,0	61,2
Рублево	Мо 200	71,8	53,2
Рублево	Мо 100	80,8	38,2
Рублево	Мо 50	83,8	31,5
Рублево	Ру 200	65,0	66,9
Рублево	Ру 100	70,5	44,0
Рублево	Ру 50	73,3	34,1
Рублево	Мо 300 Ру150 Оз 150 Ис 150	54,0	153
Рублево	Мо 250 Ру 250 Оз 150 Ис 100	53,0	164
Рублево	Мо 250 Ру 250 Оз 150	53,8	152
Рублево	Мо 250 Ру 250 Ис 100	56,8	126
Рублево	Мо 250 Ру 250	59,8	115
Рублево	Мо 100 Ру 100 Оз 100 Ис 100	62,3	88,2
Рублево	Мо 250 Ис 150	65,0	68,9
Рублево	Ис 100 Ру 100 Оз 100	59,5	75,0
Рублево	Ру 100 Оз 100	62,3	65,2
Звенигород	Оз 150	43,0	54,5
Звенигород	Оз 100	45,8	43,3
Звенигород	Оз 50	51,3	32,1
Звенигород	Мо 400	43,0	88,3
Звенигород	Мо250	50,5	59,6
Звенигород	Мо 200	50,8	51,1
Звенигород	Мо 100	53,8	34,7
Звенигород	Мо 50	59,8	27,7
Звенигород	Ру 200	40,3	66,3
Звенигород	Ру 100	48,5	41,5

Продолжение таблицы

Створ	Гидроузел, попуск, м ³ /с	Время добегаания, ч	Q _{макс} , м ³ /с
Звенигород	Ру 50	51,3	30,9
Звенигород	Мо 300 Ру 150 Оз 150	37,5	143
Звенигород	Мо 250 Ру 250 Оз 150	35,8	162
Звенигород	Мо 250 Ру 250	38,8	121
Звенигород	Мо 100 Ру 100 Оз 100	40,3	78,5

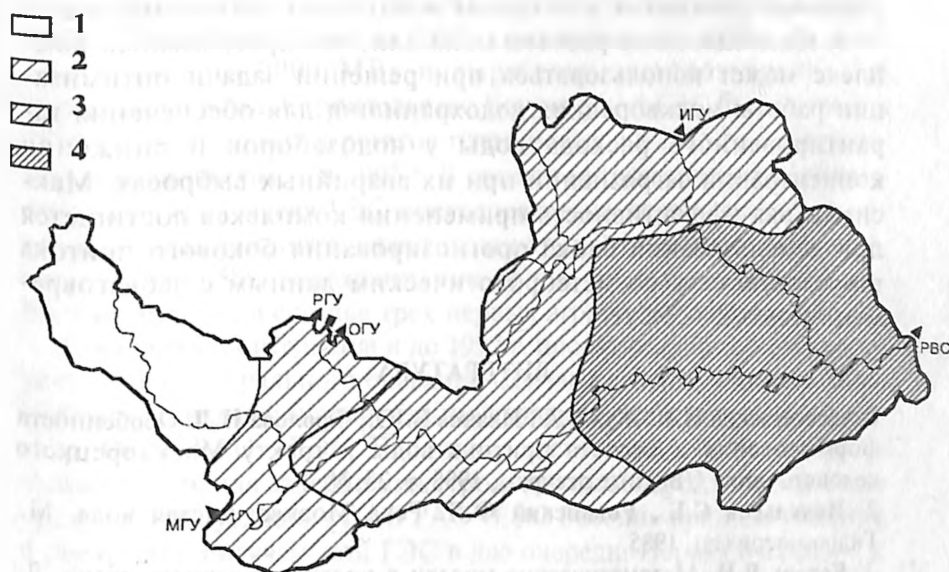


Рис. 3. Зоны возможного разбавления загрязнений с разных частей бассейна попусками москворецких водохранилищ с расходами 44 м³/с:

1 – эффективные попуски при любом сочетании водохранилищ; 2 – эффективные попуски из Истринского, Рузского и Озернинского водохранилищ; 3 – эффективные попуски из Истринского водохранилища; 4 – попуски с $Q < 40$ м³/с неэффективны

2. По результатам имитационных расчетов вычислено время добегаания различных объемов попусков водохранилищ при разных значениях бокового притока с незарегулированной части бассейна до любой точки бассейна р. Москвы. Построенные номограммы времени добегаания и карты изохрон суммарного времени добегаания (учитывающие склоновое добегаание и время

добегания по вторичной русловой сети) позволяют быстро определять время достижения паводочными волнами и волнами попусков водозаборов у п. Рублево для принятия управленческих решений. Карты зон возможного разбавления попусками водохранилищ поступающих с разных частей бассейна загрязнений, построенные в результате районирования территории, в совокупности с картой и базой данных «Потенциальных источников загрязнений Москворецкого водоисточника» позволяют упростить процедуру идентификации объектов загрязнителей при аварийных выбросах загрязняющих веществ и быстрым реагированием уменьшить негативное влияние на водный объект

3. Имитационные расчеты показали, что программный комплекс может использоваться при решении задачи оптимизации работы москворецких водохранилищ для обеспечения гарантированного расхода воды у водозаборов и снижения концентрации загрязнений при их аварийных выбросах. Максимальная эффективность применения комплекса достигается при использовании блока прогнозирования бокового притока в русловую сеть по метеорологическим данным с заблаговременностью 2 — 3 сут.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеевский Н.И., Жук В.А., Иванов В.Ю., Фролова Н.Л. Особенности формирования и расчета притока воды к тракту Москворецкого водоисточника // Водные ресурсы, 1998, т. 25. № 2.
2. Иохельсон С.Б., Ровинский Ф.Я. Река Москва: чистая вода. М.: Гидрометеиздат. 1985.
3. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. Л.: Гидрометеиздат. 1991.
4. Ландшафты Московской области и их современное состояние. Смоленск: СГУ. 1997.
5. Нежиховский Р.А. Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды. Л.: Гидрометеиздат. 1971.
6. Процессы загрязнения и самоочищения р. Москвы. М.: Стройиздат. 1972.
7. Субботин А.И., Дыгало В.С. Экспериментальные гидрологические исследования в бассейне р. Москвы. М.: Гидрометеиздат. 1991.

ПРОПУСК ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПАВОДКОВ ЧЕРЕЗ СООРУЖЕНИЯ ПЕРВОЙ ОЧЕРЕДИ БОГУЧАНСКОГО ГИДРОУЗЛА

*Семенков В.М., инженер (ОАО «БогучанГЭСстрой»),
Новикова И.С., кандидат техн. наук. (ОАО «НИИЭС»)*

Строящаяся Богучанская гидроэлектростанция — четвертая в каскаде ГЭС на р. Ангаре и первая на территории Красноярского края. Необходимость строительства Богучанской ГЭС была определена Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР в 1971 г. Технический проект ГЭС, утвержденный в 1979 г., установил мощность 3000 МВт и выработку электроэнергии 17,6 млрд.кВт·ч в год. Строительство Богучанской ГЭС было начато в 1980 г., пуск первых агрегатов планировался в 1988 г., а завершение строительства — в 1992 г. В связи с недостаточным финансированием срок пуска ГЭС последовательно переносился, и в настоящее время строительная готовность по генподряду гидроузла, включающая 58% водохранилища, в том числе готовность пускового комплекса в составе трех первых агрегатов составляет 72%.

С начала строительства и до 1992 г. проект полностью финансировался из федерального бюджета. Сейчас практически единственным источником финансирования являются инвестиционные средства ОАО РАО «ЕЭС России», ежегодный объем которых недостаточен для завершения строительства гидроузла в реальные сроки. В этих условиях ОАО РАО «ЕЭС России» приняло решение о постройке Богучанской ГЭС в две очереди. Первая очередь — с уровнем воды в водохранилище 185,0 м вместо 208,0 м, которой был принят в ранее утвержденном проекте. Такое решение позволило минимизировать затраты на строительство, учесть рекомендации экологических экспертиз и получить возможность частичного самофинансирования достройки сооружений за счет прибыли от эксплуатации ГЭС первой очереди.

При выборе пониженной отметки НПУ ГЭС были последовательно разработаны и экспертно рассмотрены варианты ввода Богучанской ГЭС с отметками водохранилища 154, 166, 174 и 185 м. В результате этого рассмотрения уровень водохранилища на отметке 185,0 м был рекомендован для реализации, как наиболее предпочтительный вариант достройки ГЭС. Главная особенность варианта с НПУ 185,0 м — логическая завершенность основных сооружений и водохранилища, минимальные объемы остаточных

работ и гидравлическая ясность пропуска паводков. Вариант с НПУ 185,0 м дает возможность максимального использования в период строительства ранее разработанной проектной документации и изготовленных по ней металлоконструкций и гидросилового оборудования. Водоохранилище с уровнем 185,0 м располагается в пределах территории Красноярского края и не затрагивает территорию Иркутской области. При НПУ 185,0 м формируется речной тип водоохранилища, которое относится к категории водоохранилищ средней глубины. Степень водообмена приблизительно 6 раз в год. Мелководья с глубинами до 2-х метров составляют 8,1% общей площади водоохранилища. Это в полной мере соответствует требованиям «Санитарных правил проектирования, строительства и эксплуатации водоохранилищ» (СанПиН 3907-85).

ГЭС с НПУ 185,0 м будет иметь установленную мощность 1620 МВт (9х180 МВт) и производить около 13 млрд.кВт·ч электроэнергии в год. Пусковой комплекс: мощность 540 МВт (3х180 МВт); выработка электроэнергии 4,3 млрд.кВт·ч в год.

Эффективность принятого решения о снижении отметки водоохранилища на уровень 185,0 м состоит в том, что:

стоимость достройки ГЭС с НПУ 85,0 м составляет (включая водоохранилище) 51% стоимости достройки ГЭС с водоохранилищем, имеющим НПУ 208,0 м;

производство электроэнергии ГЭС с НПУ 85,0 м составляет 74% выработки при НПУ 208,0 м;

число часов использования установленной мощности ГЭС около 8000 по водотоку;

в водоохранилище полностью завершена лесосводка;

из зоны водоохранилища переселены 53% населения;

удельные капитальные вложения на 1 кВт установленной мощности, включая водоохранилище, составляют 484 доллара США;

внутренняя норма рентабельности затрат на создание и эксплуатацию (IRR) 28,59%;

срок окупаемости (с начала эксплуатации) — 5 лет.

В перспективе, по мере увеличения потребности в электроэнергии, возможен подъем уровня верхнего бьефа до проектной отметки 208,0 м при соответствующей достройке водоподпорных сооружений гидроузла.

В утвержденном проекте пропускная способность десяти гребенных водоводов (водосброс №1) обеспечивала сброс расчетного паводкового расхода вероятностью превышения 0,1%. При снижении уровня воды в водоохранилище до отметки 185,0 м

пропускная способность водосброса №1 недостаточна. При полном открытии глубинных водоводов их расход составляет 5570 м³/с. Один агрегат ГЭС пропускает 400 м³/с. Расчетный расход паводка вероятностью 0,1% возрос по уточненным данным ОАО «Институт Гидропроект» до 15340 м³/с. В этих условиях требуется устройство дополнительного водосброса №2 для снятия дефицита пропускной способности.

Было решено возвести водосброс №2 вместо станционных секций №№20...22. Другие варианты, такие как размещение водосброса №2 в пределах грунтовой плотины либо вместо временного шлюза-водосброса и пр., были признаны нецелесообразными. Они требовали устройства отдельных перемычек, повышенных капитальных вложений, трудозатрат и материалов. Секции №№20...22 не планировали использовать для расширения здания ГЭС сверх утвержденных 3000 МВт при тенденции выравнивания графика нагрузки электрической системы.

Сложность в проектировании водосброса №2 состояла в том, что на отведенном под него участке уже выполнены бетонные контрфорсы между подводящими водоводами ГЭС, расчищен котлован на низких отметках под отсасывающие трубы, достаточно близко к оси сооружения подходит строительная перемычка нижнего бьефа. Кроме того, если через водосброс №1 при ширине водосбросного фронта 100 м предусматривается пропуск расхода 5570 м³/с, то через водосброс №2 при ширине отводящего участка 70 м нужно пропустить расход не менее 6200 м³/с. Соответственно удельные расходы в нижнем бьефе возрастают до 90 м³/с, что существенно осложняет гашение энергии потока за водосбросом №2. В настоящее время на стройке уже выполнена раздельная стенка между отводящими трактами водосброса №1 и зданием ГЭС. Длина стенки и ее заложение определились гашением энергии в водобойном колодце водосброса №1. К стенке примыкает низовая перемычка котлована здания ГЭС. Сопрягающие водобойные устройства водосброса №2 и раздельную стенку №2 между ними и зданием ГЭС предпочтительно было разместить в границах существующего котлована, в противном случае пришлось бы менять конструкцию перемычки котлована ГЭС на этом участке с целью освобождения дополнительного пространства для их размещения. Кроме того, конструкция водосброса №2, включая его энергогасящие устройства, должна обеспечивать возможность проведения ремонтных мероприятий по всем элементам конструкций как водосброса №1, так и водосброса №2.

работ и гидравлическая ясность пропуска паводков. Вариант с НПУ 185,0 м дает возможность максимального использования в период строительства ранее разработанной проектной документации и изготовленных по ней металлоконструкций и гидросилового оборудования. Водохранилище с уровнем 185,0 м располагается в пределах территории Красноярского края и не затрагивает территорию Иркутской области. При НПУ 185,0 м формируется речной тип водохранилища, которое относится к категории водохранилищ средней глубины. Степень водообмена приблизительно 6 раз в год. Мелководья с глубинами до 2-х метров составляют 8,1% общей площади водохранилища. Это в полной мере соответствует требованиям «Санитарных правил проектирования, строительства и эксплуатации водохранилищ» (СанПиН 3907-85).

ГЭС с НПУ 185,0 м будет иметь установленную мощность 1620 МВт (9x180 МВт) и производить около 13 млрд.кВт·ч электроэнергии в год. Пусковой комплекс: мощность 540 МВт (3x180 МВт); выработка электроэнергии 4,3 млрд.кВт·ч в год.

Эффективность принятого решения о снижении отметки водохранилища на уровень 185,0 м состоит в том, что:

стоимость достройки ГЭС с НПУ 85,0 м составляет (включая водохранилище) 51% стоимости достройки ГЭС с водохранилищем, имеющим НПУ 208,0 м;

производство электроэнергии ГЭС с НПУ 85,0 м составляет 74% выработки при НПУ 208,0 м;

число часов использования установленной мощности ГЭС около 8000 по водотоку;

в водохранилище полностью завершена лесосводка;

из зоны водохранилища переселены 53% населения;

удельные капитальные вложения на 1 кВт установленной мощности, включая водохранилище, составляют 484 доллара США;

внутренняя норма рентабельности затрат на создание и эксплуатацию (IRR) 28,59%;

срок окупаемости (с начала эксплуатации) — 5 лет.

В перспективе, по мере увеличения потребности в электроэнергии, возможен подъем уровня верхнего бьефа до проектной отметки 208,0 м при соответствующей достройке водоподпорных сооружений гидроузла.

В утвержденном проекте пропускная способность десяти глубинных водоводов (водосброс №1) обеспечивала сброс расчетного паводкового расхода вероятностью превышения 0,1%. При снижении уровня воды в водохранилище до отметки 185,0 м

пропускная способность водосброса №1 недостаточна. При полном открытии глубинных водоводов их расход составляет 5570 м³/с. Один агрегат ГЭС пропускает 400 м³/с. Расчетный расход паводка вероятностью 0,1% возрос по уточненным данным ОАО «Институт Гидропроект» до 15340 м³/с. В этих условиях требуется устройство дополнительного водосброса №2 для снятия дефицита пропускной способности.

Было решено возвести водосброс №2 вместо станционных секций №№20...22. Другие варианты, такие как размещение водосброса №2 в пределах грунтовой плотины либо вместо временно-го шлюза-водосброса и пр., были признаны нецелесообразными. Они требовали устройства отдельных перемычек, повышенных капитальных вложений, трудозатрат и материалов. Секции №№20...22 не планировали использовать для расширения здания ГЭС сверх утвержденных 3000 МВт при тенденции выравнивания графика нагрузки электрической системы.

Сложность в проектировании водосброса №2 состояла в том, что на отведенном под него участке уже выполнены бетонные контрфорсы между подводящими водоводами ГЭС, расчищен котлован на низких отметках под отсасывающие трубы, достаточно близко к оси сооружения подходит строительная перемычка нижнего бьефа. Кроме того, если через водосброс №1 при ширине водосбросного фронта 100 м предусматривается пропуск расхода 5570 м³/с, то через водосброс №2 при ширине отводящего участка 70 м нужно пропустить расход не менее 6200 м³/с. Соответственно удельные расходы в нижнем бьефе возрастают до 90 м³/с, что существенно осложняет гашение энергии потока за водосбросом №2. В настоящее время на стройке уже выполнена раздельная стенка между отводящими трактами водосброса №1 и зданием ГЭС. Длина стенки и ее заложение определились гашением энергии в водобойном колодце водосброса №1. К стенке примыкает низовая перемычка котлована здания ГЭС. Сопрягающие водобойные устройства водосброса №2 и раздельную стенку №2 между ними и зданием ГЭС предпочтительно было разместить в границах существующего котлована, в противном случае пришлось бы менять конструкцию перемычки котлована ГЭС на этом участке с целью освобождения дополнительного пространства для их размещения. Кроме того, конструкция водосброса №2, включая его энергогасящие устройства, должна обеспечивать возможность проведения ремонтных мероприятий по всем элементам конструкций как водосброса №1, так и водосброса №2.

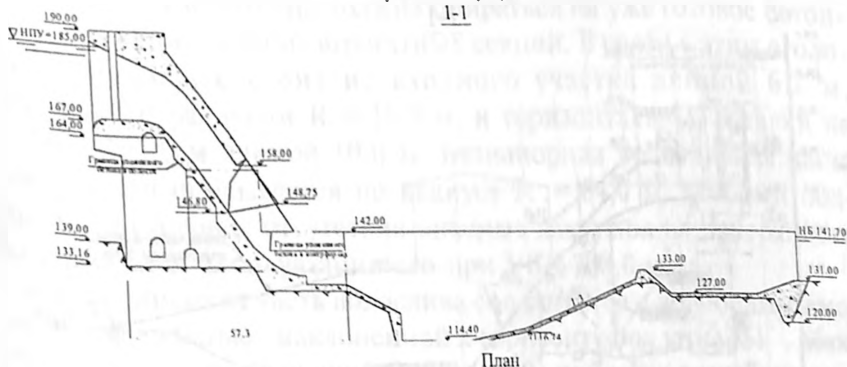
Перед проектировщиками ОАО «Институт Гидропроект» и научными сотрудниками ОАО «НИИЭС» была поставлена задача найти такие компоновочные и конструктивные решения водосброса №2, его энергогасящего устройства и отдельных стенок, которые обеспечили бы надежную долговременную эксплуатацию девяти агрегатов ГЭС на пониженной отметке НПУ первой очереди — равной 185,0 м, а также при постепенном, в перспективе, подъеме водохранилища до предусмотренного проектом НПУ второй очереди 208,0 м, включая длительную работу на любых промежуточных отметках в указанном диапазоне.

Первоначально были рассмотрены два варианта расположения водосброса №2 в пределах трех станционных секций. По первому варианту водосброс проходит вдоль трактов подводящих водоводов ГЭС, проточная часть водосброса за входным участком состоит из трех безнапорных пролетов шириной 11,0 м, расположенных между существующими бетонными контрфорсами (рис. 1). Во втором варианте водосливная поверхность водосброса располагается поверх существующих контрфорсов и имеет ширину 70 м сразу за отдельными бычками.

В первом варианте, где отвод воды осуществляется через три безнапорных лотка с удельными расходами 170...219 м³/с, достичь расширения потока ниже лотков на коротком участке до 70 м и до удельных расходов 80...100 м³/с, обеспечивающих удовлетворительное гашение энергии потока, практически невозможно. В связи с этим для дальнейшей разработки и исследований на моделях был принят вариант водосброса № 2, водосливная грань которого располагается выше существующих контрфорсов (рис. 2). Готовность их в настоящий момент такова, что в них возможно выполнить водосбросное отверстие с порогом на отметке не ниже 167,0 м. В ходе проведения проектных и научно-исследовательских работ был разработан и комплексно исследован на двух моделях вариант компоновки водосброса № 2, который включает напорный входной участок, разделенный бычками на 5 секций шириной 10,0 м каждая, и безнапорный водосливной участок шириной 74 м, сопрягающийся с водобойным колодцем. Заканчивается водобойный колодец стенкой с наклонной лобовой гранью. Длина водосброса от входного порога до гребня водобойной стенки равна 133,0 м, высота наклонной водобойной стенки — 6,4 м, отметка дна водобойного колодца — 114,6 м. На фрагментной модели водосброса №2 определялась пропускная способность водосброса, гидравлические условия в напорной и безнапорной частях водосброса, ус-

Продольный разрез

1-1



План

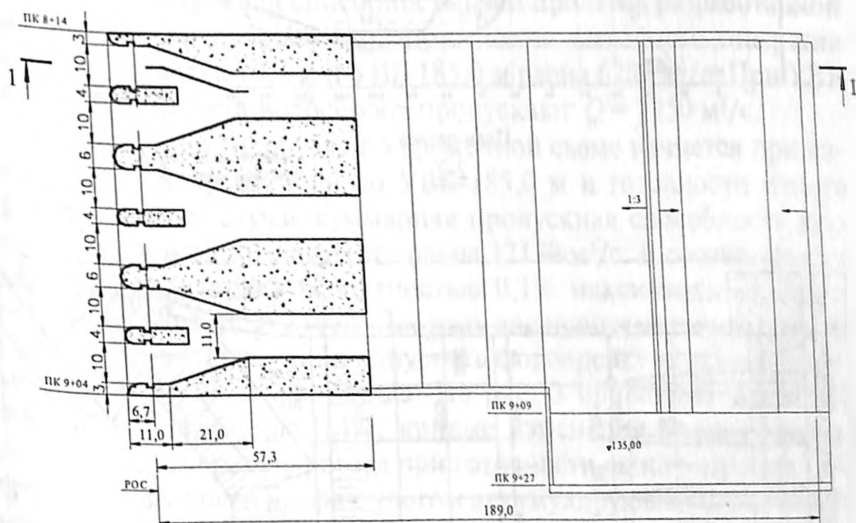


Рис. 1. Вариант компоновки водосброса №2 с расположением водосливных пролетов между существующими контрфорсами

ловия гашения энергии потока в нижнем бьефе для разных типов энергогасящих устройств, оценивались возможные последствия гидродинамического и кавитационного воздействия потока. На пространственной модели гидроузла решались следующие задачи:

подбиралась конструкция конечного участка водосброса №2 и отдельных стенок на его границах в условиях пространственной работы и при одновременной работе в различном сочетании с водосбросом №1 и агрегатами ГЭС;

фиксировалась деформация русла в нижнем бьефе на участке гашения энергии, включая местные размывы в основании отдельных стен при разных конструктивных схемах и схемах маневрирования открытием отверстий;

Конструктивная особенность входной напорной части водосброса состоит в том, что она должна опираться на уже готовое бетонное сооружение бывших агрегатных секций. В связи с этим оголовок водослива состоит из входного участка длиной 6,7 м, очерченного радиусом $R_1 = 18,0$ м, и горизонтальной вставки на отметке 167,0 м длиной 10,0 м. Безнапорная водосливная часть поверхности описывается по радиусу $R_2 = 64,0$ м, который подбирался из условия отсутствия опасных вакуумов на поверхности водослива при эксплуатации его при УВБ 208,0 м.

Криволинейная часть водослива соединяется с водобойным колодцем плоскостью, наклоненной к горизонту под углом 51° . Максимальная пропускная способность пяти пролетов разработанной конструкции водосброса № 2 при высоте выходного отверстия напорного участка 10,7 м и УВБ 185,0 м равна $6200 \text{ м}^3/\text{с}$. При УВБ 208,0 м три пролета водосброса пропускают $Q = 7250 \text{ м}^3/\text{с}$.

Эксплуатация гидроузла по временной схеме начнется при наполнении водохранилища до УВБ 185,0 м и готовности одного агрегата. В этом случае суммарная пропускная способность двух водосбросов и одного агрегата равна $12170 \text{ м}^3/\text{с}$. В соответствии с гидрографом паводка вероятностью 0,1% максимальный сбросной расход равен $15342 \text{ м}^3/\text{с}$. Поэтому для пропуска такого паводка через гидроузел надо либо допустить форсировку верхнего бьефа, либо сработку водохранилища. На рис. 3 приведены гидрограф паводка вероятностью 0,1%, кривые изменения по дням сбросных расходов через гидроузел при готовности одного агрегата ГЭС и уровней верхнего бьефа с учетом аккумулирующей способности водохранилища. Максимальная форсировка в этом случае равна 0,58 м, а ее продолжительность 9 сут. На рис. 4 для того же гидрографа представлена возможная кривая сработки водохранилища для пропуска паводка без форсировки уровня верхнего бьефа выше отметки 185,0 м. В этом случае придется в начале паводка в течении четырех дней сработать водохранилище до отметки верхнего бьефа, равной 184,3 м, т.е. на 0,7 м, а затем на пике паводка снова наполнить его до НПУ.

Концевой участок водосброса №2 разрабатывался и исследовался на фрагментной модели в пяти вариантах: 1) носок с уступом на $\nabla 127,0$ м для образования поверхностного режима в нижнем бьефе; 2) носок-трамплин на $\nabla 134,0$ м для отброса струи; 3) водобойный колодец, очерченный в соответствии с рельефом существующего котлована и имеющий относительно высокую отметку рисбермы — 124,0 м; 4) водобойный колодец

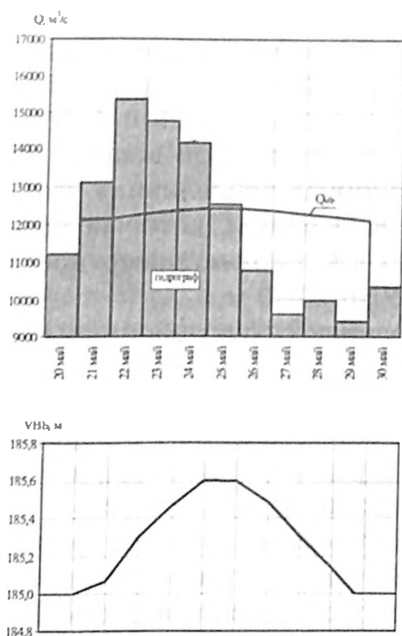


Рис. 3. Пропуск расчетного паводка с вероятностью превышения 0,1% через водосбросы №1 и №2 и один агрегат ГЭС при допущении форсировки верхнего бьефа

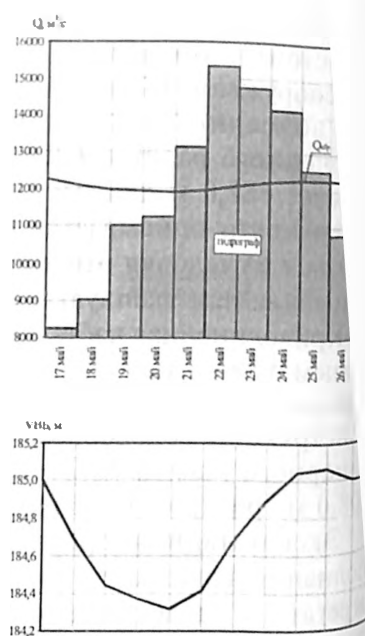


Рис. 4. Пропуск расчетного паводка с вероятностью превышения 0,1% через водосбросы №1 и №2 и один агрегат ГЭС без форсировки верхнего бьефа

с отметкой дна 114,6 м и со стенкой на $\nabla 121,0$ м; 5) цилиндрический носок глубокого заложения (отметка дна 107,0 м) для образования на нем гидравлического прыжка.

По результатам первоначальных исследований на фрагментной модели наилучшим был признан концевой участок по варианту 4 водосброса №2, состоящий из водобойного колодца с отметкой дна 114,6 м и водобойной стенки с лобовой гранью, наклоненной к горизонту под углом 30° . Ширина водобойного колодца первоначально соответствовала 78,0 м.

Эта конструкция концевой участка водосброса обеспечивает сопряжение с нижним бьефом надвинутым на наклонную грань водослива гидравлическим прыжком; расширение потока в нижнем бьефе при различных возможных режимах работы водосброса происходит плавно, сбойные течения и водоворотные зоны за гидротурбиной отсутствуют.

Конфигурация правой существующей разделительной стенки связана с конструкцией водосброса №1, поэтому ее длина на протяжении всех опытов оставалась неизменной и заканчивалась на расстоянии 189,0 м от оси сооружения. Длина и конфигурация левой разделительной стенки определялись в ходе исследований на пространственной модели.

Первоначально рассматривалась деформация русла за прямой короткой стенкой, заканчивающейся за водобойным колодцем, и длинной, заканчивающейся на расстоянии 176,0 м от оси сооружения.

При этом картина деформации русла за водосбросом №2 удовлетворения не вызывала: зона максимального размыва располагалась на уровне конца раздельных стенок и возможен был их подмыв с низовой стороны. Поэтому на следующем этапе был уменьшен наклон лобовой грани водобойной стенки до 18° . Режим течения за водобойной стенкой стал намного спокойней, существенно уменьшилась высота водяного гребня с $\nabla 148,0$ м до $\nabla 144,0$ м, протяженность ямы размыва сократилась, а длина бара за ней уменьшилась на 100,0 м.

В дальнейшем конфигурация раздельной стенки № 2 была доработана следующим образом: длинная раздельная стенка плавно сдвинута в сторону ГЭС на 6,5 м для уменьшения удельных расходов и хвостовая часть стенки стала ныряющей с тем, чтобы застойная зона за стенкой не формировала вертикальные вихри, способствующие размывам скалы возле стенки (рис.2).

Что касается правой раздельной стенки, то ее пришлось переместить на 4,0 м в сторону водосброса № 2, чтобы иметь возможность заглубиться до отметки дна водобойного колодца этого водосброса. Таким образом, ширина водобойного колодца уменьшилась до 74,0 м. При этом верх правой раздельной стенки находится на $\nabla 146,0$ м до створа, расположенного в 107,9 м от оси сооружения, а далее постепенно снижается до $\nabla 133,0$ м, что также позволяет плавно расширить поток и существенно уменьшить размывы у правой стенки.

После доработки конструкции водобойного колодца и ограждающих его стенок максимальный размыв наблюдается на расстоянии 160,0 м от разбивочной оси сооружения между раздельными стенками до отметок не ниже 125,0 м. За торцами раздельных стенок не наблюдались размывы ниже $\nabla 130,0$ м. Замыва отсасывающих труб частицами размывого грунта не происходит; бар, образованный из продуктов размыва скалы, не оказывает влияния на уровни воды за отсасывающими трубами.

ВЫБОР ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПО ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО НАВОДНЕНИЯ В ПРИМОРСКОМ КРАЕ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Беликов В.В., кандидат физ.-мат. наук, *Милитеев А.Н.*, доктор техн. наук, *Третьюхина Е.С.*, инженер (ОАО «НИИЭС»),
Цыпин В.И. (ВНИИ транспортного строительства)

Работа была выполнена в 1990 г. в соответствии с постановлением Совмина СССР №719 от 1.09.89 «О мерах помощи Приморскому краю в ликвидации последствий стихийного бедствия» и приказом Министерства Транспортного строительства СССР №108 от 18.10.89 «О строительстве мостов и восстановлении автомобильной дороги в Приморском крае». В задачу исследования входил анализ прохождения высокого осеннего паводка 1989 г., приведшего к подтоплению населенных пунктов и чрезвычайным условиям эксплуатации Дальневосточной железной дороги на участке ст. Чалданка — ст. Дальнереченск, и получение данных о характеристиках потока в рассматриваемом районе при различных вариантах усиления железнодорожных мостов.

В основу методики исследования положено численное моделирование гидрологической обстановки в районе железнодорожной линии в расчетных условиях с использованием топографических данных, подготовленных на основании тщательно выполненных Дальгипротрансом инженерно-геодезических изысканий.

По результатам проведенных исследований разработаны рекомендации, необходимые для комплексного решения задачи реконструкции участка железной дороги ст. Чалданка — ст. Дальнереченск.

Гидроморфологические и ситуационные условия в районе участка железнодорожной линии Чалданка — Дальнереченск

Характеристика района

На рассматриваемом участке Дальневосточной железной дороги в 30-х годах прошлого века из военных соображений сооружен отдельный (нечетный — по нему идут поезда на Хабаровск) путь, отстоящий от четного на расстоянии до 9 км. Нечетный путь пересекает два водотока — реки Б. Уссурка и Малиновка — трех- и четырехпролетными мостами по схемам 3 x 87,6 м и 4 x 33,6 м соответственно. Реки в междупутье сливаются, и четный путь пересекает реку Б. Уссурка трехпролетным мостом (построен в 1887 г) по схеме 3 x 88,5 м.

В междупутье и на прилегающих к железнодорожной линии участках расположены населенные пункты (в том числе такие крупные, как г. Дальнереченск), соединенные автомобильными дорогами с различными типами покрытия. Из автомобильных дорог, влияющих на ситуационные условия в рассматриваемом районе, следует отметить дорогу Хабаровск-Владивосток, пересекающую р. Б. Уссурка мостом длиной 950 м и р. Малиновка мостом длиной 264 м, а также дорогу к поселку Звенигородка по водоразделу бассейнов рек Б. Уссурка и Малиновка.

Реки Б. Уссурка и Малиновка относятся к бассейну р. Усури. Площади бассейнов в створе нечетного пути равны 23 тыс. км² для р. Б. Уссурка и 6,5 тыс. км² для р. Малиновка. Пересекаемые реки относятся к полугорному типу, русла их сложены гравийным и гравийно-галечным материалом со средним диаметром частиц до 30 мм. В районе железнодорожной линии из-за близости устья уклоны рек уменьшаются до 0,5–0,2 м/км. По внешним признакам русло р. Малиновки развивается по схеме свободно незавершенного меандрирования, его ширина до 100 м. Русло Б. Уссурки извилистое с характерным для пойменной многорукавности расчленением на большое число рукавов и протоков. Ширина главного русла доходит до 200 м. Реки, пересекаемые железнодорожной линией, следует отнести к хорошо изученным в гидрологическом отношении: наблюдения за расходами и уровнями воды (правда, не систематически) ведутся с 1915 – 1927 годов. Водомерные посты на р. Б. Уссурка расположены в непосредственной близости от створов мостовых переходов. Ближайший водопост на р. Малиновка расположен в с. Веденка, что в 10 – 12 км от мостового перехода на нечетном пути; под этим мостом фиксируются экстремальные уровни. Характерные расходы и уровни воды в створах мостовых переходов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Месторасположение мостового перехода

Месторасположение мостового перехода	Расчетный расход, 1%		Наибольший расход, 0,33%		Паводок 1989г. (без прорана)	
	Расход м ³ /с	Уровень м	Расход м ³ /с	Уровень м	Расход м ³ /с	Уровень м
р. Б. Уссурка, четный путь	9000	59,18	11910	59,58	9960	58,64
То же, нечетный путь	7850	62,85	10340	63,15	7960	62,78
р. Малиновка, нечетный путь	3120	61,12	4150	61,27	2000	60,90

Паводок 1989 г.

Муссонная циркуляция атмосферы вызвала паводок, прошедший в августе 1989 г. Он был одним из наиболее высоких за весь период существования железной дороги и причинил значительные разрушения. Практически на всем протяжении железнодорожной линии насыпь была подтоплена до уровня подошвы шпал; на многих участках наблюдались деформации низового откоса насыпи в виде просадок до 30 см. Были подтоплены населенные пункты в районе железной дороги, в том числе и окраина г. Дальнереченска. Как утверждают очевидцы, по руслу Б. Уссурки плыли разрушенные строения и скот; авторы видели перевернутые дачные домики перед мостовым переходом через р. Малиновку на нечетном пути (рис. 1). На этом переходе, а также на нечетном мосту через реку Б. Уссурка вода переливалась через струнаправляющие дамбы, в результате чего произошло их разрушение.

Для снижения уровней воды было решено взорвать участок автодороги Хабаровск-Владивосток на правобережной пойме р. Б. Уссурка. Через образовавшейся проран шириной около 100 м поток устремился к совмещенной насыпи железной дороги перед обходом (со стороны Хабаровска), причинив в конечном счете значительный ущерб народному хозяйству. Наряду с разрушенным участком автомобильной дороги из-за большого объема хлынувшей воды был разрушен однопролетный мост с отверстием шириной 6,5 м на 8858-ом км железнодорожной линии в результате подмыва устоев (рис. 2). В критическом состоянии оказались и три других подобных моста на этом участке железной дороги (на 8856, 8859 км и 1 км нечетного пути) несмотря на попытки защиты их крупными бетонными блоками.

На месте разрушенного малого моста образовался проран в насыпи шириной около 45 м и глубиной размыва до 10 м, однако размеры образовавшегося отверстия оказались недостаточными, чтобы без значительного перепада уровней пропустить поступающий к нему расход воды (как выяснилось по результатам расчетов — 950 м³/с). В результате оказались подтоплены жилые постройки ст. Эбергارد.

Проектные решения

Сразу же после паводка в Минтрансстрое СССР состоялось техническое совещание по капитальному восстановлению земляного полотна на рассматриваемом участке железной дороги, на котором было решено построить два новых двухпролетных моста по схеме 2 x 55 м или 2 x 66 м на местах проранов на железной и



Рис.1. Перевернутые дачные домики на пойме перед мостовым переходом через р. Малиновку

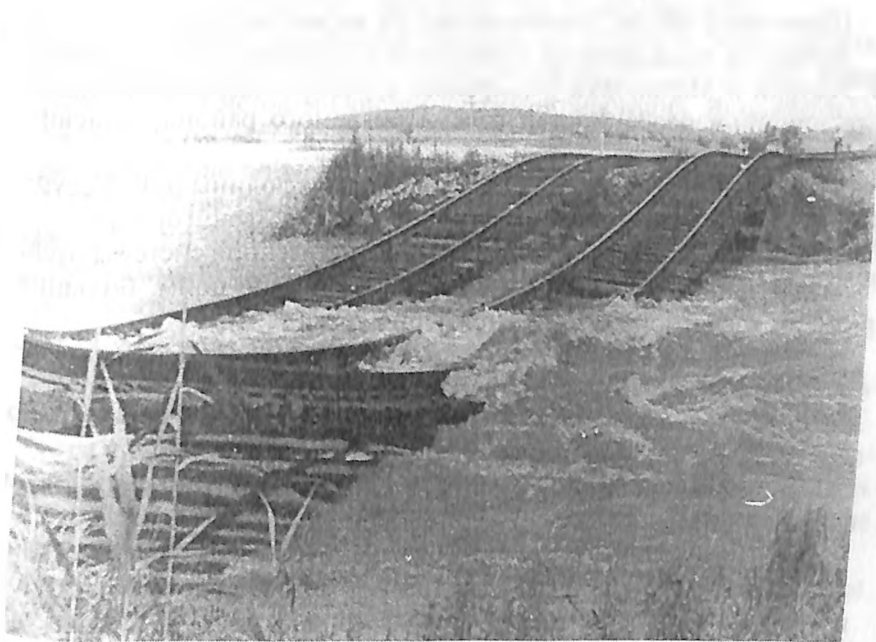


Рис.2. Разрушение малого моста и железнодорожного полотна Транссибирской магистрали во время паводка

автомобильных дорогах Хабаровск-Владивосток. Этот проект являлся логическим продолжением принятого в период паводка 1989 г. решения отвода воды от железнодорожных мостов.

После подробного изучения обстоятельств прохождения осеннего паводка 1989 г. появились сомнения в целесообразности строительства новых мостов. Требования более детальной проработки вопроса для принятия оптимального проектного решения были высказаны на техническом совещании у директора Дальгипротранса в сентябре 1989 г. В октябре 1989 г. ЦНИИСом и Мосгипротрансом были подготовлены «Предварительные соображения по повышению надежности работы участка ст. Чалданка — ст. Дальнереченск Дальневосточной железной дороги», в которых указывались недостатки строительства новых мостов и предлагалось рассмотреть вариант усиления (увеличения отверстий) мостов на железнодорожной линии через р. Б. Уссурка. Анализ предлагаемых проектных решений дается в последующих разделах.

Численное моделирование течений потока в районе железнодорожной линии

Постановка задачи. Математическая модель явления

Методика исследования паводкового течения в долинах рек Б. Уссурки и Малиновки выбиралась с учетом гидравлических и ситуационных особенностей рассматриваемого района, описанных выше. К ним относятся:

возможность поступления части расхода из долины р. Б. Уссурка в долину р. Малиновки через автодорогу на Звенигородку;

сильная извилистость русл, наличие разветвленной системы русел; малая ширина русл по отношению к ширине пойм, большие размеры расчетной области (примерно 25 x 25 км);

переменный по длине уровень воды в р. Уссури, который является граничным условием модели;

наличие сети железных и автомобильных дорог, существенно влияющих на течения в расчетной области;

наличие пяти существующих и двух новых мостов, в том числе на поймах.

Все перечисленные факторы оказываются взаимосвязанными, в силу чего применение традиционных методов расчета расходов и уровней воды (например, морфометрических) в указанных условиях не представляется возможным. Физическое моделирование также затруднено в силу разномасштабности русловых и пойменных участков, больших перепадов уровней, необходимости сильного искажения геометрических масштабов модели.

Напротив, математическая и численная модель паводкового течения, реализованная в виде комплекса программ «FLOOD» [1 ... 4], позволяет учесть все отмеченные выше особенности. Модель оттарирована на данных экспериментальных исследований русло-пойменного потока, специально проведенных с этой целью; по ней проведены расчеты многих реальных объектов. По сведениям разработчиков модели, ее аналоги в России и за рубежом в настоящее время отсутствуют.

Суть модели состоит в том, что по вертикали течение делится на два слоя: слой воды над поймой и над руслом выше бровок и слой воды в русле ниже бровок. Для верхнего слоя записываются двумерные (плановые) уравнения гидравлики, для нижнего (в бровках русла) — одномерные уравнения гидравлики вдоль русл. На поверхности раздела верхнего и нижнего слоев ставятся специальные условия стыковки, учитывающие взаимодействие руслового и пойменного потоков, в том числе возможность перетекания воды из русла на пойму и обратно. При этом направления течения в русле и на пойме выше бровок русла могут не совпадать, что наблюдается, например, на излучинах рек.

Математическая формулировка модели здесь не приводится (см. [1 ... 3]). Отметим, что используются уравнения Сен-Венана, решаемые на ЭВМ методами численного интегрирования. Исходными данными для расчета являются отметки дна и коэффициенты шероховатости в узлах элементов сетки, на которую разбивают всю область.

В качестве граничных условий должны быть заданы удельные расходы на одной границе и уровни на другой границе области. Программа включает блоки контроля исходных данных и вывода результатов на печать.

Методика численного моделирования. Варианты расчетов

Первым этапом подготовки к численному моделированию является схематизация области течения. Верхняя граница области течения была выбрана прямолинейной примерно по морфоствору №1, нижняя граница принималась проходящей по р. Уссури. Боковые границы области течения, через которые вода не протекает, были выбраны следующим образом:

по границе правой поймы р. Б. Уссурка (там, где начинается заметное повышение рельефа);

на левой пойме р. Малиновки — по автодороге на пос. Веденку, далее по железнодорожной линии нечетного пути до пересечения с четным, далее по четному пути и далее по границе левой поймы р. Б. Уссурка от моста на четном пути до впадения в р. Уссури.

Русла были схематизированы линиями с учетом крупных излучин и рукавов, дороги и существующие мосты нанесены без каких-либо изменений. Ширины и глубины русел принимались по данным натурных съемок.

Вторым этапом подготовки данных являлось построение расчетных сеток. Вся область течения покрывается треугольной сеткой конечных элементов таким образом, чтобы все границы, русла, дороги попадали на грани и в узлы сетки. Для построения использовался пакет программ «TRIANA» [5]. Было построено несколько различных вариантов сетки, соответствующих разным расчетным вариантам:

для паводка 1989 г.;

для варианта с новыми пойменными мостами (рис.3);

для варианта с увеличенными отверстиями мостов на р. Б. Уссурка;

для новых мостов и существующих с увеличенными отверстиями.

Сетки содержали свыше 1000 узлов и более 1700 элементов.

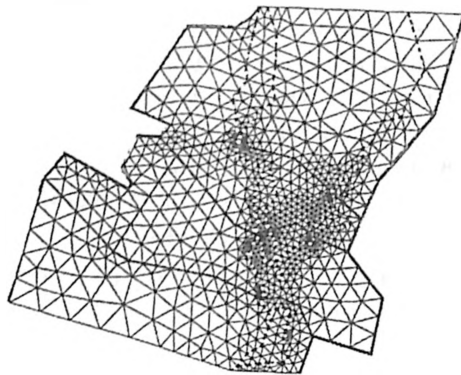


Рис.3. Сетка конечных элементов для варианта с пойменными мостами

Третьим этапом подготовки данных являлось задание отметок поверхности поймы и коэффициентов шероховатости. Отметки переносились в память ЭВМ с карты в масштабе 1:25000, а также с продольных профилей железных и автомобильных дорог, продольных съемок русел, поперечников, крупномасштабных фрагментов вблизи мостовых переходов. Коэффициенты шероховатости n в формуле Маннинга для русла и поймы выбирались с учетом характера местности и растительного покрова на основе уже имеющегося опыта численного моделирования аналогичных объектов. Было принято для поймы $n = 0,05$, для русла $n = 0,025$.

Последним, четвертым, этапом подготовки данных являлось задание граничных и начальных условий для расчета. На входной (верхней) границе, там где поток поступает на участок, задавали расход воды. Для паводка 1989 г. (расход 1% вероятности превышения) принимался $Q_{1\%} = 10000 \text{ м}^3/\text{с}$, причем расход воды, проходящей по речной долине р. Малиновки, составил $2000 \text{ м}^3/\text{с}$, а по р. Б. Уссурка — $8000 \text{ м}^3/\text{с}$. Это распределение расходов включало перетекание $500 \text{ м}^3/\text{с}$ из долины р. Б. Уссурка в долину р. Малиновки выше расчетной области. Последнее, по-видимому, близко к истине, так как рассчитанные уровни воды в этом случае оказались близкими к измеренным в паводок 1989 г.

Для паводка обеспеченностью 0,33% принималось $Q_{0,33\%} = 13400 \text{ м}^3/\text{с}$, причем для р. Б. Уссурки $9700 \text{ м}^3/\text{с}$, а для р. Малиновки $3700 \text{ м}^3/\text{с}$ с учетом того, что $600 \text{ м}^3/\text{с}$ перетекает в р. Малиновку выше расчетной области.

На нижней (выходной) границе задавали уровни свободной поверхности воды, которые принимались совпадающими с уровнями $Z_{\text{пав}}$ в р. Уссури при соответствующем паводке. В устье р. Б. Уссурка для 1989 г. принимали $Z_{\text{пав}} = 57,82 \text{ м}$ с изменением вверх и вниз по течению р. Уссури из расчета $0,1 \text{ м}/\text{км}$, а для наибольшего расхода брали $Z_{\text{пав}} = 58,2 \text{ м}$, что соответствует 1% уровню р. Уссури, поскольку принимаемая в расчетах вероятность превышения для более крупной реки должна быть больше. Отметим, что по результатам расчетов изменение уровней р. Уссури на $0,3 - 0,4 \text{ м}$ практически незаметно уже у четного пути с низовой стороны и тем более совершенно не влияет на уровни выше мостового перехода через р. Б. Уссурка на четном пути.

После подготовки исходных данных и внесения их в память ЭВМ приступали к проведению расчетов. Сначала моделировался паводок 1989 г. После установления решения (примерно 1/2 ч. на ЭВМ ЕС-1045) с описанными выше исходными данными и распечатки результатов оказалось, что расхождение рассчитанных и измеренных на месте уровней воды составляет не более $5 - 10 \text{ см}$ (рис. на цветной вкладке). Это свидетельствует о том, что и коэффициенты шероховатости и распределение расходов между долинами рек Б. Уссурки и Малиновки оказались выбранными правильно, и, следовательно, с такими данными можно проводить и другие серии расчетов.

Следующей была смоделирована ситуация после взрыва автодороги Хабаровск-Владивосток, т.е. открыты два новых отверстия на автомобильной и железной дорогах, по площади живых сече-

ний близкие к образовавшимся после взрыва проранам. В эти отверстия пошло $950 \text{ м}^3/\text{с}$ (примерно 10% суммарного расхода).

Затем были рассчитаны на однопроцентный расход проектируемые новые мосты с учетом размыва до галечникового основания (на автодороге до отметки 55 м, на железной дороге до отметки 50 м). По сравнению с вариантом 1989 г (после образования проранов) уровни перед новыми мостами значительно снизились, однако проходящий через них расход увеличился всего на $100 \text{ м}^3/\text{с}$ (до $1050 \text{ м}^3/\text{с}$), а уровни у существующих мостов практически не изменились. Это связано с тем, что участок поймы между проектируемыми мостами не может в рассматриваемой ситуации пропустить больше $1100 \text{ м}^3/\text{с}$, поэтому любое увеличение отверстий в проектируемых мостах уже не приведет к увеличению пропускаемого расхода. По этой причине размеры отверстий новых мостов не варьировали.

Поле средних по глубине скоростей течения на пойме (в центрах треугольных элементов) и в руслах для этого случая представлено на рис. 4, зоны и глубины затопления в паводок 1989 г. в цветовой заливке, отметки водной поверхности на пике наводнения приведены на цветной вкладке.

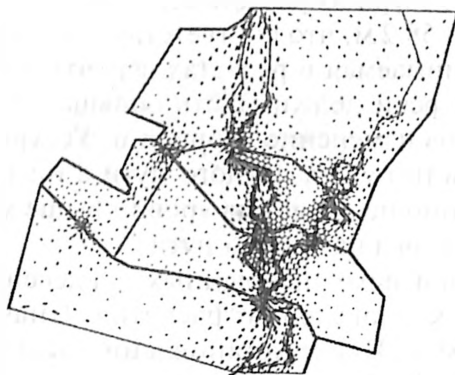


Рис.4. Поле скоростей течения при расходе 1%-ой обеспеченности

Аналогичный расчет с дополнительными мостами, но при трехсотлетнем паводке проводился для определения необходимого возвышения бровок земляного полотна.

Были также проведены расчеты с увеличенными отверстиями мостов через р. Б. Уссурка на четном и нечетном путях при различном числе дополнительных пролетных строений при наличии и отсутствии новых мостов с приподнятой автодорогой на Звенигородку, не допускающей перелива.

Следует подчеркнуть, что проведенное многовариантное моделирование позволяет оценить эффективность практически любого проектного решения, аналогичного рассмотренным, так как промежуточные и комбинированные ситуации легко анализируются по рассчитанным «базовым» уже без применения ЭВМ.

Выводы

1. Математическая модель потока аттестирована по гидрологической ситуации, создавшейся в осенний паводок 1989 г. Хорошее совпадение расчетных и натуральных данных (зафиксированных уровней воды в районах мостовых переходов на четном и нечетном путях железнодорожной линии) говорит, во-первых, о правильном отображении математической моделью топографических и ситуационных условий и, во-вторых, о надежных гидрологических характеристиках (расходах и уровнях воды), использованных в расчетах.
2. В паводок 1989 г. проран, образованный в насыпи автомобильной дороги, пропускал до $950 \text{ м}^3/\text{с}$. Это незначительно (от 10 до 30 см) снизило уровень воды в районе переходов на железнодорожной линии и в населенных пунктах Сальское, Дальнереченск. Расход воды, поступающий через проран к железной дороге, явился причиной сноса одного и подмыва двух малых мостов.
3. Пропускная способность новых мостов в месте прорана на автомобильной дороге Хабаровск-Владивосток и на железнодорожной линии вместо снесенного малого моста ограничена пропускной способностью правой поймы р. Б. Уссурка и составляет $1100 \text{ м}^3/\text{с}$ в паводок 1%-ой вероятности и $1600 \text{ м}^3/\text{с}$ — при вероятности 0,33%. Поэтому с учетом геологических условий в створах проектируемых переходов мосты по схемам один пролет длиной 66 м и два пролета по 66 м имеют практически одинаковую водопрпускную способность и, следовательно, увеличение отверстий мостов свыше 66 м нерационально. К недостаткам устройства двух новых мостов относится наличие неорганизованного (блуждающего по пойме) потока с расходом $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ и более на участке свыше 7 км с непредсказуемостью его поведения и, в частности, возможностью нарушения устойчивости насыпи железной дороги нечетного пути. Под нарушением устойчивости насыпи понимается подход к нему формирующегося русла между проектируемыми мостами. Блуждающий поток является причиной нарушения условий землепользования на участке порядка 30 км^2 (только между мостами).
4. Для снижения уровней воды более рациональным решением является увеличение отверстий существующих мостов через р. Б. Ус-

сурку на четном и нечетном железнодорожных путях. Расчетами установлено, что увеличение отверстия на нечетном пути через р. Б. Уссурка на 2 x 66 м приводит к более значительному снижению уровней воды перед мостовым переходом, чем при устройстве дополнительных мостов. Аналогично увеличение отверстия моста на четном пути на 3 x 66 м гораздо эффективнее устройства дополнительных мостов.

5. Рекомендуется рассмотреть вариант проектного решения с совмещением четного и нечетного пути с увеличением отверстия моста через р. Б. Уссурка на 4 x 66 м и разборкой части земляного полотна существующего нечетного пути. При этом строить пойменный мост на автомобильной дороге Хабаровск-Владивосток не следует.

6. Обращается внимание на значительные скорости течения (до 1...1,2 м/с) вдоль полотна автодороги Хабаровск-Владивосток на правой пойме р. Б. Уссурка, а также большой перепад уровней с верховой и низовой стороны (1,5...2,0 м).

7. При выборе окончательного проектного решения должно быть проведено технико-экономическое сравнение вариантов с учетом ущерба от подтопления населенных пунктов и земельных угодий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Беликов В.В., Милитеев А.Н.** Двухслойная математическая модель катастрофических паводков. //В сб. Вычислительные технологии». т.1. №3. Новосибирск:1992.
2. **Беликов В.В., Милитеев А.Н.** Компьютерное моделирование катастрофических паводков. //Труды Межд. Симпозиума «Гидравлические и гидрологические аспекты надежности и безопасности гидротехнических сооружений». С.-Петербург:2002. докл. на CD-ROM.
3. **Belikov V.V., Militeev A.N., Rodionov V.V.** Two-layer model for flood computation in complicated channel system with erosion riverbed with floodplain. Proc. Conf. «RIVER FLOW 2002», Bousmar&Zech (eds.). 2002 Swets&Zeltinger. Lisse. ISBN 905809 509 6.
4. **Беликов В.В., Милитеев А.Н.** Комплекс программ для расчета речных течений «FLOOD». Российское агентство по патентным и товарным знакам. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2002610941. М.: 2002.
5. **Беликов В.В.** Вычислительный комплекс TRIANA — генератор сеток треугольных конечных элементов в произвольных плоских областях. /ГосФАП СССР, П007705. 1984.

О ПЛАНИРОВАНИИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ РИСКА УЩЕРБОВ ОТ НАВОДНЕНИЙ

Беднарук С.Е., инженер (МПР России)

Крупнейшие наводнения последнего десятилетия в мире и, особенно, в Европе (1993, 1995, 1997, 1998, 2002) и России (2001, 2002) показали возможности и недостатки существующих систем противопаводковой защиты, включая их техническую инфраструктуру (т.е. дамбы, водохранилища), прогнозирование, оповещение и другие оперативные действия, управление пропуском паводков, подготовку противопаводковых программ и планов действий, функционирование систем водоснабжения и электроэнергетики, а также информирование общественности.

Хотя наводнения являются только одним из множества природных катаклизмов, которые угрожают населению, они относятся к наиболее частым и приносящим наибольший урон, что видно из таблиц 1, 2, 3.

Таблица 1

Число природных бедствий по регионам планеты и по типам за 25 лет (1971-1995 гг.)

	Африка	Америки	Азия	Европа	Океания	Всего
Землетрясения	41	135	252	165	85	678
Засухи и голод	296	53	88	16	16	469
Наводнения	184	382	653	154	135	1 508
Оползни	12	90	99	21	10	232
Ураганы	84	454	685	228	199	1 650
Вулканы	9	33	46	16	6	110
Другие	205	99	189	94	6	593
Всего	831	1 246	2 012	694	457	5 240

Степень «паводковой угрозы», которая определяет частоту наводнений, величину материальных потерь и человеческих жертв, определяется природными и антропогенными факторами и, в принципе, не зависит от функционирования систем противопаводковой защиты.

Защита от наводнений не может быть абсолютной, может быть гарантирован лишь некоторый уровень защиты от них. Но эта защита должна быть действенной, оптимальной, экономически оправданной. Масштабы наводнений последних лет показали ее несовершенство и убедительно диктуют необходимость

Таблица 2

Воздействие на население природных бедствий по типам.
Среднегодовые величины за 25 лет (1971-1995 гг.)

	Землетрясения	Засухи и голод	Наводнения	Ураганы	Оползни	Вулканы	Всего
Погибло	19051	73621	12732	16075	786	1017	123281
Ранено	26333	0	20705	9975	250	284	57547
Пострадало	1688327	60692579	60041340	11130893	137608	94325	133785071
Без крова	237562	22720	3241365	1142656	107519	15144	4766965
Всего	1971272	60788920	63316142	12299598	246163	110769	138732864

Таблица 3

Подсчитанный средний ежегодный ущерб от природных бедствий по регионам планеты и по типам за 5 лет (1991 — 1995 гг.), тыс. долл. США

	Африка	Америки	Азия	Европа	Океания	Всего
Землетрясения	281 200	26 835 660	108 681 322	372 500	255 000	136 425 682
Засухи и голод	98 739	1 860 000	82 755	1 188 600	1008 400	4 238 494
Наводнения	240 474	19 674 365	98 518 290	84 222 045	11 100	202 666 274
Оползни	Нет данных	25 400	222 200	60 100	Нет данных	307 700
Ураганы	150 565	54 705 154	29 672 016	1 796 960	1316 800	87 686 495
Вулканы	Нет данных	10 000	212 888	Нет данных	400 000	622 288
Другие	Нет данных	4 345 151	950 000	2 103 299	3036 300	7 398 450
Всего	770 978	107 455 730	238 339 471	89 743 504	6072 600	439 345 983

концептуального изменения подходов к решению вопросов защиты от наводнений или их предупреждения.

Планирование мероприятий по защите от наводнений нельзя сводить к защите отдельных объектов от опасности. Нужен широкомасштабный подход, охватывающий весь речной бассейн (водосбор) и учитывающий взаимосвязь и взаимозависимость осуществляемых и планируемых мероприятий, их эффективность. Добиться этого можно, сосредоточив планирование противопаводковых мероприятий

на бассейновом уровне, соединив его с территориально-строительным планированием, сделав его обязательным и определив приоритетное участие, права и полномочия местных органов власти.

Относительно редкая повторяемость крупных катастроф разочлаживает общество, ставит под сомнение необходимость масштабных мероприятий в этом плане. Возникает вопрос об уровне безопасности, его цене и о том, какой риск приемлет общество. Нужны способы (механизмы) и критерии этих оценок. Оптимальным методом решения вопросов представляется практическое применение понятия *риска ущерба от наводнений* и переход в постоянной деятельности к регулированию степени риска ущерба на территории бассейна.

Риск ущерба от наводнений (РУ) определяется как произведение риска возникновения наводнения (РН) и уязвимости зоны наводнений, т.е. суммарной стоимости материальных ценностей, располагаемых на затопляемой этим наводнением территории, а также возможных людских потерь (У):

$$РУ = РН \times У.$$

Риск наводнения (РН) — величина, определяющая вероятность уровня затопления, которая рассчитывается на основании наблюдений и соответствующих гидрологических расчетов.

Суммарная стоимость всех ущербов (или уязвимость У) при затоплении может быть определена по существующим и разрабатываемым методикам определения размера вреда от затоплений.

Риск ущерба будет в конкретных величинах отражать состояние уровня безопасности и эффективность реализованных мероприятий.

Уменьшение риска ущерба может быть достигнуто различными способами:

снижение риска наводка (например, путем обеспечения большего пространства для реки, или, наоборот, строительством защитных дамб, или повышением инфильтрационной способности водосборной территории бассейна реки);

уменьшение уязвимости (требует установления строгого контроля за урбанизацией - запрета нового строительства на периодически затопляемых территориях и ограничения всех видов хозяйственной деятельности на этих территориях);

укрепление растущего общественного осознания природного характера наводнений и соответствующих рисков (необходимость обеспечения осведомленности и понимания общественностью рисков, связанных с наводнениями);

улучшение систем прогнозирования и оповещения.

Меры, которые предполагается принять, и их стоимость должны регулироваться в зависимости от материальных ценностей и человеческих жизней, которые должны быть защищены. Строительство и наращивание защитных дамб должно стать последней мерой противопаводковой защиты и может быть оправдано лишь в исключительных случаях, связанных со значительными социально-экономическими издержками.

Бассейновое планирование означает, что по основным бассейнам рек (прежде всего паводкоопасным) разрабатывается план действий по снижению рисков ущерба от наводнений. Такое планирование (соединенное с территориальным планированием) должно стать обязательным, закрепленным законодательно.

План действий — это стратегическая программа обустройства бассейна реки и соответствующий пакет документов, включающие четкий набор мероприятий краткосрочного и долгосрочного характера, направленных на существенное сокращение рисков ущерба от затоплений территорий. План включает количественные оперативную и стратегическую цели.

Первоначально трудно определить количественно оперативную цель, поскольку нет всех необходимых данных. Однако необходимо незамедлительно начать действия, обеспечивающие в ближайшие год-два получение количественных формулировок целей для разработки и уточнения планов действий по основным бассейнам рек России. Регулярно корректируемый план действий должен давать более точное понимание задач, которые предстоит выполнить.

В соответствии с принимаемыми принципами планирования и целями типы мероприятий должны быть отнесены к следующим категориям:

- федеральные и региональные политические и нормативно-правовые мероприятия;
- задержка воды на водосборной площади бассейна;
- мероприятия в гидрографической системе;
- технические мероприятия непосредственной защиты;
- системы прогнозирования и оповещения и имитационные модели.

Весь набор мероприятий должен привести, с одной стороны, к уменьшению риска затоплений, а с другой стороны, к снижению уязвимости с целью уменьшения ущерба.

В следующей таблице 4 показаны мероприятия, отнесенные к различным категориям. Также указаны части оперативной цели, достижение которых обеспечивают эти мероприятия.

Список возможных мероприятий по категориям

Федеральные и региональные политические и нормативно-правовые мероприятия: <i>Обеспечивают достижение оперативной цели в целом.</i>
Картографирование риска ущербов на территориях, подверженных затоплениям (карты риска).
Охрана территорий, подверженных затоплениям, их идентификация, резервирование потенциально подверженных затоплению территорий. Строгий контроль использования земель на этих территориях.
Адаптация существующих строений к паводковым ситуациям.
Пересмотр строительных норм и правил.
Административное регулирование, уменьшающее экстенсивное использование земель, подверженных затоплению.
Административное регулирование, обеспечивающее оптимизацию инфильтрации дождевых осадков на отведенных в пользование участках.
Адаптация уровня защиты к ценности имущества, нуждающегося в защите от паводков.
Принятие норм, касающихся регулирования русл рек (например, ликвидация или перенос дамб для обеспечения дополнительного пространства для аккумуляции паводковых вод).
Мероприятия, касающиеся категорий непосредственно подверженных риску: граждан, промышленных объектов, ... <i>Обеспечивают повышение знаний о наводнениях.</i>
Осуществление информационных кампаний, нацеленных на освещение рисков, связанных с паводками, и установленных мер по ограничению этих рисков.
Создание системы местной помощи в паводковых ситуациях.
Учения по кризисным ситуациям, связанным с паводками.
Развитие страховых систем для компенсации ущерба, вызванного паводками.
Мероприятия по задержке воды на водосборной площади бассейна: <i>Обеспечивают снижения риска наводнений.</i>
Изучение влияния и эффективности различных видов мероприятий.
Изучение влияния видов использования земель на генезис паводков.
Обеспечение увеличения инфильтрации и замедления стока воды.
Разделение систем канализации и ливневого стока.
Создание ливневых емкостей для частичного перехвата дождевого стока.
Выбор территорий, используемых для «задержки воды».

Мероприятия в гидрографической системе: <i>Обеспечивают снижение риска наводнений.</i>
Изучение влияния и эффективности различных видов мероприятий.
Изучение возможностей снижения уровней воды и пиковых расходов.
Восстановление естественных водотоков.
Изучение возможностей создания емкостей для срезки пиков паводков.
Совершенствование управления гидроузлами и водохранилищами для регулирования пропуска половодий и паводков.
Создание или восстановление зон затопления паводковыми водами.
Увеличение пропускной способности рек путем дноуглубительных и русловыправительных работ.
Технические мероприятия непосредственной защиты: <i>Обеспечивают снижение риска наводнений.</i>
Поддержание и наращивание защитных дамб.
Сооружение новых защитных дамб, но только в случаях угрозы значительных социально-экономических издержек, с одновременным выполнением компенсационных мероприятий при необходимости.
Строительство противопаводковых водохранилищ или водохранилищ комплексного назначения.
Системы прогнозирования и оповещения: <i>Обеспечивают достижение оперативной цели в целом.</i>
Развитие систем оперативной информации и оповещения.
Использование прогностических моделей в кризисном управлении.
Разработка и развитие имитационных моделей.
Восстановление и развитие наблюдательной сети.
Разработка и развитие бассейновых геоинформационных систем.

Для определения эффективности реализуемых мероприятий их результаты должны периодически сопоставляться с оперативной целью на основе установленных оценочных индикаторов. Таблица 5 представляет первоначальный набор таких индикаторов для первой стадии реализации плана действий. Этот набор может сохраняться или прогрессирующе расширяться в зависимости от исследований, проводимых в ходе реализации плана действий.

Бассейновый подход означает смещение основных акцентов с федерального уровня на региональный, что будет соответствовать изменениям, произошедшим в социально-экономичес-

Таблица 5

Оперативная цель: Снижение риска ущербов на территориях, подверженных затоплению

РЕАЛИЗАЦИЯ ЦЕЛИ	ОЦЕНОЧНЫЕ ИНДИКАТОРЫ
Сокращение риска затопления	Длина участков рек с увеличенной пропускной способностью, км Площадь поверхности с улучшенной инфильтрацией, км ² Объем добавленной аккумулирующей емкости, км ³ Длина восстановленных меандрирующих участков реки, км Длина восстановленного русла, км
Уменьшение уязвимости	Доля картографированной территории, подверженной риску затопления, % Доля регулируемых территорий в зоне риска, %
Укрепление знаний о паводках и рисках, связанных с ними.	Доля населения осведомленного о риске затоплений, %
Совершенствование систем прогнозирования и оповещения	Надежное увеличение заблаговременности прогнозов водности. Длина основной реки и ее притоков, покрытых гидродинамической моделью. Количество подбассейнов, покрытых моделью формирования стока. Площадь территории, покрытой адекватной системой помощи для принятия оперативных решений в кризисных центрах. Планы спасения, доступные через уполномоченные власти. Объем телеметрии (расходы, уровни, осадки). Объем обмена данными между центрами управления

ком состоянии страны и должно обеспечить эффективность противопаводковых мероприятий. Основные ущербы при наводнениях относятся к местной экономике, инфраструктуре, частным лицам, а ущербы, которые можно было бы отнести к Федеральным, незначительны. Поэтому решение вопроса защиты от наводнений при федеральном подходе через разработку Федеральных целевых программ (ФЦП) представляется не со-

ответствующим современным тенденциям экономического развития. Бассейновые планы действий по сравнению с ФЦП должны обеспечить:

широкое вовлечение в разработку и реализацию программ субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, водопользователей и общественности;

большую управляемость и прозрачность;

большую глубину изучения и использования особенностей регионов;

динамичность и эффективность принимаемых мер;

лучшую обеспеченность финансирования, стимулирования страхования (как источника финансирования при возмещении ущерба) и т.д.

Бассейновый подход к планированию не исключает составления укрупненных сводных программ по Федерации и предполагает самое активное участие в этом всех заинтересованных федеральных органов исполнительной власти и федерального бюджета.

Ведение плана в существующей структуре управления водным хозяйством должно быть возложено на бассейновые водные управления (БВУ) МПР России, которые занимаются вопросами наводнений, имеют опыт ежегодной работы по подготовке к пропуску половодий, работах в случаях чрезвычайных ситуаций и т.п. При этом, в перспективе, существенно должно вырасти их роль, а, значит, и полномочия, т.е. БВУ фактически должны стать главными органами исполнительной власти по бассейну в вопросах водного хозяйства в целом и противопаводковых мероприятий в частности. А контролироваться они должны Бассейновыми водными Советами, представляющими собой «водные парламенты» крупных бассейнов рек, в состав которых будут входить как представители заинтересованных федеральных органов исполнительной власти, так и представители органов власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, водопользователей и общественности. Реализация такого подхода потребует определенных изменений в водном законодательстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Устойчивое предупреждение наводнений. Материалы семинара ЕЭК/ООН. Берлин. 7 – 8 октября 1999 г.
2. **Destructive Water: Water-Caused Natural Disasters, their Abatement and Control.** IAHS Publication no. 239. ISSN 0144-7815.
3. **Disaster Management. User Requirements Study: Space Technologies.** Canadian Space Agency. The SAR Corporation. March. 1998.

МАСШТАБЫ УЩЕРБОВ ОТ НАВОДНЕНИЙ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА*

Авакян А.Б., доктор геогр. наук, **Истомина М.Н.**, инженер
(ИВП РАН)

Рассматриваются наиболее крупные наводнения прошлого и настоящего, сгруппированные по их генезису (вызванные продолжительными дождями и ливнями, таянием снега, ледовыми заторами, прорывами подпруженных оползнями или ледниками озер, ветровыми нагонами морских и океанических вод, подводными землетрясениями или извержениями вулканов, разрушением или повреждением плотин), и их социально-экономические последствия. Приводятся основные данные по 562 наводнениям, произошедшим за 1998–2001 гг.

Парадоксально, но факт, что до сего времени масштабы социально-экономических последствий наводнений учитываются дилетантски, далеко не всегда и далеко не полностью. И это несмотря на то, что наводнения сопутствуют человеческому обществу на протяжении многих тысячелетий практически во всех странах мира. Чтобы не быть голословными, приводим лишь две странички из подготовленной ведущими специалистами многих стран мира книги «Стихийные бедствия: изучение и методы борьбы», изданной в 1974 г. в Нью-Йорке, Лондоне и Торонто и переизданной издательством «Прогресс» в 1978 г. в Москве (табл. 1) [10]. Скучность и беспомощность приводимых материалов настолько очевидна, что избавляет авторов от каких-либо комментариев. Вместе с тем, как увидит читатель из статьи, масштабы бедствий, причиняемых наводнениями, грандиозны и заслуживают пристального внимания специалистов и детального изучения.

По нашим оценкам, площадь паводкоопасных территорий составляет на земном шаре 3 млн. км², что сопоставимо с суммарной площадью всех государств Западной Европы. В районах, подверженных наводнениям, проживает ~ 1 млрд. человек. Данные о наводнениях прошлого неполны и отрывочны, однако представление об отдельных катастрофических наводнениях впечатляет и остается в памяти народов на многие столетия [1, 5]. К сожалению, ввиду разнохарактерности имеющихся материалов, что, вероятно, объясняется как объективными причинами (наличием данных), так и личными пристрастиями авторов, свести имеющиеся материалы в табличную форму не представляется возмож-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02-05-64115).

Крупнейшие наводнения на земном шаре

Дата	Место	Число жертв, чел.	Материальный ущерб
1	2	3	4
Июнь 1972 г.	Восток США	Свыше 100	2 млрд. долл.
Июнь 1972 г.	Рapid-Сити, Южная Дакота, США	215	100 млн. долл.
11-23 мая 1970 г.	Орадя, Румыния	200	Пострадало 225 населенных пунктов
25-29 января 1969 г.	Юг Калифорнии, США	95	
4 июля 1969 г.	Юг Мичигана и север Огайо, США	33	
23 августа 1969 г.	Виргиния, США	100	
29-31 мая 1968 г.	Север Нью-Джерси, США	8	140 млн. долл.
8-14 августа 1968 г.	Гуджарат, Индия	1000	
Январь-март 1967 г.	Штаты Рио-де-Жанейро и Сан-Паулу, Бразилия	Свыше 600	
26 ноября 1967 г.	Лиссабон, Португалия	457	
11-13 ноября 1966 г.	Рио-де-Жанейро, Бразилия	300	
3-4 ноября 1966 г.	Долина реки Арно, Италия	113	Уничтожены сокровища искусств во Флоренции и других местах
18-19 июня 1965 г.	Юго-запад США	27	
8-9 июня 1964 г.	Север Монтаны, США	36	
Декабрь 1964 г.	Запад США	45	
9 октября 1963 г.	Беллуно, Италия	Свыше 2000	Перелив воды через плотину Вайонт
14-15 ноября 1963 г.	Гаити	500	
27 сентября 1962 г.	Барселона, Испания	Свыше 4700	80 млн. долл.

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
31 декабря 1962 г.	Север Европы	Свыше 309	
Май 1961 г.	Центральные районы запада США	25	
2 декабря 1959 г.	Фрежюс, Франция	412	Разрушена плотина Мальпассе
4 октября 1955 г.	Пакистан и Индия	1700	Убытки в 63 млн. долл. от затопления 5,6 млн. акров посевных земель
1 августа 1954 г.	Область Казвин, Иран	Свыше 2000	
31 января – 1 февраля 1953 г.	Северная Европа	Свыше 2000	Опустошены прибрежные районы
2-19 июля 1951 г.	Канзас и Миссури, США	41	200 тыс. жителей лишились крова, 1 млрд. долл.
28 августа 1951 г.	Маньчжурия, КНР	Свыше 5000	
14 августа 1950 г.	Провинция Аньхой, КНР	500	Лишились крова 10 млн. чел., 5 млн. акров затоплено
Июль-август 1939 г.	Тяньцзинь, Китай	1000	Миллионы людей лишились крова
13 марта 1928 г.	Санта-Паула, Калифорния, США	450	Разрушена плотина в Сент-Франсис
25-27 марта 1913 г.	Огайо и Индиана, США	700	
1911 г.	Р. Янцзы, Китай	100000	
1903 г.	Хепнер, Орегон, Испания	Свыше 250	Город разрушен
31 мая 1889 г.	Джонстаун, Пенсильвания, США	Свыше 2000	
1887 г.	Хэнань, Китай	Свыше 900000	Разлилась р. Желтая, уничтожены многочисленные населенные пункты
1642 г.	Китай	300000	

ным, но внимательный читатель получит общее представление о наиболее грандиозных наводнениях прошлого и настоящего и об их социально-экономических последствиях. Сразу же следует оговорить, что география приводимых наводнений далеко не соответствует фактическому положению вещей, так как учет наводнений в наиболее страдающих от этого бедствия странах и в передовых экономически развитых государствах поставлен в целом существенно лучше, чем в отсталых развивающихся странах, практически не придававших значения исследованию наводнений и их социально-экономических последствий.

Насколько это было возможно, представление о наводнениях мы приводим как с учетом времени, когда они происходили, так по возможности и с учетом генезиса наводнений, что, с нашей точки зрения, представляет определенный интерес, так как подобная попытка делается впервые [4]. Естественно, что приводимые данные далеко не полны и не систематизированы. Но общее представление о географии и масштабах ущерба читатель получит.

Начнем с упоминания о библейском потопе, приведем, по преданию, к гибели всего человечества. В живых бог оставил праведника Ноя, который спасся со своей семьей на построенном им ковчеге. В литературных источниках сохранились упоминания о первых грандиозных наводнениях, которые произошли в первой половине четвертого и третьем тысячелетии до нашей эры в Месопотамии. Населению, проживавшему в долине Тигра и Евфрата, обжитые ими районы между горами и пустыней представлялись целым миром. Поэтому катастрофические наводнения, в которых погибла большая часть жителей долины, у немногих оставшихся в живых ассоциировались со всемирным потопом. В легендах древних шумеров, населявших это междуречье, есть упоминание о страшном наводнении, ниспосланном на землю богом Энке в наказание за грехи. Наводнение уничтожило Вавилонское царство, а его правитель Астра-Хазис избежал гибели, построив, подобно Ною, судно, поскольку был предупрежден свыше за 7 дней. Древние египтяне оставили сказания о катастрофических разливах Нила, происшедших в 3000 и в 3500 годах до нашей эры.

*Наводнения, вызванные продолжительными дождями и ливнями
(наводки)*

В течение столетий р. Хуанхэ называли «горе Китая». Одно из самых катастрофических наводнений произошло в 1332 г. В результате наводнения и свирепствовавшей в последующие годы «черной смерти» (чумы) погибли 7 млн. человек. Не менее крупное

наводнение произошло в долине этой реки осенью 1887 г. Было затоплено 11 городов и 300 деревень. По официальным данным наводнение унесло жизни 900 тыс. человек, а по данным неофициальных источников жертвами наводнения стали от 2 до 6 млн. человек, включая тех, кто погиб после наводнения от различных заболеваний, голода и телесных повреждений [13].

В 1931 г. в Китае на р. Янцзы от наводнения пострадали 40 млн. человек. Разбушевавшаяся стихия затопила более 300 тыс. км², что превышает территорию Великобритании. Погибли свыше 140 тыс. человек. Было разрушено 4 млн. домов. В некоторых городах вода держалась до 4 мес., а глубина разлива местами достигала 6 м. Еще более сильное наводнение произошло в долине этой реки в 1954 г., но благодаря хорошей организации и привлечению для борьбы с ним нескольких сотен миллионов человек ущерб был меньше, чем в 1931 г. Пострадали 18 млн. человек, погибли 33 тыс. человек. Было затоплено свыше 4 млн. домов. Суммарная площадь затопления составила 48 млн. га. Материальный ущерб был оценен в 10000 млн. юаней. Здесь же в 1995 г. было затоплено 14,4 млн. га территории. Количество пострадавших жителей превысило 200 млн. человек. В 1998 г. в результате катастрофического паводка погибли 1320 человек, пострадали 223 млн. человек, было снесено почти 5 млн. домов. Суммарная площадь затопления составила 21,2 млн. га, прямой экономический ущерб — 166600 млн. юаней (~ 20,8 млрд. долл.).

На территории Бангладеш с 1950 по 1988 гг. произошло 25 сильнейших наводнений. В 1970 г. от наводнения погибли 300 тыс. человек. В 1988 г. из общей площади территории страны было затоплено более половины — 82 тыс. км². От наводнения пострадало 7,2 млн. домов, погибли 2379 человек. Материальный ущерб составил около 2 млрд. долл.

Довольно часты наводнения в Индии. В 1978 г. в штате Пенджаб — самом экономически развитом районе страны — было затоплено 38 тыс. га посевов, пострадали около 60 тыс. человек. В штате Орисса затоплению подверглась территория в 160 тыс. га, пострадали 200 тыс. человек. В 1979 г. наблюдалось исключительное явление — катастрофическое наводнение в пустыне Тар, расположенной на северо-западе этой страны. После длительных и сильнейших ливней, вызванных приходом юго-западного муссона, обычно пересыхающая в зимний период р. Луни, протекающая в пустыне, вышла из берегов. В штате Раджастхан погибли 374 человек и 120 пропали без вести. Было разрушено более тысячи деревень, погибли 107 тыс. голов крупного рогатого скота, уничтожены посе-

вы на площади 56 тыс. га, разрушено 3200 колодцев. Во время наводнения 1980 г. по всей территории Индии было затоплено более 1 млн. га земель, 50 % из них составляли сельскохозяйственные угодья. Огромные массы воды, переполнившие водохранилища, привели к разрушению многих плотин, что еще более усугубило положение. В результате пострадали несколько миллионов человек, а общенациональный ущерб составил почти 300 млн. долл., большая часть которого пришлось на штаты, расположенные в долине Ганга.

Каждые несколько лет от наводнений страдают жители в долине крупнейшей реки США — Миссисипи. Одно из самых крупнейших наводнений произошло в долине нижней Миссисипи в 1927 г. Уровень воды у г. Кейро достиг небывалой высоты — 17 м над нулем. Вода перелилась через вдольбереговые дамбы и хлынула в защищенную часть долины, опустошая ее. Для спасения Нового Орлеана пришлось взорвать дамбы, чтобы они не стесняли водный поток. Через 10 лет наводнение еще большей силы обрушилось на приток Миссисипи — Огайо. Пришлось эвакуировать все население из зоны угрозы, простиравшейся на 2500 км по течению Миссисипи и примерно на 160 км в ширину. Затоплено было 72 тыс. км². Территория, подвергшаяся затоплению, оказалась в руинах. Длительное время в зоне бедствия отмечались вспышки эпидемических заболеваний. Имелось немало смертельных исходов. Подобными описаниями наводнений на реках США, включая конечно и Теннесси, можно было бы заполнить целую книгу. Так, в 1977 г. по территории этой страны прокатилась целая серия катастрофических паводков. В штате Пенсильвания наблюдался паводок, который бывает 1 раз в 500 лет. В районе города Джонстауна было разрушено 2 плотины, размывы дороги, слой наносов из песка и ила составлял несколько метров. Погибли или пропали без вести более 50 человек.

Не миновали и не минуют наводнения государства Европы. Наиболее показательными в этом отношении являются события, произошедшие во второй половине XIX века в Венгрии. Для защиты земель и построек в среднем и нижнем течении долины р. Тисы в целях увеличения пропускной способности в период прохождения паводка были спрямлены и углублены отдельные участки реки. В результате длина р. Тисы сократилась на 480 км. Там, где русловыправительные работы не проводились, была возведена система обвалования. Во время паводка 1879 г. углубленные и спрямленные участки русла пропустили гораздо больший объем максимального стока, чем в обычных условиях. Это привело к резкому повыше-

нию уровня воды в неуглубленных и неспрямленных участках, где пропускная способность осталась прежней. Давление воды на дамбы превысило расчетную нагрузку, что привело к их разрушению во многих местах. Прорвавшиеся воды затопили огромные территории пойменных земель. Наводнением был практически полностью разрушен г. Сегед. Катастрофические наводнения на р. Тисе в XX столетии происходили в 1927, 1947, 1957 гг.

Во Франции в 1910 г. произошло историческое наводнение на р. Сене. Воды реки затопили значительную часть г. Парижа. Под водой оказались многие площади и улицы, железнодорожные вокзалы и станции метрополитена. В 1970 г. сильному наводнению подвергся Париж и его пригороды на расстоянии 40 км от столицы.

В Италии в 1966 г. в результате многодневных ливневых дождей реки По и Арно вышли из своих берегов. Уровень р. Арно поднялся на 11 м — а это на 6 м выше оградительных дамб и набережных. Воды р. Арно затопили города Флоренцию и Пизу, а воды р. По — Ломбардскую низменность. Тот же мощный циклон вызвал штормовой нагон в Венеции. Но больше всех пострадала Флоренция. После схода воды город имел вид грязного болота. Материальный ущерб от этого наводнения, взятый в целом по долинам рек Арно и По, поистине огромен. Погибло 300000 га посевов, 50000 голов крупного рогатого скота. Всего убытки составили 640 млн. долл. Нанесен серьезный урон мировой культуре: погибло 400000 уникальных письменных источников, 2000 редких книг, пострадали картинные галереи, росписи на стенах и другие исторические и художественные ценности.

В начале августа 2002 г. катастрофические дождевые паводки прокатились по территории всей Европы. Первые сигналы бедствия стали поступать из Великобритании, Франции, Испании и Италии. В Великобритании затоплению подверглось практически все северо-восточное побережье. В Италии наводнение уничтожило тысячи гектаров виноградников. Обильные дожди вызвали интенсивный подъем воды в реках Австрии, Хорватии, Чехии, Германии, Венгрии и др. По данным средств массовой информации, в окрестностях Вены был зафиксирован рекордный уровень воды в р. Дунае за последние 100 с лишним лет. Уровень воды в р. Эльбе превысил максимальную отметку знаменитого «Саксонского потолка», который произошел в марте 1845 г. Погибли свыше 100 человек, пострадали несколько миллионов человек. Сотни тысяч жителей были вынуждены покинуть свои дома. Разрушены и повреждены объекты инфраструктуры. Катастрофический ущерб на-

несен культурно-историческим памятникам Европы. Вышедшая из берегов р. Влтава затопила многие памятники старины в г. Праге. В г. Дрездене воды р. Эльбы затопили дворцовый комплекс Цвингер, Дрезденскую картинную галерею, Оружейную палату и другие исторические здания. Предварительный материальный ущерб только по Германии был оценен в несколько миллиардов евро.

Не миновали и не минут наводнения и Россию. Наиболее ранние упоминания о высоких половодьях и паводках, в которых указываются только время наводнений, встречаются в русских летописях X – XIV вв. Начиная с XV в. приводятся некоторые данные примерно такого содержания: «В лето 7052 (1544 г.) ... в Новгороде была вода велика, потопила монастыри многие и двory многие, и воду черпали с моста Волховского колпаками, а в Ильмень ниже Новгорода по Волхову и по иным рекам двory и ораная земля в потопе». Как свидетельствуют летописи в период с 988 по 1716 гг. катастрофические наводнения происходили в Новгороде свыше 25 раз [8]. Немало катастроф вызвали дождевые паводки в европейской части страны. До создания системы водохранилищ и строительства высоких гранитных набережных на Москве-реке в столице нередко были летние ливневые паводки. Так, в конце июня 1924 г. в результате сильнейшего ливня под водой оказались центральные районы города, примыкающие к набережным Москвы-реки и Яузы, а некоторые улицы, в частности Неглинная, стали «судоходными». Многих людей на лодках пришлось вывозить в безопасные места.

От летних паводков страдают и дальневосточные районы нашей страны. В августе 1973 г. в Бурятии произошло наводнение, которое бывает 1 раз в 100 лет. В р. Витиме уровень воды поднялся на 14 метров. Такой же стремительный подъем наблюдался и на р. Селенге. Под водой оказалась вся левобережная часть г. Улан-Удэ (более 3 тыс. домов). Из района бедствия были эвакуированы около 19 тыс. жителей и выведены 200 тыс. голов скота. Всего было затоплено 27 населенных пунктов. В Приморье летом 1950 г. катастрофическое наводнение охватило почти всю Приханкайскую низменность. Из берегов вышли реки Уссури, Арсеньевка, Илистая. Комиссаровка, Большая Уссурка, Артемовка, Раздольная и др. Полностью был затоплен г. Дальнереченск, частично города Уссурийск и Лесозаводск, разрушено полотно Транссибирской железной дороги и множество автодорог. Затопление многих населенных пунктов происходило стремительно: за 36 часов в августе 1950 г. уровень воды в р. Илестой поднялся на 4,2 м, а в р. Раздольной — на 6 м. В 1989 г. в Приморском крае в результате прохожде-

ния тайфуна «Джуди» в зоне бедствия оказалось 140 населенных пунктов. Было затоплено и частично разрушено 267 мостов, повреждено более 1600 км автомобильных дорог, 500 км линий электропередачи. Под водой оказалось более трети пахотного клина. Более половины всех сельхозугодий (лучшие пойменные земли) были смыты до коренных пород. Потери урожая составили около 90 %. Общий ущерб от наводнения был оценен в 540 млн. руб. (в ценах 1989 г.). В августе 2001 г. над Приморьем прошли два тайфуна, принесшие сильные дожди. В наибольшей степени от непогоды пострадал г. Владивосток. Потоками воды он был отрезан от материка. Улицы превратились в бурлящие реки. Несколько городских районов остались без электроэнергии, телефонной связи, водопровода, телевидения. Владивосток, лишившись железнодорожного сообщения с внешним миром, оказался в полной изоляции. По данным МЧС России в целом по Приморью материальный ущерб составил около 1,6 млрд. руб. Погибли 11 человек, пострадали более 80 тыс. человек. В зоне затопления оказалось около 1,5 тыс. домов. Повреждено более 200 км автодорог, снесено 20 мостов [9, 11].

Летом 2002 г. катастрофический паводок произошел в Южном Федеральном округе. Вследствие прохождения интенсивных ливневых дождей с 19 по 23 и с 26 по 29 июня уровень воды на реках региона достиг критических отметок, вызвав широкомасштабное затопление территорий в Краснодарском и Ставропольском краях, в Адыгее, Кабардино-Балкарии, Карачаево-Черкессии, Северной Осетии, Чечне, Ингушетии и Дагестане. Наводнению подверглись свыше 350 населенных пунктов, среди которых оказались города Пятигорск, Кисловодск, Минеральные Воды, Ессентуки, Ставрополь, Невинномысск, Владикавказ, Черкесск, Грозный. Ситуация осложнилась из-за схода оползней и селевых потоков. Было прервано движение на Транскавказской и Военно-Грузинской автомобильных магистралях, а также железнодорожное сообщение на некоторых линиях. По данным МЧС России в результате катастрофического паводка погибли 114 человек, пострадали 287 тыс. человек, свыше 100 тыс. человек были эвакуированы. Без крова остались 40 тыс. человек. Огромный урон был нанесен инфраструктуре региона. Материальный ущерб составил 16,7 млрд. руб. В начале августа этого же года на Краснодарский край обрушились новые потоки проливных дождей и мощных селей. Наводнению подверглись населенные пункты в районе г. Новороссийска, Анапском и Крымском районах. Особенно сильно пострадали поселки Широкая Балка, Абрау-Дюрсо и Дюрсо, где в зону бедствия попали бо-

лее 30 тыс. человек, отдыхающих в санаториях, пансионатах, турбазах и детских лагерях отдыха. Была нарушена работа систем жизнеобеспечения. На несколько дней было прервано железнодорожное сообщение, и сотни людей оказались заложниками стихии на вокзалах. По официальным данным погибли 59 человек, эвакуированы более 2300 человек. Повреждено 7068 и разрушено 424 жилых дома, 26 мостов, 88 км автомобильных дорог, 81 водозабор, 14 км водоводов, отключено 19 трансформаторных подстанций. Предварительный материальный ущерб составил 1,7 млрд. руб. [9].

Наводнения, вызванные таянием снега (половодье)

В России небывалое весеннее половодье произошло в бассейне Верхней Волги в 1908 г. Из-за чрезвычайно дружной весны снег, запасы воды в котором превышали норму на 170–200%, сошел за очень короткий промежуток времени. Почва сильно промерзла за зиму. Положение усугубилось еще тем, что в конце апреля в течение нескольких недель шли проливные дожди. В результате были затоплены десятки тысяч гектаров посевов, без крова остались 50 тыс. человек [11].

На Украине разрушительные последствия были вызваны разливом еще одной крупной реки — Днепра. Одним из самых значительных из зафиксированных в XIX в. как по высоте стояния воды, так и по площади зоны затопления считается наводнение 1931 г. Было установлено, что такая катастрофа может повторяться 1 раз в 300 лет. Причиной его послужило половодье, наступившее после очень снежной зимы: запасы снега на водосборе превысили многолетнюю норму на 200 %. Инфильтрационная способность почв была минимальной из-за высокой насыщенности их влагой после обильных дождей, прошедших предшествующей осенью. Снеготаяние, начавшееся в начале апреля, за несколько дней охватило почти весь бассейн Днепра. От Могилева на север и до Запорожья на юге были затоплены сотни тысяч гектаров плодороднейших земель, что нанесло огромный ущерб сельскому хозяйству Приднепровья, и без того находившемуся в плачевном состоянии.

Небывалое половодье охватило обширные территории США в штате Калифорния и в бассейне реки Колорадо в 1983 г. На берегах озера Элсинор в результате обильных дождей весной, когда пик паводка совпал с пиком половодья, были разрушены десятки населенных пунктов, окрестности объявили зоной стихийного бедствия. Были эвакуированы 2200 человек, а общий ущерб составил 50 млн. долл. В конце мая того же года над Скалистыми горами страны про-

шел мощный циклон, сопровождавшийся сильнейшими снегопадами. Вслед за этим наступило внезапное потепление, и в период с 6 по 28 июня максимальный сток составил ~ 210% от нормы. Впервые за всю историю своего существования переполнились крупнейшие водохранилища на р. Колорадо — Мид и Пуэзелл, а также другие 12 водохранилищ каскада. Система пришла в аварийное состояние и не смогла справиться с разбушевавшейся водой. Во время половодья были заражены колодцы, повреждены сотни домов. Президент США Рональд Рейган объявил ряд районов в бассейне реки зонами бедствия. Только прямой ущерб от наводнения составил 80 млн. долл.

В 1988 г. в Западной Германии после обильных снегопадов повышение температуры в марте вызвало резкий подъем уровня воды в Рейне, Мозеле, Майне и Дунае. Наводнения в городах Пассау, Штраубинг и Регенсбург вынудили местные власти объявить там чрезвычайное положение. Были затоплены многие шоссе, дороги, в городах произошли оползни и обвалы. В Баварии погибли несколько человек. Бушующие потоки реки Неккар затопили старую часть города Хайдельберг. В низинах Рейна под водой исчезли многие дома в пригородах Кёльна.

Наводнения, вызванные ледовыми заторами (заторные наводнения)

В России самым катастрофическим в XIX в. было заторное наводнение 1864 г., произошедшее в районе г. Якутска на р. Лене. Наивысший уровень воды достиг 11,74 м над нолем графика водомерного поста. В 1955 г. уровень воды в Лене в 40 км ниже Якутска в результате затора поднялся более чем на 10 м. Катастрофическое заторное наводнение в мае 2001 г. на р. Лене было вызвано специфическими синоптическими условиями. Вышедшая из берегов река затопила г. Ленск, в результате чего погибли 6 человек и пропали без вести 2 человек. Пострадало 5162 жилых дома, в которых проживали 27500 человек, эвакуированы порядка 18 тыс. человек, полностью уничтожен речной флот Ленска. Для ликвидации заторов ушли тонны взрывчатки и сотни авиабомб. В тяжелом положении оказались г. Олекминск и ряд населенных пунктов, находящихся между Якутском и Ленском. По оценке правительства Якутии в 59 населенных пунктах от наводнения пострадали 47 тыс. человек. В общей сложности на восстановительные работы государство выделило свыше 5 млрд. руб.

В январе 2002 г. в Краснодарском крае произошло разрушительное зимнее наводнение. Резкое потепление и обильные дожди, вызвавшие интенсивное таяние снега в крае, привели к быстрому подъему уровня воды и ледоходу на реках бассейна Средней и Ниж-

ней Кубани. Последующее понижение температуры воздуха вызвало образование мощных заторов льда в районе г. Темрюка. В зоне затопления оказались населенные пункты, сельхозугодья, фермы, автомобильные дороги, нефтяные скважины и т.д. Благодаря вовремя принятым мерам и эвакуации населения человеческих жертв удалось избежать. Материальный ущерб составил 900 млн. руб.

Наводнения, вызванные прорывами подпруженных оползнями или ледниками озер (завальные наводнения)

В Гималаях за предыдущие 200 лет зарегистрировано 35 катастрофических наводков, произошедших по причине прорыва подпруженных оползнями или ледниками озер. Так, например, в 1930 г. в верхней части бассейна реки Шайок, притоке Инда, ширина образованной языком ледника перемычки в русле составила 2,5 км, аккумулированный объем воды выше нее — 1,35 км³, а максимальный расход воды при прорыве достигал 22625 м³/с.

Наводнения, вызванные ветровыми нагонами морских и океанических вод (нагонные наводнения)

Нагонные наводнения представляют особую опасность для побережий океанов и морей с пологими или невысокими берегами, как, например, в г. Санкт-Петербурге. За почти 300-летний период, в течение которого ведутся наблюдения над уровнем Невы, река чуть ли не ежегодно выходила из своих берегов и затопляла пониженные части города. За период с 1703 по 1968 гг. зарегистрировано 227 наводнений. Самым памятным для Санкт-Петербурга было наводнение 7(19) ноября 1824 г., увековеченное А.С. Пушкиным в «Медном всаднике». Под натиском ураганного ветра сильно поднялся уровень воды в Неве. Многочисленные реки и каналы невской дельты слились с водами, покрывающими улицы. Наводнение принесло огромные убытки. Было полностью разрушено 324 дома, повреждено 3257 разных строений. Из 94 судов, стоявших в гавани, удалось спасти только 12. Погибли несколько сотен человек. Долгое время в городе свирепствовали простудные заболевания. Наводнение 1924 г. по своим катастрофическим последствиям лишь немногим уступало наводнению 1824 г. Уровень воды в Неве поднялся почти на 370 см выше ординара. Рушились деревянные мосты и здания, полностью остановилось движение городского транспорта.

Крупнейшее нагонное наводнение XX в. произошло в дельте Ганга в 1970 г. Причиной его был циклон, пришедший с океана: 10-метровая волна, гонимая штормовым ветром, скорость кото-

рого составляла 200 км/ч, повернула вспять священную реку. Вышедшие из берегов воды Ганга затопили 20 тыс. км². С лица земли были снесены десятки городов и сотни деревень, а число жертв, по некоторым оценкам, составило 1,5 млн. человек.

В Европе самое катастрофическое наводнение в XX столетии охватило территорию Нидерландов, Великобритании и ФРГ. В 1953 г. в результате прохождения мощного циклона, сформировавшегося над Атлантикой, в Северном море образовалась высокая нагонная волна. В ночь с 31 января на 1 февраля при штормовом ветре необычайной силы на северное побережье Европы обрушились огромные волны, вызвавшие резкий подъем воды в эстуариях Рейна, Мааса, Шельды и других рек на 3 – 4 м. В наибольшей степени пострадала территория Нидерландов. Защитные дамбы на побережье не смогли сдержать мощный напор волн и были прорваны во многих местах. Вода проникла в глубь страны более, чем на 100 км, затопив 8% ее территории. Жертвами стихийного бедствия стали 2 тыс. человек.

*Наводнения, вызванные подводными землетрясениями
или извержениями вулканов (цунами)*

Наиболее часто воздействию цунами подвержены Япония и Курильские острова. Наводнения, порожденные цунами, характеризуются неожиданностью, цикличностью, быстротечностью и колоссальной разрушительной силой. В России за последнее время наиболее катастрофическое событие произошло в 1952 г., когда на берег обрушились три волны цунами с интервалом в 20 мин. Высота самой большой волны достигала 10 м. Город Северо-Курильск был практически стерт с лица земли.

В юго-восточной Азии самое страшное цунами было вызвано извержением вулкана Кракатау в Индонезии в 1883 г. Высота волны при подходе к индонезийским островам Яве и Суматре составила 40 м. Общее число жертв приблизилось к 36 тыс. человек.

Известна историческая катастрофа, связанная с цунами, и в Европе. В 1755 г. 15-метровая волна разрушила столицу Португалии — Лиссабон, погибло 10% жителей полумиллионного города.

Наводнения, вызванные разрушением или повреждением плотин

В 1959 г. во Франции в результате просадок горных пород под фундаментом рухнула плотина Мальпасе, перегораживающая р. Рейран вблизи г. Фрежю. 2,5 млн. м³ воды, обрушившейся в долину, уничтожили город. Погибли более 400 человек.

В 1963 г. в результате подземных толчков в районе водохранилища Вайонт, зарегулировавшего р.Пьяве (Италия), в период его заполнения на левом берегу произошел оползень объемом более 240 млн. м³ грунта. Причиной оползня послужило увеличение сейсмической активности в районе водохранилища, вызванное его заполнением. Оползень обрушился в чашу водоема, и образованная им волна, перехлестнув через гребень плотины, смыла города Лонгароне, Вилланова и др. Погибли 3 тыс. человек.

В 1976 г. произошло разрушение плотины Болан высотой 134 м, построенной в 1960 г. в Пакистане. Прорвавшееся водохранилище затопило 21 км² территории. Высота паводковой волны в некоторых местах достигала 15 м. Человеческих жертв данная катастрофа не принесла, однако материальный ущерб был огромен: разрушение плотины Болан привело к разрушению еще 10 плотин, расположенных ниже по течению. От наводнения в той или иной степени пострадали 30 тыс. человек.

В августе 1994 г. в Башкирии возник прорыв на плотине Тирлянского водохранилища. Летние проливные дожди, превышавшие в 1,5 – 2 раза среднемесячную норму осадков, вызвали разлив малых рек. Тирлянское водохранилище, расположенное в верховьях р. Белой в 40 км от г. Белорецка, приняло на себя основную массу воды из этих рек. Положение стало критическим к утру 7 августа, когда возникла угроза перелива воды через гребень плотины, так как спустить воду из водохранилища оказалось невозможно: не сработал механизм затвора, лопнули старые изношенные тросы. Жителям нижележащих поселков было предложено немедленно эвакуироваться, однако многие остались дома, не веря в серьезность опасности. Построенная в конце 40-х годов и давно не ремонтировавшаяся плотина не выдержала напора воды и была смыта. Водяной поток объемом около 6 млн м³ обрушился на 4 населенных пункта и устремился вниз по реке. Водой прорыва было снесено 140 домов частного сектора, разрушены линии связи, узкоколейка между пос. Тирлян и г. Белорецком, автодороги, затоплены три цеха Белорецкого металлургического комбината, полностью снесены продовольственные склады, залиты водой подстанции. По данным МЧС России погибли 15 человек, 66 — пропали без вести. Ущерб от стихии без учета остановки Белорецкого металлургического комбината составил 6 млрд. руб. (в ценах 1994 г.) [6, 7].

Наводнения на рубеже тысячелетий

Впервые картину, дающую представление о наводнениях в масштабе земного шара, происшедших в прошлые годы, удалось полу-

читать лишь на рубеже II и III тысячелетий благодаря работе, проводимой коллективом Дартмутской обсерватории при Гановерском колледже в США. Начиная с 1996 г. и по настоящее время сотрудники этой обсерватории собирают фактические сведения о наводнениях, используя самые разные источники: официальные правительственные сообщения, данные метеорологических служб, теле- и радионовости, газетные и журнальные материалы. Данные за 1996 и 1997 гг. весьма не полны и поэтому исключены нами из обзора. Из приводимых ниже табл. 2 и иллюстративных материалов (рис. 1 – 3) читатель получит достаточно полное представление о наводнениях 1998 – 2001 гг. и об их основных социально-экономических последствиях. При этом следует иметь в виду, что разнохарактерность материалов по отдельным странам, полученных из разных источников и с помощью различных методик расчета ущерба от наводнений, а также неполнота приводимых данных по отдельным странам в настоящее время не позволяют получить адекватную картину социально-экономических последствий происшедших наводнений, но общее представление о масштабах этого явления и его глобальности, несомненно, дают [1 – 3, 12].

Таблица 2.

Основные данные по наводнениям на земном шаре за 1998 – 2001 гг.

Континент	Наводнения		Жертвы		Число временно эвакуированных		Ущерб	
	число	%	чел.	%	тыс. чел.	%	\$ млн.	%
1998 г.								
Северная Америка	32	17	578	3,9	469	1,2	6783	16,5
Центральная и Южная Америка	13	7	1153	7,7	1049	2,7	3271	8,0
Европа	20	11	285	1,9	180	0,5	1497	3,6
Азия	83	44	10141	67,7	35493	91,5	29254	71,4
Африка	27	15	2817	18,8	1593	4,1	85	0,2
Австралия и Океания	11	6	5	< 0,1	9	< 0,1	103	0,3
Итого:	186	100	14979	100	38793	100	40993	100
1999 г.								
Северная Америка	16	16	531	3,8	54	0,2	6033	21,5
Центральная и Южная Америка	12	12	275	2,0	1657	5,8	2101	7,5
Европа	14	14	90	0,6	28	0,1	1245	4,4

Продолжение таблицы 2.

Континент	Наводнения		Жертвы		Число временно эвакуированных		Ущерб		
	число	%	чел.	%	тыс. чел.	%	\$ млн.	%	
Азия	41	40	12735	91,6	26031	90,4	18257	65,2	
Африка	14	14	268	1,9	1006	3,5	76	0,3	
Австралия и Океания	4	4	14	0,1	4	< 0,1	302	1,1	
Итого:	101	100	13913	100	28780	100	28014	100	
2000 г.									
Северная Америка	9	9	30	0,3	3	< 0,1	58	0,4	
Центральная и Южная Америка	15	15	195	2,1	376	1,3	75	0,6	
Европа	9	9	79	0,8	53	0,2	9237	72,1	
Азия	52	50	4428	46,4	27618	92,5	2090	16,3	
Африка	13	13	4817	50,4	1802	6,0	1010	7,9	
Австралия и Океания	4	4	2	< 0,1	1	< 0,1	339	2,7	
Итого:	102	100	9551	100	29853	100	12809	100	
2001 г.									
Северная Америка	15	9	80	1,4	79	0,7	1056	8,0	
Центральная и Южная Америка	22	13	255	4,5	747	6,8	1541	11,7	
Европа	20	12	69	1,2	133	1,2	399	3,0	
Азия	84	48	3857	68,3	9189	83,5	9601	72,8	
Африка	29	16	1381	24,5	861	7,8	387	2,9	
Австралия и Океания	3	2	4	0,1	4	< 0,1	213	1,6	
Итого:	173	100	5646	100	11013	100	13197	100	
Итого по земному шару:	562	-	44089	-	108439	-	95013	-	

В настоящее время масштабы ущербов приводятся на период времени самого наводнения. При этом, как правило, отмечается число погибших, временно эвакуированных, площадь затопления и ущерб в денежном выражении (обычно в долларах США). При этом, как правило, не полностью учитывается прямой ущерб и совершенно не учитывается косвенный, перечисление которого могло бы занять многие страницы (дополнительная амортизация зданий, недобор прибыли предприятиями, отвлечение финансовых и материаль-

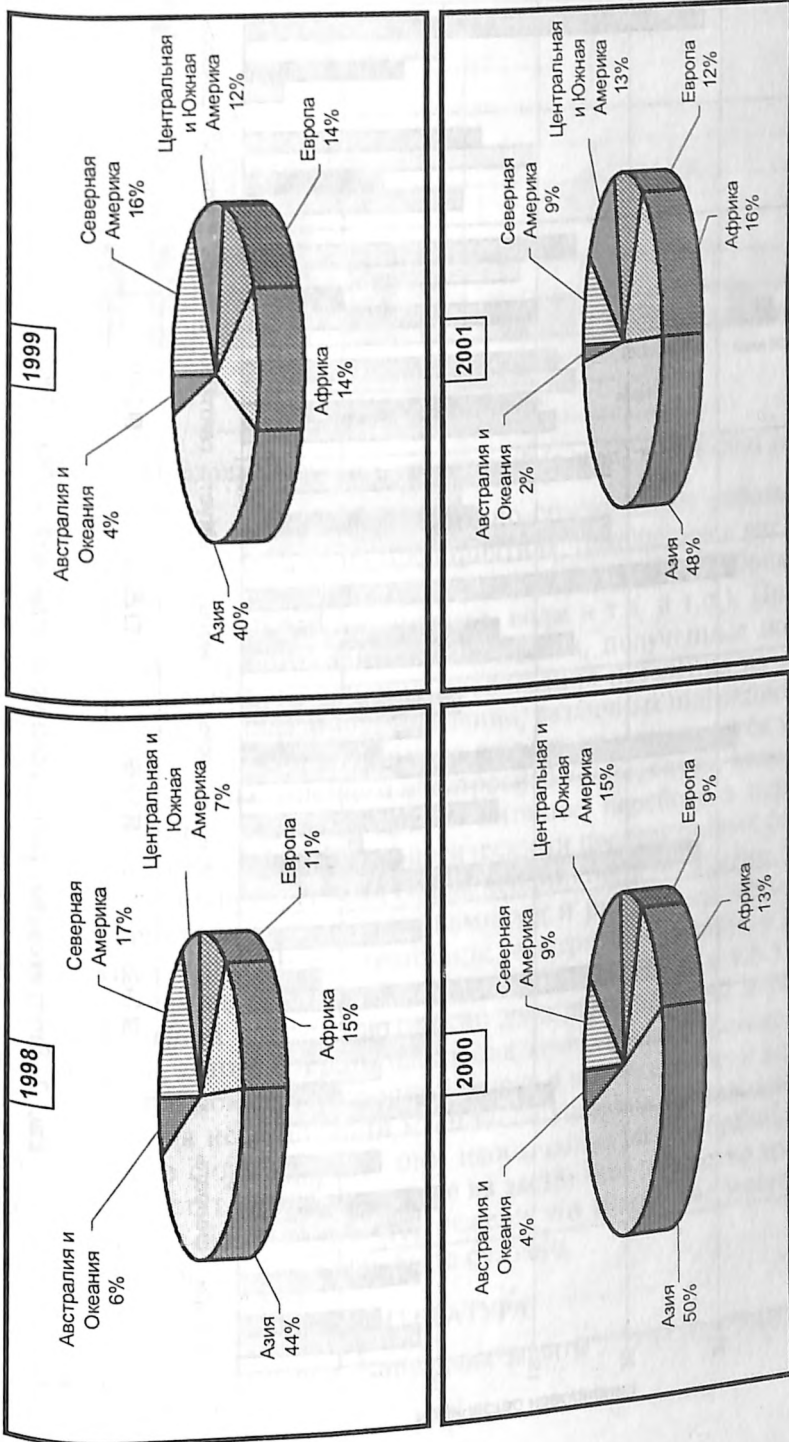


Рис. 1. Распределение наводнений по континентам в 1998 — 2001 гг.

Продолжение таблицы 2.

Континент	Наводнения		Жертвы		Число временно эвакуированных		Ущерб	
	число	%	чел.	%	тыс. чел.	%	\$ млн.	%
Азия	41	40	12735	91,6	26031	90,4	18257	65,2
Африка	14	14	268	1,9	1006	3,5	76	0,3
Австралия и Океания	4	4	14	0,1	4	< 0,1	302	1,1
Итого:	101	100	13913	100	28780	100	28014	100
2000 г.								
Северная Америка	9	9	30	0,3	3	< 0,1	58	0,4
Центральная и Южная Америка	15	15	195	2,1	376	1,3	75	0,6
Европа	9	9	79	0,8	53	0,2	9237	72,1
Азия	52	50	4428	46,4	27618	92,5	2090	16,3
Африка	13	13	4817	50,4	1802	6,0	1010	7,9
Австралия и Океания	4	4	2	< 0,1	1	< 0,1	339	2,7
Итого:	102	100	9551	100	29853	100	12809	100
2001 г.								
Северная Америка	15	9	80	1,4	79	0,7	1056	8,0
Центральная и Южная Америка	22	13	255	4,5	747	6,8	1541	11,7
Европа	20	12	69	1,2	133	1,2	399	3,0
Азия	84	48	3857	68,3	9189	83,5	9601	72,8
Африка	29	16	1381	24,5	861	7,8	387	2,9
Австралия и Океания	3	2	4	0,1	4	< 0,1	213	1,6
Итого:	173	100	5646	100	11013	100	13197	100
Итого по земному шару:	562	-	44089	-	108439	-	95013	-

В настоящее время масштабы ущербов приводятся на период времени самого наводнения. При этом, как правило, отмечается число погибших, временно эвакуированных, площадь затопления и ущерб в денежном выражении (обычно в долларах США). При этом, как правило, не полностью учитывается прямой ущерб и совершенно не учитывается косвенный, перечисление которого могло бы занять многие страницы (дополнительная амортизация зданий, недобор прибыли предприятиями, отвлечение финансовых и материаль-

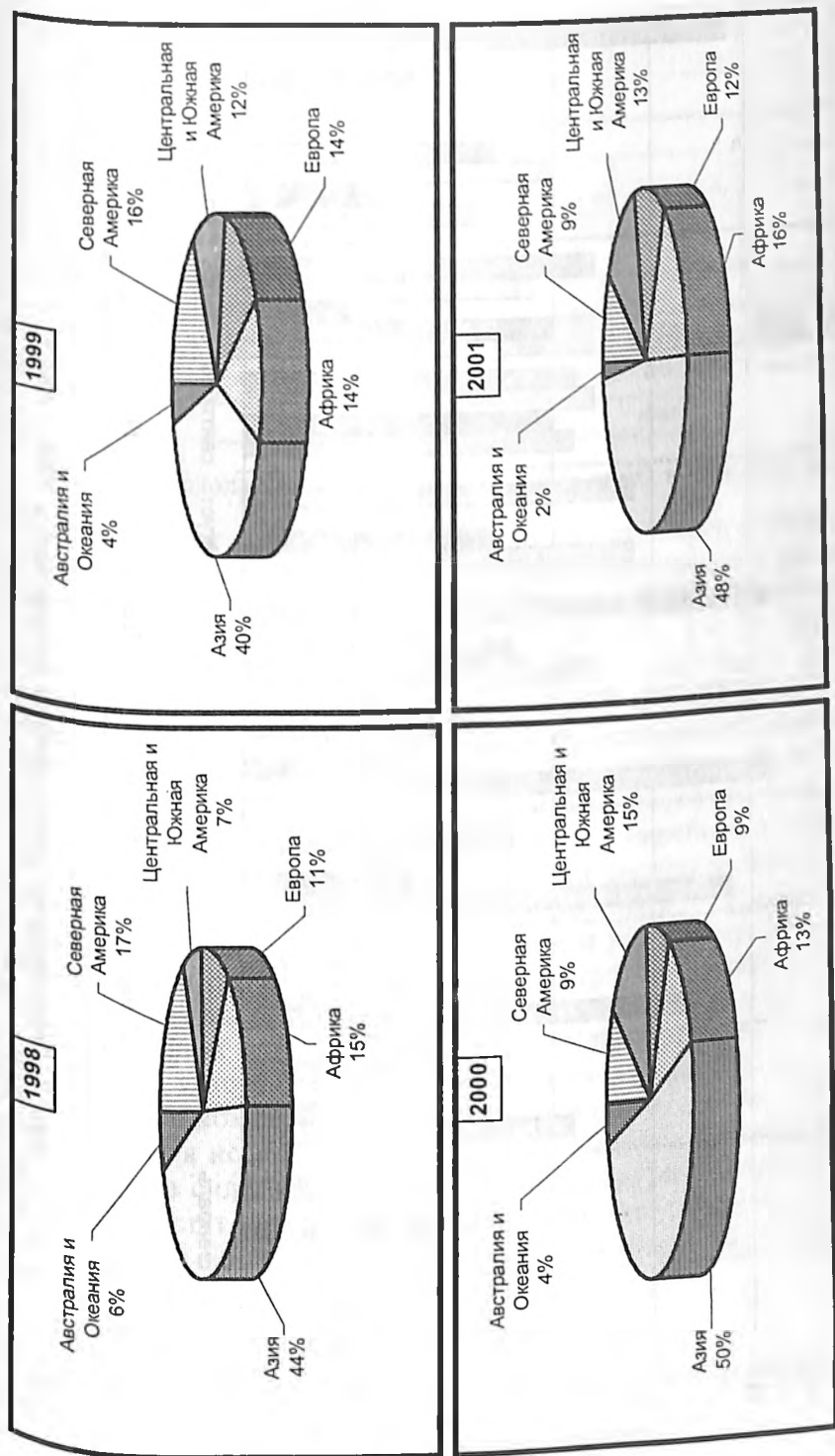


Рис. 1. Распределение наводнений по континентам в 1998 – 2001 гг.

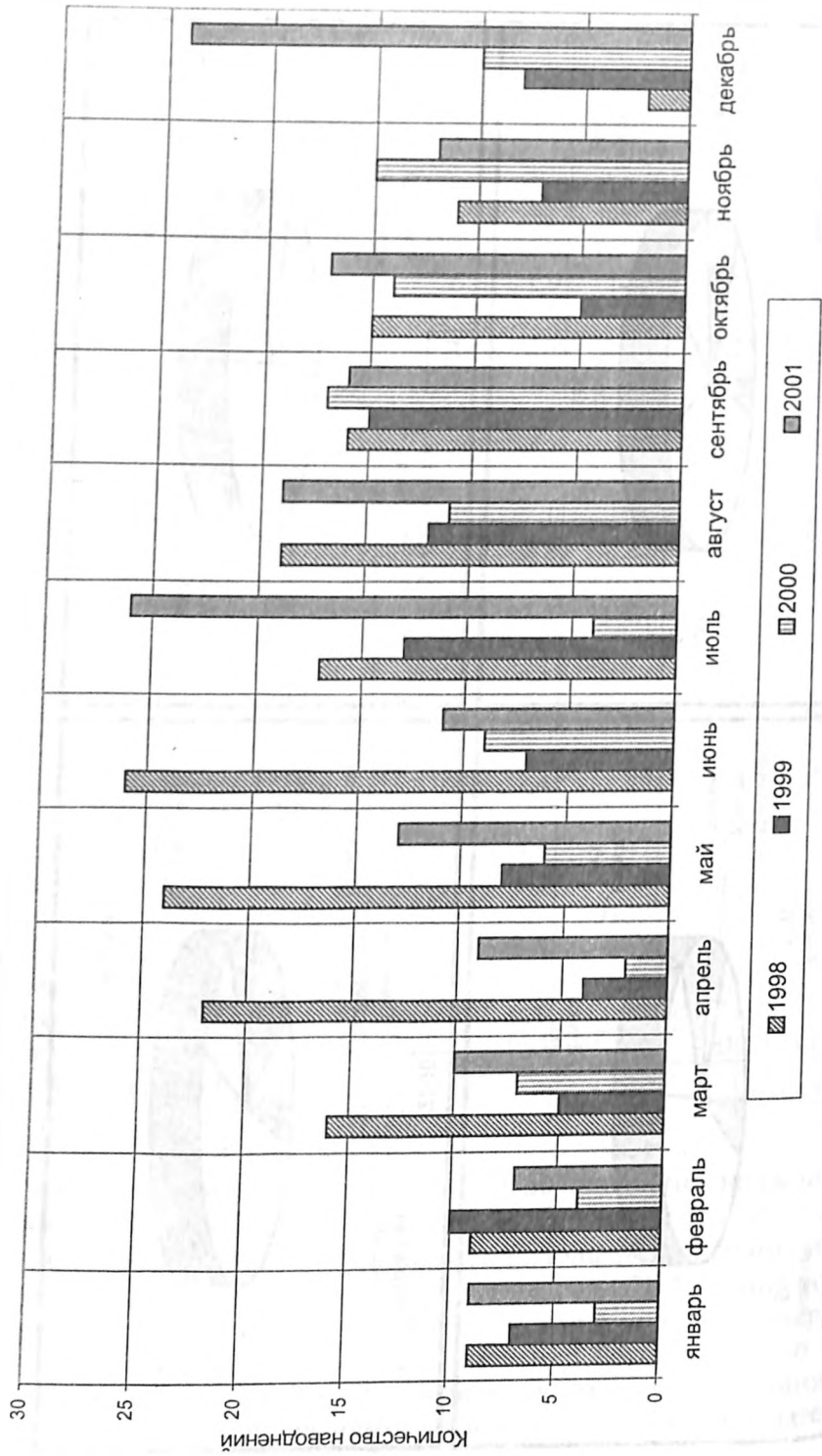


Рис. 2. Внутригодовое распределение наводнений в 1998 – 2001 гг.

Безопасность энергетических сооружений

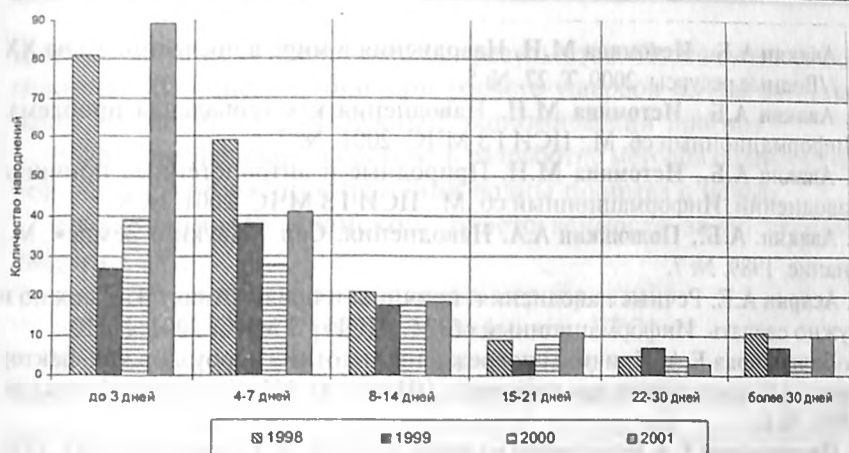


Рис. 3. Продолжительность наводнений (в днях) в 1998-2001 гг.

но-технических ресурсов на аварийно-спасательные работы, невыработка продукции на предприятиях, находящихся вне зоны наводнения, из-за нарушения поставок сырья, полуфабрикатов, перебоев с подачей электроэнергии, воды и т.д. и т.п.). Практически не фиксируются физические увечья, полученные пострадавшими в период наводнения, заболевания населения из-за переохлаждения, недоедания, отравления, различных инфекционных заболеваний и т.п. В большинстве случаев не учитываются ущербы, связанные с нарушением электроснабжения, связи, водоснабжения, недополучения продуктов питания, перебоев в перевозках людей, грузов, а также экологическими последствиями (смыва почвенного покрова, гибели садов, ягодников, в покрытии полей и всей территории затопления камнями и различным хламом, в разрушении нефте- и газохранилищ, в загрязнении воды в связи с затоплением выгребных ям, навозохранилищ и т.д. и т.п.).

В небольшой статье невозможно дать даже краткий перечень тех ущербов, которые терпит население затопляемых районов. Вряд ли кому-либо покажется спорной мысль о необходимости всеяческого усиления исследований масштабов ущербов от наводнений, во-первых, в силу того, что они необычайно разнообразны, непрерывно растут и игнорирование их заставляет общество тратить в десятки раз больше средств, нежели это имело бы место при учете всего того, о чем здесь было сказано.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян А.Б. Наводнения. Концепция защиты //Известия РАН. Сер. географическая. 2000. № 5.

2. Авакян А.Б., Истомина М.Н. Наводнения в мире в последние годы XX в. //Водные ресурсы. 2000. Т. 27. № 5.
3. Авакян А.Б., Истомина М.Н. Наводнения как глобальная проблема. Информационный сб. М.: ЦСИ ГЗ МЧС. 2001. № 7.
4. Авакян А.Б., Истомина М.Н. Природные и антропогенные причины наводнений. Информационный сб. М.: ЦСИ ГЗ МЧС. 2001. № 8.
5. Авакян. А.Б., Полюшкин А.А. Наводнения. Сер. «Науки о Земле». М.: Знание. 1989. № 7.
6. Асарин А.Е. Речные наводнения: причины и последствия. Что можно и нужно сделать. Информационный сб. М.: ЦСИ ГЗ МЧС. 2001. № 10.
7. Барабанова Е.А. Причины повреждения плотин гидроузлов как фактор риска и их последствия для населения //Известия АН. Сер. географическая. 1994. № 6.
8. Нежиховский Р.А. Наводнения на реках и озерах. Л.: Гидрометеониздат. 1988.
9. Сообщения пресс-службы МЧС России. <http://www.emercom.gov.ru>
10. Стихийные бедствия: изучение и методы борьбы. М.: Прогресс. 1978.
11. Таратунин А.А. Наводнения на территории Российской Федерации. Екатеринбург: РосНИИВХ. 2000.
12. Global Register of Large River Flood Events. <http://www.dartmouth.edu/artsci/geog/floods/>.
13. Milne A. Floodshock: The Drowning of Planet Earth. Sutton. 1986.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ КАРТ ДЛЯ ОЦЕНКИ УЩЕРБА ОТ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ПАВОДКОВ

*Беликов В.В., кандидат физ.-мат. наук,
Милитеев А.Н., Прудовский А.М., доктора техн. наук,
Родионов В.Б., кандидат техн. наук (ОАО «НИИЭС»),
Кочетков В.В., инженер (ОАО «Мосэнерго»)*

В соответствии с Федеральным законом «О безопасности гидротехнических сооружений» [1], принятым Государственной Думой 21 июля 1997 г., обязательным является составление декларации безопасности гидротехнических сооружений (ГТС). В декларации должны быть рассмотрены нормативные случаи аварийного разрушения напорных фронтов плотин с определением вероятных зон затопления от волн прорыва и возникающих при этом ущербов.

Существующие в настоящее время методы расчета ущербов устарели, так как не используют современные методы расчета параметров волны прорыва и последние достижения в области под-

готовки данных и представления результатов. Поэтому могут возникнуть большие ошибки при расчете ущербов и, как следствие этого, может быть дан ложный экономический прогноз.

Задача исследования состоит в разработке методов оценки ущербов вследствие распространения волны прорыва с целью:

- страхования гражданской ответственности за последствия аварий ГТС;
- разработки противопаводковых мероприятий;
- составления декларации безопасности ГТС.

В страховании участвуют три стороны: владелец ГТС, страховая компания и район, терпящий ущерб. Оценка ущерба в стоимостном выражении может быть различной для различных районов. Поскольку для достаточно крупных гидроузлов в зону затопления может входить большое количество районов, то необходимо построить карту ущербов.

Карта ущербов — это географическая карта местности требуемого масштаба с выделенными на ней зонами ущербов, соответствующими выбранной шкале. При этом ущерб может быть выражен не только в форме стоимости, а и в некоторой балловой системе.

Для разработки противопаводковых мероприятий необходимость построения карт ущербов имеет еще большее значение. Действительно, если для каждого района затопления можно определить ущерб как в естественных условиях, так и ущерб после проведения мероприятий, то в каждом конкретном случае легко определить эффективность мероприятий и целесообразность их проведения.

В настоящее время большое развитие получили геоинформационные системы (ГИС), в которых имеются обширные сведения о различных характеристиках местности и объектах, расположенных в исследуемых районах. ГИС — это совокупность программного и аппаратного обеспечения, которое делает возможным разработку, моделирование и вывод многослойной пространственной информации. Поэтому разработку методики построения карт ущербов целесообразнее всего проводить с использованием ГИС, в среду которой внедрены методы расчета параметров волны прорыва и связи этих параметров с оценкой ущербов.

Предлагается математическая модель связи ущербов с локальными параметрами волны прорыва: скоростью, глубиной и временем затопления. Суть модели состоит в следующем. Выделяются два вида ущербов:

- ущерб от разрушения зданий и сооружений;
- ущерб от затопления зданий, сооружений и сельхозугодий.

Для каждого из этих видов построена балльная шкала ущербов (наподобие шкалы интенсивности землетрясений), в которой степень ущерба в баллах связана с параметрами паводковой волны. Установлено, что первый вид ущербов (от разрушений) связан со скоростью и глубиной потока, а именно со скоростным напором, или, что тоже, с удельной кинетической энергией потока. Второй вид ущербов (от затоплений) связан с глубиной потока и временем затопления.

С использованием полученных зависимостей и результатов расчета волны прорыва каждой точке зоны затопления в плане ставится в соответствие возможный ущерб в баллах, причем из двух видов ущерба принимается максимальный. После этого строится карта возможных ущербов. Карта реальных ущербов в балльном и стоимостном выражении получается в результате пересечения карты возможных ущербов с реальными народохозяйственными объектами на местности. Это пересечение должно строиться автоматически с использованием цифровых топографических карт и ГИС-технологий. В работе приводится пример построения карты ущербов для конкретного объекта.

Принципиальная схема применения ГИС-технологий

При определении ущерба от паводков при прорывах напорных фронтов гидроузлов возникает необходимость анализа огромного количества информации как о самих источниках опасности, так и об объектах, попадающих в область воздействия волны прорыва. Первым и самым надёжным источником являются топографические цифровые карты разнообразных масштабов. Эти карты изготавливаются на предприятиях Роскартографии и представляют собой векторизованные с высокой точностью изображения объектов топографические карты. Наличие векторной информации имеет ряд несомненных преимуществ в решении задач распространения волны прорыва и определения ущербов:

каждый объект на топографической карте имеет независимое описание, представленное метрической частью — расположение объекта на местности — и семантической частью — содержательность (названия и численность населения городов и посёлков, судоходность рек, классы автодорог, наличие мостов и бродов, характеристики растительности и многое другое);

наличие высотных отметок и горизонталей позволяет воссоздать рельеф и использовать его в расчётах;

возможен простой и эффективный отбор интересующих объектов по их категориям;

результаты расчётов можно отображать непосредственно на фоне этих же карт (возможно, предварительно разгруженных от лишней, хотя и участвующей в расчётах, информации);

при наличии дополнительных баз данных возможна стыковка их с объектами на картах по метрическим или семантическим ключам;

работая в среде ГИС, можно сравнительно легко использовать информацию, имеющуюся на картах различных масштабов и тематических картах;

работы, постоянно проводящиеся по обновлению цифровых карт в РОСКАРТОГРАФИИ, позволяют поддерживать сведения о местности (актуальность) как можно ближе к современному состоянию.

Опыт работы показывает, что многие проекты оказываются нежизнеспособными из-за невозможности собрать необходимую или хотя бы минимальную информацию. Сбор информации на картографической основе позволяет привязывать её к одной системе координат, состыковывать разнородные данные с обозримыми трудозатратами. Получая оценочные результаты по имеющимся, пусть и грубым данным, можно, пересекая построенные зоны опасности со значащими объектами, отображёнными на карте, вычленять графическими построениями категории опасности и возможного ущерба. А далее дополнять и уточнять исходные данные только в значащих местах. Это позволит в реально обозримые сроки получить как общую картину по интересующим регионам, так и конкретно по объектам гидростроительства.

С учётом вышеизложенного и того, что большинство цифровых топографических карт будет приобретаться (или создаваться) на предприятиях РОСКАРТОГРАФИИ, основным инструментальным средством для построения ГИС - приложений по задаче определения ущербов был выбран компонент картографического редактора «Нева» и язык программирования DELPHI. Этот выбор имеет несколько преимуществ:

карты, созданные в предприятиях РОСКАРТОГРАФИИ, напрямую, безо всяких конвертаций, используются в прикладных задачах и в качестве топографической основы для отображения результатов;

всё сопровождение классификаторов объектов карт и вновь создаваемых объектов ведёт ГОСГИСЦЕНТР, являющийся головным предприятием по технологии «Нева»;

программирование прикладных задач производится на языке DELPHI с использованием интерфейса по работе с объектами карт и самими картами;

в создаваемую архитектуру легко вписываются многочисленные ранние разработки по численному моделированию волн прорыва, выполненные на языке ФОРТРАН;

создаваемые разработки не требуют специфического оборудования.

Алгоритм расчета экономических ущербов в балльной системе

Исходные данные для расчетов

Для расчета экономических ущербов в балльной системе необходимо найти математическую связь локальных параметров волны прорыва или естественного паводка со степенью ущербов (разрушений). Для нахождения этой связи использовались данные работ [2 ... 5], некоторые из которых приведены в табл.1,2. На основе этих и других данных были построены шкалы балльности разрушений и затоплений.

Таблица 1

Параметры потока, вызывающего разрушения зданий различных типов

Тип здания	Разрушение					
	Полное		Среднее		Слабое	
	h,м	V,м/с	h,м	V,м/с	h,м	V,м/с
Сборные деревянные жилые дома	3	2	2,5	1,5	1	1
Деревянные дома (одно – двухэтажные)	3,5	2	2,5	1,5	1	1
Легкие бескаркасные здания	5	2,5	3,5	2	2	1,5
Кирпичные малоэтажные здания	4	2,5	3	2	2	1
Кирпичные дома средней этажности	6	3	4	2,5	2	1,5
Промышленные здания	7,5	4	6	3	3	1,5
Бетонные и железобетонные здания антисейсмической конструкции	12	5	9	3	4	1,5

Шкалы балльности разрушений и затоплений

Шкалы предназначены для оценки интенсивности (угрозы) наводнения или паводка (потенциальной опасности воздействия водного потока на окружающую среду) на любом выбранном небольшом участке (в точке) плана рассматриваемой местности. Шкала разрушений связана со степенью разрушения объектов и хорошо коррелирует со значением удельной (на единицу ширины)

Параметры потока, вызывающего разрушение стенок набережных

Наименование объектов	Разрушение					
	Полное		Среднее		Слабое	
	h, м	V, м/с	h, м	V, м/с	h, м	V, м/с
Стенки, набережные и пирсы на деревянных сваях	4	6	2	4	1	1
Стенки, набережные и пирсы ряжевой конструкции.	5	6	3	4	1	1
Стенки, набережные и пирсы на железобетонных сваях.	6	6	3	4	1	2
Стенки, набережные, молы, волноломы из кладки массивов.	7	6	4	4	2	2
Массивы – гиганты.	7	7	4	6	2	2

энергии потока, которая зависит от глубины и скорости течения. Шкала затоплений связана только с глубиной затопления, поскольку затопление сельхозугодий, зданий и сооружений без их разрушения также приводит к значительным ущербам. Кроме того, в последнем случае становится важным продолжительность стояния того или иного уровня воды.

Обозначим: H — глубина потока; V — скорость течения; $P = HV^2/2$ — удельная (на единицу ширины) энергия потока. Рассмотрим ниже возможные шкалы балльности. Приведенные в скобках числовые значения критериального параметра — граничные (сверху) значения диапазона для соответствующего балла.

Шкала балльности разрушений

- 1) Незначительное поднятие уровней воды при малых скоростях течения. Не приводит к каким-либо разрушениям ($P = 0,004$).
- 2) Слабое поднятие уровней при незначительных скоростях течения. Возможен смыв легких грунтов, незначительный ущерб сельхозугодьям ($P = 0,014$).
- 3) Более существенное поднятие уровней воды при заметных скоростях течения. Возможен более значительный ущерб сельхозугодьям и огородам ($P = 0,04$).
- 4) Заметное поднятие уровней воды при увеличении скоростей течения, приводящее к незначительным разрушениям ($P = 0,13$).
- 5) Достаточно быстрое повышение уровней воды, сопровождающееся заметным ростом скоростей течения. Перемещение слабо закрепленных предметов, разрушение легких объектов большой парусности (копен сена, палаток и т.п.) ($P = 0,4$).

6) Значительные глубины затопления на пойме при повышенных скоростях течения. Разрушение сплошных деревянных изгородей, ветхих деревянных сараев ($P = 1,3$).

7) Достигаются критические параметры потока, которые могут повлечь гибель незащищенных людей. Жители покидают дома или спасаются на верхних этажах. Разрушение легких деревянных строений, затопление и перемещение потоком легковых автомашин. В руслах — разрушение деревянных мостов, паромных переправ, средние повреждения находящихся на незащищенных стоянках плавсредств (вынос на берег) ($P = 4$).

8) Полное разрушение деревянных домов, ветхих кирпичных и глинобитных строений, средние разрушения кирпичных и блочных домов малой этажности. Разрушение железобетонных и металлических мостов, автодорожных и железнодорожных насыпей, защитных дамб обвалования, подвижного железнодорожного состава. В руслах — средние повреждения находящихся в плавании, на якорной стоянке или на берегу и вовремя необранных в затоны судов ($P = 13,5$).

9) Разрушаются кирпичные и панельные дома средней этажности, водокачки, ЛЭП. Поток несет вырванные с корнем деревья. В руслах — сильные повреждения (оверкили и затопление) незащищенных средне- и малотоннажных судов, средние разрушения стенок, набережных и пирсов, разрушение стапелей судоремонтных мастерских ($P = 40$).

10) Разрушаются промышленные здания с тяжелым металлическим и железобетонным каркасом, порталные краны. Поток сильной мутности несет много различных предметов. Массовая гибель людей. В руслах — разрушение стенок, набережных, молов, выполненных из кладки массивов ($P = 125$).

11) Разрушаются бетонные и железобетонные здания антисейсмической и особо прочной конструкции, мостовые перегружатели. Почти полное разрушение всех строений. Поток несет строительные материалы, ворочает бетонные и каменные глыбы. Поголовная гибель неэвакуированных людей ($P = 400$).

12) Тотальные разрушения. Разрушается все ($P > 1300$).

Шкала балльности затоплений

1) Незначительное кратковременное поднятие уровней воды, не приводящее к каким-либо ущербам ($H < 0,1$ м).

2) Заметное повышение уровней воды на срок до нескольких часов. Возможно подтопление подвалов и полуподвалов зданий, затопление огородов ($H = 0,5$ м).

3) Существенное повышение уровней воды. Подтопление цоколей и первых этажей зданий, затопление сельхозугодий. Затруднение передвижения без плавсредств, остановка транспорта. При большой продолжительности (несколько суток) сложности со снабжением продовольствием ($H = 1$ м).

4) Значительные глубины затопления. Частичное затопление первых этажей зданий, порча мебели, бой стекол. Жители покидают первые этажи домов. Полная невозможность передвижения без плавсредств. Массовые короткие замыкания электропроводки, травмы электротоком. Затопление автотранспорта ($H = 2$ м).

5) Затопление вторых этажей зданий, трансформаторных подстанций. Разрушение (всплытие) деревянных строений ($H = 4$ м).

6) Полное затопление двух- и трехэтажных зданий. Массовая гибель людей ($H = 8$ м).

Построение карт возможных ущербов в балльной системе

Для математического описания ущербов по предложенной выше шкале балльности разрушений была подобрана функция логарифмического вида, связывающая значение баллов с удельной энергией потока:

$$B = 2 \lg(P) + 5,8, \quad (1)$$

где $P = HV^2/2$.

Значение баллов, полученное по этой формуле, практически совпадает со значениями шкалы, что иллюстрирует табл.3

Таблица 3

Граничные значения глубины, скорости и удельной энергии потока

Баллы	$H, м$	$V, м/с$	$P = HV^2/2$	$B = 2 \lg(P) + 5,8$	Граничное значение удельной энергии
1	0,2	0,2	0,004	1,00	0,004
2	0,3	0,3	0,014	2,06	0,013
3	0,5	0,4	0,040	3,00	0,040
4	0,7	0,6	0,126	4,00	0,125
5	1,0	0,9	0,405	5,01	0,395
6	1,3	1,4	1,274	6,01	1,250
7	1,5	2,3	3,968	7,00	3,953
8	3,0	3,0	13,500	8,06	12,500
9	5,0	4,0	40,000	9,00	39,528
10	7,0	6,0	126,000	10,00	125,000
12	13	14,0	1274,000	12,01	1250,000

С использованием формулы (1) были построены зоны возможных ущербов в балловом эквиваленте для участка долины крупной реки после прохождения волны прорыва, вызванной разрушением высокой бетонной плотины. Методика построения заключалась в том, что с использованием разработанной ранее программы «BOR» [6 ... 9] выполнялось моделирование распространения волны прорыва и одновременно в каждой ячейке расчетной сетки вычислялись баллы по формуле (1). Результаты расчета отображались совместно со слоями топографической электронной карты (рис. на цветной вкладке). Видно, что практически полному затоплению и сильным разрушениям подвергается правобережная часть большого города, причем скорости в русле достигают 8 м/с, а в районах городской застройки 4 ... 5 м/с, глубины затопления достигают 10 ... 15 м. Карта ущербов в баллах несет основную информационную нагрузку о возможных последствиях наводнения. В дополнение к ней могут рассматриваться карты максимальных глубин затопления, карты максимальных скоростей и другие.

Выводы

Разработана математическая модель, которая связывает параметры волны прорыва или естественного паводка со шкалой ущербов.

Разработанная шкала ущербов в балльной системе позволяет объективно оценивать последствия воздействия паводковой волны.

На примере разрушения большой плотины проиллюстрирована разработанная методика оценки ущербов и построена карта возможных ущербов в баллах.

Компьютерное моделирование с использованием электронных топографических карт позволяет не только учесть все особенности рассматриваемого объекта с требуемой точностью, но и получить необходимую информацию по глубинам затопления, максимальным скоростям течения, времени добегания и возможным ущербам с конкретной привязкой на местности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закон РФ «О безопасности гидротехнических сооружений». М.:1997.
2. Методические указания по оценке ущербов в зоне затопления. М.: Гидропроект. 1980.
3. Временная методика оценки ущерба, возможного вследствие аварии гидротехнического сооружения. РД 153-34.2-002-01. М.:2001.
4. Рекомендации по комплексам мероприятий защиты населения при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера. //ВНИИ ГОЧС. М.: 1993.
5. Методика оперативного прогнозирования инженерных последствий прорыва гидроузлов. //ВНИИ ГОЧС. М.: 1998.

6. Милитеев А.Н., Сладкевич М.С. Разностная схема для решения плановых уравнений мелкой воды. //Деп. в ВИНТИ. Депонированные рукописи. Вып. 3. 1983.
7. Беликов В.В., Семенов А.Ю. Построение численных методов распада разрыва для решения уравнений теории мелкой воды. Вычислительная гидродинамика природных течений. //Тр. ИОФАН, М.: Наука. Физматлит, Т.53. 1997.
8. Belikov V.V. and Semenov A.Yu. A Godunov's Type Method Based on an Exact Solution to the Riemann Problem for Shallow-Water Equations. //Proc.4 Eur. Comp. Fluid Dyn. Conf. (ECCOMAS'98), WILEY, New York: 1998.V.1, Part 1.
9. Беликов В.В., Милитеев А.Н., Кочетков В.В. Комплекс программ для расчета волн прорыва «Бор». Российское агентство по патентным и товарным знакам. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2001610638. М.: 2001.

ВЛИЯНИЕ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕСТЕСТВЕННЫХ ПАВОДКОВ НА ОЦЕНКИ УЩЕРБА ОТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ АВАРИЙ

*Мажбиц Г.Л., Школьников С.Я., кандидаты техн. наук,
Буланов Е.П., инженер (ОАО «НИИЭС»)*

При возникновении гидродинамической аварии необходимо изыскать средства для возмещения материального ущерба. До последнего времени в России (как и в СССР в более ранний период) считалось, что эти средства должно выделять государство. В настоящее время концепция возмещения затрат на ликвидацию последствий аварии изменилась. В соответствии с Федеральным законом «О безопасности гидротехнических сооружений»[1], собственник гидротехнического сооружения (ГТС) или эксплуатирующая организация «возмещает ... ущерб, нанесенный в результате аварии гидротехнического сооружения». На собственника ГТС (эксплуатирующую организацию) ложится обязанность иметь финансовое обеспечение гражданской ответственности от возможной гидродинамической аварии. Для того чтобы избежать вывода из оборота средств, зарезервированных для финансового обеспечения гражданской ответственности, Федеральный закон допускает возмещение ущерба «за счет страховой суммы, определенной договором страхования риска гражданской ответственности».

Хотя вероятность возникновения гидродинамической аварии на ГТС невелика, владельцы гидроузлов (эксплуатирующие организа-

ции), страховые компании и государственные органы власти должны иметь информацию о размере возможного материального ущерба.

В 2002 г. в Российской Федерации принята Временная методика оценки ущерба, возможного вследствие аварии гидротехнических сооружений (РД 153-34.2-002-01) [2] (далее — Методика). Отличительной особенностью данной Методики является применение в ней принятого в ОАО «Институт Гидропроект» подхода к оценке ущерба от аварии не по результатам точной инвентаризации находящейся в потенциально затопленной области собственности, а по приближенной оценке ее стоимости на основе укрупненных показателей экономического состояния региона аварии. При этом соответствующие оценки проводятся для основных и оборотных производственных фондов и для готовой, но нереализованной продукции предприятий пропорционально численности населения затопленной зоны, для элементов транспорта и связи — пропорционально длине автомобильных дорог в этой зоне, для сельскохозяйственного производства — пропорционально затопленной площади. Социальный ущерб определяется в натуральном выражении — в виде возможного числа погибших и пострадавших при гидродинамической аварии. Упущенной выгоды Методика оценки ущерба [2] не определяет. Имея в виду неопределенность момента возможной аварии (за период времени между проведением оценки ущерба и аварией население зоны и расположенное в ней имущество могут значительно измениться) и сложность оценки стоимости имущества, находящегося в зоне потенциального затопления, следует признать, что повышение точности оценки ущерба при полной инвентаризации собственности будет невелико, а стоимость соответствующих изыскательских работ — весьма значительна. Для предварительной оценки размера ущерба от гидродинамической аварии, знание которой необходимо при назначении сумм, резервируемых на покрытие расходов при ликвидации чрезвычайных ситуаций, страховании риска гражданской ответственности от гидродинамической аварии и т.д., точность, достигаемая при использовании [2], достаточна.

В соответствии с Методикой [2] «по промышленным объектам и населенным пунктам ущерба определяются, если параметры гидродинамической аварии превышают показатели воздействия паводка 1%-й обеспеченности, по мостовым переходам — 0,3%-й, по сельхозугодьям — 3%-й.». Эти обеспеченности соответствуют требованиям действующих нормативов по использованию прибрежных территорий. В случае возникновения гидродинамической

аварии владелец гидроузла (эксплуатирующая организация) не несет гражданской ответственности за ущерб, связанный с рискованной (или неправомочной) эксплуатацией земель в нижнем бьефе на территориях, затапливаемых естественными паводками с обеспеченностью, большей вышеуказанной (ответственность за нее несут хозяйствующие субъекты). Эта часть ущерба связана с рискованной (или неправомочной) эксплуатацией территории в нижнем бьефе. Ее необходимо вычесть из общего ущерба при расчете ущерба от гидродинамической аварии.

Таблица

Ущерб от гидродинамической аварии

Показатель ущерба	Авария по сценарию 1	Половодье $p=0,01\%$	Разность ущербов	Авария по сценарию 2	Половодье $p=5\%$	Разность ущербов
Площадь затопления, км ²	15500	15000	500	15000	13500	1500
Население зоны затопления, тыс. человек	970	930	40	930	850	80
Ущерб основным производственным фондам, млрд. руб	60	58,5	1,5	54,5	0,2	54,3
Ущерб оборотным производственным фондам, млрд. руб	3	2,9	0,1	2,8	0	2,8
Ущерб элементам транспорта и связи, млрд. руб	4,5	4,4	0,1	4,3	4,0	0,3
Ущерб жилому фонду и имуществу граждан, млрд. руб	86	82	4	82	1	81
Расходы на ликвидацию последствий аварий, млрд. руб	31	30	1	29	1	28
Ущерб сельскохозяйственному производству, млрд. руб	12	12	0	12	11	1
Экологический ущерб от гибели лесов, млрд. руб	3	3	0	2,9	2,6	0,3
Прочие виды реального ущерба, млрд. руб	20,5	18,2	2,3	21,5	2,2	19,3
Общий ущерб, млрд. руб	220	211	9	209	22	187

В Методике [2] не рассмотрен вопрос о начальной гидрологической ситуации в водоемах, на фоне которой затем происходит гидродинамическая авария. При определении ущербов от аварии гидрологическая ситуация важна с двух точек зрения: во-первых,

она может существенным образом повлиять на ход процесса, во-вторых, повлиять на оценку размера ущерба, гражданскую ответственность владельца гидроузла (эксплуатирующей организации). При прохождении высокого паводка редкой повторяемости существенный ущерб возникает и при прохождении паводка в штатном режиме. При оценке ущерба от гидродинамической аварии, проходящей на фоне такого паводка, владелец (эксплуатирующая организация) отвечает за долю общего ущерба от катастрофы, не учитывающую ущерб, который возник бы и без аварии. В качестве примера рассмотрим приведенные в таблице оценки ущерба от гипотетической гидродинамической аварии на гидроузле I-го класса, проходящей на фоне половодий различной обеспеченности.

Рассмотрено рядовое высокое половодье обеспеченностью 5% и катастрофическое высокое половодье обеспеченностью 0,01%. Для определения доли ущерба, ответственность за которую несет владелец гидроузла, были определены ущербы, вызванные половодьями соответствующих обеспеченностей. Несмотря на то что в тексте Методики [2] оговорено, что она не применима к оценкам ущербов от естественных паводков, оценки все-таки проводились с ее использованием. Хотя соответствующие нормативы запрещают заселение зоны, затапливаемой половодьями обеспеченностью 1%, оказалось, что на рассматриваемом водотоке даже в зоне, затапливаемой паводком обеспеченностью 5%, живет 850 тыс. жителей. Однако из-за сравнительно небольших глубин затопления ущерб от такого половодья невелик по сравнению с ущербом от гидродинамической аварии. Размеры ущербов от аварий, проходящих на фоне таких половодий, близки друг другу, ущербы же от самих половодий при их прохождении в штатном режиме различаются на порядок. В такой ситуации доля ущерба от наводнения, за которую несет гражданскую ответственность владелец гидроузла (эксплуатирующая организация) при аварии, происходящей при рядовом высоком половодье, оказывается на два порядка меньше, чем при аварии, происходящей при катастрофическом половодье. Разумеется, это связано с тем, что в рассмотренном низменном регионе заселены зоны, затапливаемые даже при сравнительно небольших половодьях. Для регионов, характеризующихся более высокими берегами, могут возникнуть противоположные ситуации.

Таким образом, гидрологические режимы водотоков во время гидродинамической аварии могут существенно влиять на оценку доли ущерба от наводнения, гражданскую ответственность за которую несет владелец гидроузла (эксплуатирующая организация). По-видимому,

при подготовке следующих редакций Методики оценки ущерба, возможного вследствие аварии гидротехнического сооружения, необходимо дать рекомендации по назначению гидрологических сценариев аварии, а для этого следует провести исследования влияния этого фактора на размер сумм, необходимых для страхования риска гражданской ответственности владельца гидроузла (эксплуатирующей организации) из-за гидродинамической аварии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» № 3589.** Принят Государственной Думой Российской Федерации 23 июня 1977 г.
2. **Временная методика оценки ущерба, возможного вследствие аварии гидротехнического сооружения.** РД 153-34.2-002-01. М. 2000.

К ВОПРОСУ СТРАХОВАНИЯ РИСКА УБЫТКОВ ОТ НАВОДНЕНИЙ, ВЫЗЫВАЕМЫХ ПАВОДКАМИ И ПОЛОВОДЬЯМИ

*Стефанишин Д. В., доктор техн. наук
(ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»)*

Наводнения, связанные с паводками и половодьями на реках, всегда были естественным сдерживающим фактором хозяйственного освоения пойменных территорий [1]. Однако под воздействием социальных и экономических причин, среди которых важнейшей является гидротехническое строительство, общество «разучилось» адекватно оценивать риск естественных наводнений. В последнее время «агрессия» человека на поймы многих рек, особенно в нижних бьефах гидроузлов, приняла такие масштабы, что стало очень сложно создавать опережающие системы защиты. Во многих случаях положение усугубляется и недостаточно четкой реакцией эксплуатационных служб и местных властей на создавшееся положение, а также недостаточно развитым механизмом снижения рисков ущерба, связанных с этим опасным природным явлением.

Угроза наводнений, связанных с прохождением половодий и паводков, реализуется по стохастическим законам. Это, в частности, означает, что никакой фатальной предопределенности нести убытки нет, а, наоборот, есть принципиальная возможность управлять возможными рисками, например, путем введения разумных ограничений на хозяйственную деятельность, страхования иму-

щества и деятельности и т. п., ослабляя таким образом опасность. Однако такая возможность может быть реализована лишь в том случае, если общество в целом, субъекты хозяйствования, отдельные индивидуумы научатся осознанно оценивать риск наводнений, т. е. количественно сопоставлять те выгоды, которые приносит хозяйственная деятельность на подверженных опасности территориях, и дополнительные затраты на осуществление мероприятий по защите от наводнений с учетом рисков возможных отрицательных последствий для человека и окружающей среды [2, 3].

С начала рыночных реформ в России интенсивно начали развиваться страховые механизмы возмещения убытков во многих областях человеческой деятельности. Опыт развитых стран показывает, что страхование убытков может успешно решать проблемы, связанные с потерей собственности, ответственностью перед третьими лицами, жизнью и здоровьем индивидуумов, финансовыми рисками, рисками, связанными с инвестициями, кредитными рисками и пр. [4]. Однако, для того чтобы иметь четкий механизм страхования рисков убытков, связанных с наводнениями на реках, важно не только обозначить цели такого страхования, учесть различные аспекты проявления гидрологического риска, включая добровольность и недобровольность, но и установить пределы ответственности собственников гидротехнических сооружений (ГТС) перед третьими лицами и ответственности государства перед собственниками ГТС и теми же третьими лицами и, как следствие, ограничить сферу претензий третьих лиц. В частности, чрезмерная «агрессивность» населения при освоении пойм привела к тому, что стало очень сложно четко проводить границу между добровольными и недобровольными рисками. Многие субъекты при освоении пойм осознанно подвергают себя риску с целью получения выгод. Изначально следует установить, что если рискующий принимает риск добровольно, то он и должен справляться с ситуацией самостоятельно. При этом во многих случаях можно полностью снять ответственность перед третьими лицами, если их деятельность на пойме, связанная с риском, сопряжена с получением выгод, они ознакомлены с возможными последствиями и действуют добровольно. В идеале нужно стремиться к тому, чтобы источником финансового обеспечения страхования убытков при наводнениях был прямой договор страхования, заключенный страхователем со страховой компанией (страховщиком) на добровольной основе.

Деление последствий наводнений на технико-экономические, экологические и социальные [3] позволяет структурировать воз-

возможные потери и в большинстве случаев произвести экономическую оценку ущербов [5]. Знание размеров ущербов, а также вероятностей их реализации, которые напрямую связаны с вероятностями соответствующих гидрологических событий (вероятностями превышения расчетных максимальных расходов паводков и половодий), создает принципиальную возможность возмещения возможных убытков путем страхования [4 ... 7].

Остановимся кратко на роли государства в обеспечении безопасности населения при наводнениях. На государственном уровне страхование, в любом случае, — это способ лишь частичного решения проблемы борьбы с наводнениями, причем со многих точек зрения не самый лучший. Эффективным альтернативным решением всегда может быть разумное ограничение природопользования в опасной зоне. Кроме того, чтобы страхование имело успех, страхователь изначально должен иметь полную свободу выбора — ограничивать свою деятельность в зоне, подверженной наводнениям, создавать и совершенствовать системы защиты, страховать возможные убытки или находить какое-то компромиссное решение. Всегда нужно помнить о том, что риск — это скорее выбор, нежели жребий [8].

Наличие выгод в условиях опасности всегда стимулировало и будет стимулировать рискованные предприятия и их страхование. В этой связи особую важность приобретает роль государства в регламентации допустимых рисков наводнений как вероятностей превышения расчетных паводков и половодий. Для расчетных наводнений риск должен максимально ограничиваться отличными от страхования способами. Управление рисками, основанное только на страховании, изначально содержит семена дегуманизации и саморазрушения. Страхование — это не финансирование мероприятий по повышению безопасности. Это прежде всего бизнес, способ зарабатывания денег, в лучшем случае — финансирование последствий реализации опасности, а не ее ограничение. Нередко рост опасности для страховщика оказывается благом. Свои просчеты он всегда может покрыть за счет неоправданного увеличения размеров страховых премий.

Основная идея обеспечения безопасности путем страхования состоит в перераспределении взносов от многих страхователей для возмещения вероятного ущерба, который реализуется случайным образом и только у небольшого числа страхователей. Что касается наводнений, то при этом возможна реализация множества различных по последствиям и вероятностям отрицательных событий,

которые придется рассматривать в качестве потенциальных страховых случаев. Выбор среди них расчетного может представлять достаточно сложную задачу.

Пусть возможны различные i — паводки и половодья с ежегодными вероятностями превышения p_i , каждому из которых отвечают различные обобщенные ущербы Y_i . Вполне возможна ситуация, когда соответствующие риски ущербов по i -м страховым случаям $R(Y_i) = p_i Y_i$ могут совпадать или же быть достаточно близкими (быть одного порядка). Пусть, например, имеется три неблагоприятные события: $Y_1 = 10$ млн. руб. при $p_1 = 10^{-2}$ 1/год, $Y_2 = 50$ млн. руб. при $p_2 = 2 \times 10^{-3}$ 1/год, $Y_3 = 100$ млн. руб. при $p_3 = 10^{-3}$ 1/год. Во всех этих случаях расчетные риски ущербов равны 0,1 млн. руб./год, т. е. вопрос выбора среди них страхового случая остается открытым.

Страхование минимального из ущербов уменьшает возможность компромисса между клиентом и страховой компанией. Запишем i -й ущерб в виде $b_i Y_{\max}$, где $b_i = Y_i / Y_{\max}$ ($0 < b_i < 1$). Тогда в течение n лет ожидаемый ущерб клиента для i -го страхового случая составит [9]:

$$Y_{i,n} = Y_{\max} \exp(np_i \ln(1 - b_i)) = Y_{\max} (1 - b_i)^{np_i} \quad (1)$$

Пусть ежегодный страховой взнос равен $c_i Y_{\max}$ ($0 < c_i < 1$). Страхование выгодно страховщику лишь тогда, когда ожидаемая прибыль положительна, т. е. при

$$c_i > p_i b_i \quad (2)$$

В свою очередь страхование выгодно для страхователя, когда значение $Y_{\max} (1 - b_i)^{np_i}$ меньше $Y_{\max} (1 - c_i)^n$, т. е. (используя разложение в степенной ряд) при

$$c_i < p_i b_i + \frac{p_i(1-p_i)}{2} b_i^2 + \frac{p_i(1-p_i)(2-p_i)}{6} b_i^3 + \dots \quad (3)$$

Легко можно показать, что, чем меньше b_i , т. е. чем меньший из возможных i -х ущербов страхуется, тем меньше свободы в выборе значения c_i , а значит и возможность компромисса между клиентом и страховой компанией уменьшается.

Это еще раз свидетельствует о важности регламентации допустимых вероятностей превышения паводков. Такая регламентация будет полезна как страхователю, так и страховщику. Посредством «исключения» часто повторяющихся наводнений из области страхования можно стимулировать и работу по разумному ограничению отдельных видов природопользования в опасных зонах либо по созданию надлежащих систем защиты.

Для повышения безопасности важна не столько минимизация риска ущерба $R(Y)$ как произведения вероятности возникновения ущерба $p(Y)$ на его значение Y , сколько минимизация самой вероятности возникновения данного ущерба $p(Y)$. Минимизация риска $R(Y)$ по ущербам особенно мало приемлема в случае потенциальной возможности тяжелых убытков, часто трудноучитываемых. При этом нельзя исключить преднамеренного занижения общего ущерба за счет умышленного занижения стоимости возможных потерь и неразумного ограничения либо полного запрещения хозяйственной и др. деятельности в потенциально опасной зоне. В частности, имеется тревожная практика занижения реальной стоимости в судоходной отрасли, связанная со страхованием, на которую ссылаются норвежские гидротехники [10]. При этом может возникнуть и парадоксальная, на первый взгляд, ситуация, когда страхователю оказывается невыгодно вкладывать дополнительные средства в обеспечение безопасности путем создания средств защиты от наводнений, поскольку это может вести и к увеличению страховых премий. Если же задача безопасности изначально формулируется как задача снижения вероятности возникновения страхового случая, то в этом случае роль стоимостных показателей перестает быть решающей и становятся желательными вложения дополнительных средств в системы защиты для повышения безопасности.

Если провести регламентацию допустимого риска наводнений как вероятности превышения расчетного паводка (половодья), то страховой случай можно будет выбирать среди паводков, по своим параметрам превышающих расчетный (среди паводков с меньшей вероятностью превышения), и где дополнительный до равновероятного обобщенный ущерб максимальный (рисунок). При этом возможно страхование как общего риска по расчетному случаю, так и только дополнительного в зависимости от возможностей страхователя и страховщика.

Например, в соответствии с данными, приведенными на прилагаемом рисунке, в качестве расчетного страхового случая целесообразно выбрать ущерб $Y_{P,2} = 9 \times 10^2$ млн. руб., характеризующийся вероятностью возникновения $p_2 = 10^{-3}$ 1/год. При этом можно страховать либо общий ущерб, который влечет данный страховой случай, величиной $Y_{P,2}$, либо дополнительный ущерб $\Delta Y_{1-2} = Y_{P,2} - Y_{P,1}$.

Нами были отмечены только некоторые проблемы, которые придется решать при страховании убытков от наводнений. Несмотря на указанные затруднения, страхование может стать весь-

Вероятность превышения паводка p , 1/год

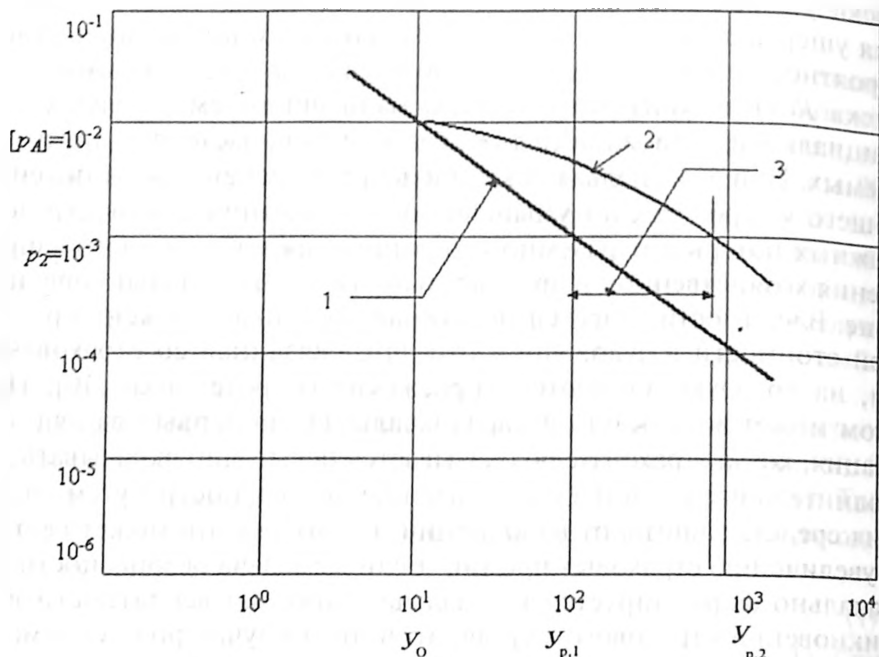


Рис. Пример выбора страхового случая при страховании риска ущерба от наводнений: 1 — линия равновероятных ущербов (при вероятном ущербе $[p_A] \times U_0$, равном 0,1 млн. руб/год); 2 — расчетная кривая риска ущерба; 3 — дополнительный ущерб $\Delta U_{1,2}$
 $[p_A] = 10^{-2}$ 1/год — допустимая вероятность превышения расчетного паводка при обобщенном ущербе от наводнения $U_0 = 10$ млн. руб.

ма динамичным способом возмещения ущерба от катастрофических, «сверхрасчетных» наводнений. Во-первых, наряду с чисто компенсационной функцией страхование «сверхрасчетных» наводнений может выполнять и превентивную функцию, поскольку будет стимулировать разработку и внедрение клиентом предупредительных мероприятий по снижению риска при расчетных паводках и половодьях. При страховании «сверхрасчетных» событий страховщик и страхователь имеют большую свободу выбора и могут рациональнее произвести коррекцию тарифа в зависимости от реального положения дел.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Environmental** experience gained from reservoirs in operation. Transactions of the 18-th Int. Congress on Large Dams. Vol.2. Q.69. Durban - South Africa. 1994.

2. Россия: социально-экологические водные проблемы //Под ред. А. М. Черняева. РосНИИВХ. -Екатеринбург: Изд-во Аэрокосмозоология. 1999.
3. Векслер А.Б., Ивашинцов Д.А., Стефанишин Д.В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. СПб.: Издательство ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденесева». 2002.
4. Справочник по страхованию в промышленности/ Пер. с нем. под ред. Н. А. Никологородского. М.: Страховой полис. ЮНИТИ. 1994.
5. Авдотьин В.П., Самсонов К.П. Оценка экономического ущерба от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: методологический аспект //Безопасность энергетических сооружений. Вып.2 – 3. М.:ОАО «НИИЭС». 1998.
6. Орлов А.В. Страхование гидротехнических сооружений //Безопасность энергетических сооружений. Вып.2 – 3. М.: ОАО «НИИЭС». 1998.
7. Иващенко И.Н. О проекте Федерального закона «Об обязательном страховании гражданской ответственности за причинение вреда при аварии гидротехнического сооружения» //Гидротехническое строительство. 2000. № 2.
8. Бернстайн П. Против богов: Укрощение риска/ Пер. с англ. -М.: ЗАО «Олимп-Бизнес». 2000.
9. Секей Г. Парадоксы в теории вероятностей и математической статистике: Пер. с англ. -М.: Мир,.1990.
10. The Norwegian Dam Safety Project. Main Report. Oslo.1992.

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ АНАЛИЗЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Авдотьин В.П., кандидат техн. наук, Самсонов В.П. доктор экон. наук, Егорова И.В., Сухоручкина Ю.С., Широков Г.В., инженеры (ВНИИ ГОЧС), Дзыбов М.М., инженер (Счетная палата РФ)

Чрезвычайные ситуации (ЧС) техногенного, природного и иного характера (в том числе биолого-социальные чрезвычайные ситуации, вызванные террористическими актами и военными действиями, и т.д.) являются важным фактором («фактором ЧС»), определяющим общественно-политическую и социально-экономическую обстановку в стране и оказывающим все более заметное негативное влияние на развитие Российской Федерации.

Деятельность по предупреждению и ликвидации ЧС техногенного, природного и иного характера является важной составляющей деятельности по обеспечению национальной безопасности Российской Федерации.

Все без исключения ЧС техногенного, природного и иного характера наносят или могут нанести ущерб интересам личности, общества и государства, выражающийся в следующем:

- ущерб жизни и здоровью населения;
- экономический ущерб, связанный с материальными потерями, вызванными повреждениями и разрушениями производственных и непроизводственных объектов, нарушением их функционирования, затратами на предупреждение и ликвидацию ЧС;
- экологический ущерб — ущерб природной среде;
- другие виды ущерба, в том числе ущерб культурным ценностям, моральный ущерб и т.д.

Это принципиально разные виды ущерба, несводимые друг к другу и подлежащие раздельному учету при анализе и прогнозировании влияния ЧС техногенного, природного и иного характера на социально-экономическое развитие страны.

Проблема сведения различных видов ущерба от ЧС и измерения его с помощью стоимостных измерителей (рублей, долларов) является на сегодняшний день дискуссионной.

Тем не менее в аналитических целях, в интересах получения обобщенных интегральных оценок влияния фактора ЧС представляется возможным использование экономических оценок неэкономических составляющих ущерба от ЧС, в том числе ущерба жизни и здоровью людей, экологического ущерба, ущерба культурным ценностям, морального ущерба, других видов ущерба.

Анализ и прогнозирование экономического ущерба от ЧС осуществляется с разными целями и для решения самых различных прикладных задач, в том числе как для научно-исследовательских целей, так и для обоснования практических решений, принимаемых при обосновании и осуществлении мероприятий, направленных на предупреждение и ликвидацию ЧС, при выделении на эти цели соответствующих ассигнований.

К числу основных практических задач, использующих результаты анализа и прогнозирования экономического ущерба от ЧС, относятся:

- обоснование ассигнований бюджетов всех уровней, а также средств из внебюджетных источников на осуществление мероприятий по предупреждению и ликвидации ЧС;
- обоснование инвестиционных проектов по предупреждению ЧС;
- лицензирование деятельности опасных производственных объектов;
- страхование рисков гражданской ответственности;

возмещение ущерба вследствие ЧС;
обоснование любых инвестиционных проектов в части учета в них рисков ЧС и т.д.

Необходимо отметить, что решение всех указанных задач должно осуществляться на единой методической основе, опираться преимущественно на данные государственной статистики и давать сопоставимые результаты.

Тем не менее следует иметь в виду, что результаты оценки ущерба (фактического или прогнозируемого) при решении различных практических задач могут заметно различаться в силу несовпадения целей оценки ущерба, методических особенностей учета или неучета отдельных составляющих экономического ущерба — прямого и косвенного.

Однако в любом случае в основе анализа и прогнозирования экономического ущерба от ЧС (как и во всех иных сферах экономического учета) должен лежать *систематический государственный статистический учет* чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и иного характера и наносимого ими ущерба, в том числе экономического.

Государственный статистический учет чрезвычайных ситуаций должен осуществляться прежде всего силами и средствами *Государственного комитета Российской Федерации по статистике* (Госкомстатом России) на основе первичной информации, т.е. информации, формируемой на уровне «первичного звена»: на уровне организаций (предприятий) и муниципальных органов власти.

При этом в части сбора сведений о ЧС должен быть обеспечен охват всех организаций, по которым Госкомстат России ведет систематические статистические наблюдения. Также должен быть обеспечен охват всех территориальных звеньев, позволяющий получить исчерпывающую информацию об ущербе от ЧС на уровне субъектов федерации, а затем на уровне Российской Федерации в целом.

Сведения систематического государственного статистического учета ЧС должны дополняться:

данными *ведомственного* статистического учета и анализа, результатами *научно-исследовательских* прогнозно-аналитических разработок,

материалами *частного и выборочного* характера, полученными в процессе осуществления лицензирования, страхования, разработки инвестиционных проектов, бизнес-планов и т.д.

Деятельность по анализу и прогнозированию ущерба от ЧС должна ориентироваться на периоды разной продолжительности.

В практике экономического анализа и прогнозирования с использованием сведений статистического учета принято выделять периоды следующей продолжительности: краткосрочный, среднесрочный, долгосрочный.

Краткосрочный период (календарный год, а также — квартал, месяц, неделя, сутки) связан с продолжительностью осуществления текущей хозяйственной деятельности и, что весьма существенно, — с реализацией бюджетного процесса в Российской Федерации.

Среднесрочный период (3 — 5 лет) в основном связан с реализацией инвестиционных проектов, мероприятий целевых программ разного уровня, осуществлением установок экономической политики государства. Среднесрочный период также в основном соответствует циклу деятельности высших органов государственной власти в Российской Федерации.

Долгосрочный период (5 — 10 лет и более) соответствует продолжительности реализации стратегических установок социально-экономического развития Российской Федерации.

В настоящее время в основе государственного управления социально-экономическими процессами в Российской Федерации лежит бюджетный процесс, реализуемый с циклом в один календарный год (т.е. в краткосрочном режиме).

Информационное обеспечение бюджетного процесса осуществляется:

в части предоставления сведений о состоянии экономики Российской Федерации — в первую очередь Государственным комитетом Российской Федерации по статистике, другими федеральными министерствами и ведомствами, субъектами Российской Федерации;

в части анализа и прогнозирования социально-экономического развития Российской Федерации — в первую очередь Министерством экономического развития и торговли Российской Федерации совместно с другими федеральными министерствами и ведомствами, субъектами Российской Федерации.

При этом «фактор ЧС» подлежит учету на всех уровнях сбора информации, ее агрегирования и обобщения, анализа и прогнозирования показателей социально-экономического развития организаций [предприятий], территориальных образований, Российской Федерации в целом.

Целесообразно выделить три основных уровня формирования информации об экономическом ущербе от ЧС: нижний, средний и верхний (макроэкономический) (см. схему).

Верхний (макроэкономический) уровень	Анализ и прогнозирование социально-экономического развития Российской Федерации с учетом фактора ЧС	
	Минэкономразвития России	МЧС России
Средний уровень	Субъекты федерации	Отрасли
Госкомстат России		
Нижний уровень – уровень «первичного звена»	Организации [предприятия]	Муниципальные образования

Схема формирования информации об экономическом ущербе от ЧС.

Нижний уровень — уровень «первичного звена» (организации [предприятия], муниципальные образования). Это основной уровень сбора первичной информации о «факторе ЧС» — об экономическом ущербе от ЧС, поскольку именно в организациях [на предприятиях] ведется силами бухгалтерских и планово-экономических служб учет состояния имущества организаций [предприятий], его выбытия по разным причинам, в том числе вследствие ЧС. Стоит задача сделать доступной эту информацию органам государственной статистики и затем на этой основе обеспечить возможность ее дальнейшей обработки, использования при анализе и обобщении на среднем и верхнем (макроэкономическом) уровне.

На уровне муниципальных образований должна быть получена первичная информация об экономическом ущербе от ЧС в социальной сфере, в том числе данные, не основанные на бухгалтерском учете.

Предложения по формам и показателям — основным сведениям об ущербе от ЧС — представлены ниже.

Средний уровень — уровень субъектов федерации и отраслей [министерств и ведомств]. Это основной уровень агрегирования и обобщения первичной информации о «факторе ЧС».

На уровне субъектов федерации должно быть обеспечено получение сводной информации об экономическом ущербе от ЧС для каждого субъекта Российской Федерации.

Сводная информация на уровне субъекта федерации формируется путем:

агрегирования данных первичного учета — их сложения по всем экономическим и социальным объектам на территории субъекта федерации;

обобщения данных — их досчета и восполнения недостающей информации путем соответствующих оценок, в том числе экспертных, формирования макроэкономических показателей регионального уровня с учетом «фактора ЧС» — валового регионального продукта (ВРП), его снижения вследствие ЧС и т.д.

Совокупность данных по всем субъектам федерации (без пропусков и исключений) должна обеспечить полный охват всех ЧС — возможность их агрегирования и обобщения на федеральном уровне — на уровне Российской Федерации.

На отраслевом уровне (в разрезе министерств и ведомств) должно быть обеспечено получение сводной информации об экономическом ущербе от ЧС в отраслевом (функциональном) разрезе (т.е. применительно к организациям (предприятиям) отрасли или применительно к функциональной сфере, за которую отвечает соответствующее министерство (ведомство).

Сводная отраслевая информация предполагает:

агрегирование данных первичного учета в разрезе экономических и социальных объектов, относящихся к соответствующей отрасли или функциональной сфере деятельности;

обобщение данных — их досчет и восполнение недостающей информации путем соответствующих оценок, осуществления отраслевого экономико-математического моделирования и т.д.;

дополнение данных путем учета отраслевой специфики ущерба от ЧС.

Совокупность отраслевых данных, т.е. информации, сформированной министерствами и ведомствами (всеми или основными), в принципе не способна обеспечить полный охват всех ЧС на федеральном уровне — на уровне Российской Федерации. В то же время отраслевые данные об ущербе от ЧС способны дать более содержательную информацию о чрезвычайных ситуациях, чем сводная информация, полученная от субъектов федерации.

Верхний уровень — уровень Российской Федерации (федеральный, макроэкономический уровень).

Это уровень сводного макроэкономического агрегирования информации об экономическом ущербе от чрезвычайных ситуаций — «факторе ЧС», сформированной на уровне субъектов федерации, дополненной и развитой информацией министерств и ведомств (отраслевой информацией).

На макроэкономическом уровне кроме формирования сводных данных об ущербе от ЧС в целом по Российской Федерации должно осуществляться ее обобщение — отражение в макроэко-

номических показателях социально-экономического развития Российской Федерации таких показателей, как валовой внутренний продукт (ВВП), объемы промышленного и сельскохозяйственного производства, показатели уровня жизни населения, показатели федерального бюджета (доходы, расходы, распределение расходов по статьям) и т.д.

В целом основная задача учета влияния «фактора ЧС» на социально-экономическое развитие Российской Федерации состоит в утановлении воздействия ущерба от ЧС, регистрируемого на уровне «первичного звена», на макроэкономические показатели, характеризующие социально-экономическое развитие страны в целом и, как следствие, на показатели бюджета Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Федеральный закон** от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».
2. **Шахраманьян М.А., Акимов В.А., Козлов К.А.** Оценка природной и техногенной безопасности России. Теория и практика. М.: ВНИИ ГОЧС. 1998.
3. **Авдотьян В.П., Смелов П.Т.** Получение научно-обоснованных оценок ущерба от чрезвычайных ситуаций для экономики страны и регионов. Отчет о НИР. ВНИИ ГОЧС. 1999.
4. **Шахраманьян М.А., Самсонов К.П., Авдотьян В.П. и др.** Разработка концепции, принципов и методов оценки экономических последствий ЧС природного и техногенного характера. М.: ВНИИ ГОЧС. 2000.

ИЗ ИНТЕРВЬЮ МИНИСТРА МЧС РФ С.К. ШОЙГУ

*корреспонденту ж. «Огонек» А. Никонову**

...должна появиться новая для нас культура собственной безопасности. Вот было наводнение в Якутии. И что? 1% застрахованных домов. И практически 0% застрахованных граждан. Люди до сих пор полагают, что им самим ни о чем заботиться не надо — государство придет и все сделает. Это как раз отсутствие культуры безопасности. А государство действительно приходит и оказывает помощь.

- *И пока вы будете приходить и помогать, пока вы будете строить дома взамен снесенных, никто так и не будет страховать свое жилье.*

- Верно. Пока мы не сделаем так, чтобы человек сам заботился о себе и своих близких, у нас все так и будет продолжаться. Люди

* ж. Огонек. 2002 г. декабрь. №48. стр. 14-17. «Груз 2003»

будут продолжать строить дома там, где их строить нельзя. Спрашивается, почему архитектор отвел землю под застройку в затопляемой зоне?

- Если я — архитектор, отвел для строительства опасное место, а потом с этим домом что-то случилось, и мне пришлось возмещать из своего кармана за дом, за утрату здоровья, гибель людей — вот при таком подходе я больше в зоне затопления или схода селя ни одного разрешения на строительство не дам. Даже за взятку. Потому что никакая взятка не перекроет моих убытков. «Нет, парень, — скажу я тогда. — здесь я тебе строить не разрешу. Потому что у нас тут дамба, и, если ее, не дай бог, прорвет, я буду из своего кармана платить».

- Или сидеть...

- Или сидеть! Но нет же такой системы ответственности. Вот взять последнее наводнение в Новороссийске. Приехал, мне говорят: вот водохранилище у нас, дамба, туда-сюда... Но явно что-то не договаривают. Я слушаю и не могу понять, чего их эта дамба так беспокоит? Я то точно знаю, что в советское время она проектировалась с учетом всех необходимых норм, в том числе возможности прорыва.

- Приезжаю на место. И пока еду к дамбе в русле, в канале сброса воды, вижу один особняк, другой. Спрашиваю: «А кто решил тут строить? Персонально — кто?». — «Да, — говорят, — был тут один глава администрации района. Видимо, он...».

- *У нас заводят уголовные дела на тех, кто не предупредил о бедствии, на тех, кто не эвакуировал... Но ни одного дела нет на тех, кто разрешил строить в местах, где рано или поздно обязательно снесет или зальет. Никто не отвечает за это!*

- Еще один момент... Приезжаем, смотрим — разрушено раз, два, три, четыре... десять домов. Значит надо построить десять домов. Начинаем строить десять домов. На следующий день приходят жители и говорят: по социальным нормам, утвержденным в законодательном порядке, положено иметь 18 м² на одного человека, так что будьте любезны построить нам дом 270 м². «Как же так? Ведь у вас был дом в 36 «квадратов», мы вам такой и строим!...» - «А нас там прописано 49 человек». Это я вам реальную историю рассказываю.

- *Действительно 49 человек было прописано?*

- На 36 метрах!... Бывает две, три семьи прописано. И приходится строить, соответственно, по два и по три отдельных дома. И

подобных случаев много. По Осетии одной только 23 дела в суде. Спросите в паспортном столе, зачем вы на 36 «квадратах» пропи-сали 49 человек? Явно, что не за красивые глаза. Но никто не несет за это ответственности потому, что в законе дыра.

- Никакая страховая компания не стала бы страховать дом, если он построен в зоне затопления. Может быть, вы видели по телевизору скандал, как я с одной женщиной ругаюсь. Она мне говорит: «А я не хочу с этого места уезжать! Стройте мне дом на этом месте взамен снесенного паводком!». Я говорю: «Нет, мы вам вон там построим, потому что здесь строить нельзя, опять снесет». Она: «Нет, здесь хочу!».

- *И кто кого переспорил?*

- Угадайте с трех раз... Мы сейчас строим 18 тысяч домов. И почти везде одна и та же история — дом был построен в зоне затопле-ния, дом был сложен из саманника, дом не был застрахован. Саманник — это блоки из смеси глины с соломой, они даже не обжигаются, чуть подмочил — дом рушится. Ну не строй ты в зоне затопления! А если строишь, делай из кирпича, чтобы не рухнул. Не хочешь ни того, ни того? Ну, тогда хоть застрахуй! Что-то одно сделай нормально!... Дальше так продолжаться не может! Нужно, наконец, набраться мужества и сказать: «Все ре-бята, государство восстанавливает только системы жизнеобеспе-чения, а дома восстанавливайте за счет страховых компаний».

- *Я надеюсь с предприятиями другая ситуация?*

- Да абсолютно аналогичная! Вот вы акционировали объект. С од-ной стороны, он представляет опасность для всех окружающих. С другой — несет лично вам прибыль. Некоторое время несет, а потом, как водится, взрывается. Глава администрации района при-бегает и говорит: «Мама моя золотая, это же градообразующее пред-приятие! Его надо немедленно восстановить!». А хозяева предприя-тия в сторонке. Ждут, когда государство им поможет...И помогает. И восстанавливает. Потому что — градообразующее.

- А акционеры и не думают страховать предприятие, отклады-вать на развитие производства, обновление основных фондов... Вы-жимают последнее, доводят амортизацию до нуля. И ждут помо-щи государства.

- Допустим, акционируют Саяно-Шушенскую ГЭС. Но ника-кой собственник, даже самый добросовестный, самый правиль-ный, не в состоянии обновить здесь даже самую малую часть про-изводства. Помните уникальную операцию по доставке на эту ГЭС колеса турбины?... Уникальная была операция! Северным морс-

ким путем из Мурманска турбина выходила. Потом шла по Енисею вверх... Какой акционер может повернуть такую операцию? Это государственный уровень задачи! Поэтому мы стараемся доказать, что при акционировании генерирующих мощностей на первом месте должна стоять безопасность. И только механизмы страхования смогут регулировать эту деятельность. А сиюминутный интерес акционера может ее и не обеспечить. Любой акционер, приходя на предприятие, первым делом снижает непроизводительные затраты. А безопасность — непроизводительные затраты. И стоит дорого.

- *Возможно ли предсказывать катастрофы? Вы используете такую новомодную научную новинку, как математическая теория катастроф?*

- Наводнение сегодня можно спрогнозировать с точностью до 70%. Приблизительно та же ситуация с лесными пожарами и лавинами. А, скажем, прогнозирование землетрясений науке пока не поддается.

Сегодня наша важнейшая задача — это вместе с другими ведомствами и научными институтами и создать всероссийскую систему мониторинга и прогнозирования. На федеральном и региональном уровнях эту систему практически создали. А вот формирование территориальных центров мониторинга и прогноза происходит, к сожалению, не так быстро. Отсюда проблемы... А что касается математических моделей катастроф, то мы пытаемся разрабатывать их вместе с различными НИИ, в том числе Институтом прикладной математики имени Келдыша.

ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНЫХ ФОРУМОВ

В 2002 г. состоялся ряд Международных научно-технических собраний, посвященных вопросам безопасности гидротехнических сооружений, на которых значительное место было отведено изучению параметров паводков и вопросам защиты от них. Ниже приводятся сведения о материалах по проблеме паводков, представленных на этих форумах.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАДЁЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

(по материалам международного симпозиума, Санкт-Петербург, 2002 г.)

С 28 мая по 1 июня 2002 г. в Санкт-Петербурге проходил международный симпозиум, посвященный вопросам надёжности и безопасности гидротехнических сооружений. Симпозиум был организован Российским национальным комитетом МАГИ и Всероссийским научно-исследовательским институтом гидротехники им. Б.Е. Веденеева. В нём принимали участие представители 25 стран.

Вниманию участников симпозиума было предложено 132 доклада. Причём 83 доклада были сделаны российскими специалистами, 3 доклада совместно российскими и зарубежными учёными, а 46 докладов иностранными специалистами и учёными стран СНГ. На симпозиуме были представлены 14 докладов сотрудников ОАО «НИИЭС» (Москва) и его Волгоградского филиала. Тезисы докладов были опубликованы в сборнике объёмом 315 страниц, а также представлены в электронной версии на CD.

Все доклады симпозиума условно можно разделить на две группы: первая, посвящённая безопасности и надёжности гидротехнических сооружений, обеспечиваемых путём применения ряда технических решений или повышения пропускной способности водосбросных сооружений и улучшения условий пропуска паводковых расходов; вторая, связанная с уточнением методов прогноза паводковых расходов, прогнозированием ущерба от прорыва напорного фронта и посвящённая предотвращению и ликвидации аварий на гидротехнических сооружениях. Значительное внимание было уделено также многим прикладным задачам, связанным с безопасностью существующих сооружений.

Наиболее примечательными и имевшими значительный позитивный резонанс были доклады, посвящённые математическому

моделированию катастрофических паводков. В докладе А.Н.Милитеева и В.В.Беликова «Компьютерное моделирование катастрофических паводков» отмечена сложность взаимодействия пойменного и руслового потоков, так как направление движения пойменного и руслового потоков не совпадают, и в реальных условиях имеет место перетекание потока из русла на пойму и обратно. Существенные различия в размерах русловых и пойменных участков, учёт реальных планово-высотных характеристик долины и русла и расположенные на пойме сооружения создают дополнительные трудности при подготовке исходных данных и построении адекватных численных алгоритмов.

Авторами приводятся методы математического моделирования паводковых течений с использованием оригинальных математических моделей и численных схем. Моделирование базируется на решении уравнения мелкой воды на адаптивных нерегулярных сетках. Разработана двухслойная по вертикали модель русло-пойменного потока, в которой слой ниже бровок русла описывается одномерными уравнениями, а слой выше бровок — двухмерными.

В докладе отмечено, что подготовка исходных данных и визуализация результатов базируется на применении электронных географических карт и картографических редакторов для работы с ними, а в качестве дополнительной информации используются данные эхолотирования подводного рельефа с применением систем спутникового позиционирования (GPS). Компьютерные программы «FLOOD» и «BOR», которые учитывают специфику паводковых течений, были апробированы на ряде природных объектов (п/о Ямал, Европейский север, Западная Сибирь, Приморье, бассейн Волги) и показали высокую точность расчётов.

В докладе: «Расчёт параметров волн прорыва в бьефах гидроузлов с использованием стандартизированных компьютерных ГИС-технологий для ввода исходных данных и представления результатов» (авторы: В.В.Беликов, А.Н.Милитеев, А.М.Прудовский, В.Б.Родионов — ОАО «НИИЭС», В.В.Кочетков — ГОСГИСЦЕНТР) было отмечено, что расчёт параметров прорывного паводка достаточно сложная многофакторная математическая задача и динамика процесса определяется разнообразными природными условиями и конструктивными особенностями гидроузла. Основные сложности связаны с созданием универсальных счётных алгоритмов, с подготовкой исходных данных и представлением результатов.

В докладе представлена последовательность подготовки данных, проведения расчётов и представления результатов с ис-

пользованием ГИС-технологий. В процессе счёта в среде ГИС можно наблюдать за динамикой волны прорыва (графики изменения параметров в заданных точках и на линиях, фрагменты плана течения), а по завершению счёта на экран монитора или принтер выводятся максимальные глубины затопления, векторное поле и модули максимальных скоростей, время добегающего фронта и гребня волны, а также продолжительность паводка.

Разрушение грунтовой плотины происходит, как правило, с образованием прорана, которое в свою очередь может быть вызвано локальным переливом через гребень плотины, суффозией или взрывом в результате диверсионного акта. Независимо от механизма возникновения, формы и размеров первоначального отверстия в напорном фронте, дальнейшее его развитие имеет идентичный характер. Анализ условий развития прорана при прорыве грунтовой плотины и результаты исследований развития проранов в грунтовых плотинах для создания приближённой методики, основанной на полуэмпирическом подходе, определения характеристик процесса приводятся в докладе А.М.Прудовского, К.Р.Пономарчук: «Исследования формирования прорана в грунтовой плотине при прорыве напорного фронта».

Авторами отмечается, что математическая модель изучаемого явления состоит из пяти уравнений, одним из которых является уравнение интенсивности развития прорана. Для получения искомым зависимостей выполнена серия физических лабораторных опытов. Сопоставление результатов исследований с натурными данными позволяет полагать, что результаты, полученные при применении предложенной методики, в большинстве случаев ближе к натуре, чем результаты расчётов с использованием ранее применяемых методов. На основании разработанной методики составлена программа расчёта развития прорана, которая включена в качестве составного блока в разработанную в ОАО «НИИ-ЭС» программу расчёта прорывного паводка «BOR».

Весьма актуальным, на наш взгляд, является доклад Г.А.Судольского (ОАО «ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева», Санкт-Петербург) «Обеспечение безопасности пропуска расходов воды при строительстве крупного гидроузла». Автор подчёркивает существенную, а подчас и главенствующую роль гидравлических исследований на всех стадиях как проектных проработок, так и на разных этапах строительства гидроузла. Лишь методы физического моделирования могут дать достаточно обоснованное представление об условиях пропуска расходов через недостроенные бетонные сооружения, о гидравлике силь-

но раздробленного потока, об околокритических течениях, состояние поверхности которых не поддаётся строгому математическому описанию. В докладе рассмотрен пример гидравлического обоснования ряда этапов пропуска строительных расходов при возведении Бурейской ГЭС, приводятся основные результаты экспериментальных гидравлических исследований, широко использованных при строительстве гидроузла.

Значительный интерес как российскими, так и зарубежными специалистами был проявлен к докладу «Увеличение пропускной способности водосбросов с использованием затворов системы «Гидроплюс»», представленному Жаном Луи Бренаком и Патриком Лантомом (Hydroplus International, Франция). В докладе изложены как широкие возможности использования затворов системы «Гидроплюс» для увеличения пропускной способности, так и перспективы дальнейшего развития этого направления. Приведённые в качестве примера завершённые проекты — Блэк Рок (США), Монтсалвенс (Швейцария) и Лиль Дэм (Австрия) — иллюстрируют широкие возможности системы затворов «Гидроплюс» для реализации различных задач обеспечения пропускной способности водосбросов.

В качестве докладов, представляющих наибольший интерес для решения проблемы наводнений, можно указать следующие:

1. **А.М. Швайнштейн, Г.К. Дерюгин.** Об обеспечении пропуска расчётных расходов через сооружения для повышения надёжности и безопасности гидроузлов России.
2. **В.Б. Родионов, Г.Ф. Онипченко, Jean Louis Brenac, Patrick Lantheau.** Восстанавливаемые затворы «Гидроплюс» — экономичное решение для безопасности водосливов.
3. **Jean Louis Brenac, Patrick Lantheau** (France). Увеличение пропускной способности водосбросов с использованием затворов системы «Гидроплюс».
4. **Г.А. Судольский.** Обеспечение безопасного пропуска расходов воды при строительстве крупного гидроузла.
5. **А.М. Прудовский, К.Р. Пономарчук.** Исследования формирования прорана в грунтовой плотине при прорыве напорного фронта.
6. **М.Ж. Франса, А.В. Almeida** (Portugal). Экспериментальные исследования процесса прорыва каменнонабросной плотины.
7. **В.В. Беликов, А.Н. Милитеев.** Компьютерное моделирование катастрофических паводков.
8. **Т.Г. Войнич-Сяноженцкий, В.Г. Созанов.** Кинематическая волна в приложении к расчётам максимальных расходов половодий и паводков.

9. **В.В. Беликов, А.Н. Милитеев, А.М. Прудовский, В.Б. Родионов, В.В. Кочетков.** Расчёт параметров волн прорыва в бьефах гидроузлов с использованием стандартизированных компьютерных ГИС-технологий для ввода исходных данных и представления результатов.
10. **Т.Г. Войнич-Сяноженцкий, В.Г. Созанов.** Аналитический расчёт волны прорыва при разрушении грунтовой плотины и трансформации волны по руслу реки.
11. **В.И. Климович.** Верификация численных алгоритмов расчёта параметров волны прорыва в рамках двумерной модели мелкой воды.
12. **А.В. Мишуев, А.А. Комаров, А.А. Гусев.** Методы расчёта параметров волн прорыва, возникающих при разрушении напорных гидротехнических сооружений.
13. **Kazuya Inoue, Kenji Kawaike, Keiichi Toda (Japan).** Математическая модель риска наводнений, вызываемых сильными дождями в нижнем течении реки.
14. **Д.В. Стефанишин, В.Б. Штильман.** Оценка вероятности перелива воды через гребень плотины вследствие недостаточной пропускной способности водопропускных сооружений.
15. **Д.В. Стефанишин** Оценка структурной надёжности и безопасности гидротехнических сооружений.
16. **В.В. Беликов, А.Н. Милитеев, Ю.М. Колесников, В.В. Кочетков.** Компьютерная модель р. Москвы как инструмент оптимизации управления режимами водохранилищ при пропуске половодий и осуществлении гидравлических промывок русла.
17. **А.Е. Асарин, С.П. Ивасенко.** Двухступенное управление режимом работы противопаводковых водохранилищ.

Сборник тезисов симпозиума и CD с текстом докладов можно приобрести по адресу:

195220 Санкт-Петербург
Ул. Гжатская д.21
ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»
Научно-техническая библиотека.

А.Н. Юрченко, кандидат техн. наук (ОАО «НИИЭС»)

2-ОЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ ПО ЗАЩИТЕ ОТ НАВОДНЕНИЙ. FLOOD DEFENCE' 2002

2-ой Международный Симпозиум по защите от наводнений состоялся в Пекинском зале науки и техники 10 ... 13 сентября 2002 г. Симпозиум был организован университетом Цинхуа, Исследовательским Центром защиты от наводнений и засух Министерства водных ресурсов КНР, китайского института водных ресурсов водноэнергетических исследований и Международным исследовательским и образовательным Центром по эрозии и занесению.

Симпозиум привлек внимание более двухсот исследователей, эксплуатационников, преподавателей и официальных лиц примерно из сорока стран, работающих в области наводнений или интересующихся проблемами их контроля. Выступившая среди ряда высокопоставленных представителей правительственных и международных научных организаций, обратившихся с приветствиями к участникам Симпозиума, вице-президент Всекитайского Народного Консультативного Совета г-жа Женгин Киан отметила, что стратегия защиты от наводнений в Китае основывается на опыте многовековой борьбы с паводками за счет принятия адекватных мероприятий, обеспечивающих приемлемые условия жизни при постоянном проявлении паводков. Только за счет отвода большого объема селевых паводковых вод Китай может развивать районы густо заселенных и плодородных пойм аллювиальных рек, имеющих площадь около 1 млн. км².

Симпозиум дал возможность представить обзор современного состояния изученности наводнений, а также инженерных и других мер защиты от них. Было сосредоточено внимание на лучшем понимании механизмов паводков, связанных с ними экологических проблем, вопросах изменения климата и его влияния на экстремальные гидрологические явления. Приведены сведения о новых подходах к разработке стратегии контроля паводков. Эти аспекты симпозиума были освещены в 11 обобщающих докладах и 10 докладах приглашенных лекторов, являющихся международно признанными специалистами, а также примерно в трехстах сообщениях участников. Симпозиум, кроме того, представил возможность участникам узнать о развитии гидротехники в Китае.

Во время проведения данного форума был учрежден постоянный комитет Международного Симпозиума по защите от на-

воднений. Задачами комитета является обзор современного состояния изучения паводков, разработка инженерных и других мероприятий по защите от них, а также выбор тематики, мест проведения и организаторов очередных симпозиумов. На первом заседании комитета его председателем избран доктор Эрих Платэ. Было решено, что офис секретариата размещается в Центре защиты от наводнений и засух Министерства водных ресурсов КНР и что следующий симпозиум состоится в Ниджмечене (Нидерланды) весной 2005 г.

После завершения Симпозиума изданы 2 тома трудов, содержащих 224 доклада специалистов из 40 стран. Основные темы докладов относятся к следующему: риск наводнений и бедствия, связанные с ними, регулирование паводков и стратегия контроля паводков; гидрология и метеорология; инженерные мероприятия по смягчению последствий паводков; история и опыт контроля паводков; предсказание паводков; моделирование паводков; информационные системы регулирования паводков; паводки в городах; регулирование водохранилищ; размыв и занесение наносами; оползни и сели; воздействие паводков на окружающую среду.

Подробная информация о Симпозиуме может быть получена по E-mail: <http://www.irtces.org/issahu/21SFD.htm>.

Труды содержат 1733 стр. в твердом переплете. Издатель: Science Press New York Ltd. ISBN: 1-880132-54-0.

Труды (книги + CD ROM) могут быть заказаны по цене 110 ам. долларов по адресам:

Dr. Cheng LIU

IRTCES, P.O. Box 366, No. 20

Chegongzhuang West Rd.

Beijing, 100044, P.R. China

Fax: +8610 68411174,

E-mail: chliu@iwhr.com

Dr. Baosheng Wu

Dept. of Hydraulic Engineering,

Tsinghua University

Beijing 100084, P.R. China

Fax: +8610 62772643

E-mail: baosheng@tsinghua.edu.cn

А.М. Прудовский, доктор техн. наук (ОАО «НИИЭС»)

ПОДДЕРЖАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ПЛОТИН

(по материалам международного конгресса, Мадрид, 2002 г.)

В ноябре 2002 г. в Мадриде прошел Международный конгресс под названием «Dam Maintenance and Rehabilitation», что весьма условно можно перевести как «Поддержание работоспособности и реконструкция плотин». В работе конгресса, организованного Испанским общественным объединением «Плотины и водохранилища», участвовали представители 39 стран.

На конгресс было представлено 139 докладов (61 на английском и 78 на испанском языке), в том числе три заказных, как бы постановочных, и три генеральных, обобщающих, которые были опубликованы в объемистом (974 стр.) томе. Работа конгресса проходила в трех группах (по одному дню на каждую тему), объединявших доклады, посвященные или затрагивающие следующие направления:

Тема 1. Подготовительные мероприятия и регулярное обеспечение работоспособности гидроузлов — 51 доклад.

Тема 2. Увеличение регулирующей способности водохранилищ и пропускной способности водосбросов — 49 докладов.

Тема 3. Повышение устойчивости и водонепроницаемости (плотин) — 39 докладов.

Российские инженеры и ученые представили на Конгресс пять докладов:

1. *И.Н. Иващенко, И.Ф. Блинов, Л.В. Комельков.* Критерии безопасности и диагностика состояния сооружений при их эксплуатации.

2. *И.Н. Иващенко, В.Г. Желанкин.* Оценка риска существующих плотин.

3. *Д.Б. Радкевич, А.В. Орлов.* Практика государственного надзора за безопасностью ГТС в Российской Федерации (законодательство и нормативы).

4. *А.Е. Асарин.* Предвиденные и неожиданные последствия срезки пиков паводков некоторыми российскими водохранилищами.

5. *В.И. Брызгалов.* Восстановление работоспособности системы «плотина-основание» Саяно-Шушенской ГЭС.

В числе наиболее содержательных докладов более десяти было посвящено вопросам гидрологической безопасности гидроузлов, представляющим интерес для тематики настоящего выпуска сборника «Безопасность энергетических сооружений».

Самым примечательным, на наш взгляд, был генеральный обобщающий доклад по теме 1, подготовленный известным европейским гидротехником, бывшим Президентом Международной комиссии по большим плотинам, профессором Ломбарди.

В обзорной части доклада особый интерес представляет попытка структурирования классического метода оценки риска промышленных объектов применительно к гидротехническим объектам.

Выделяются следующие этапы процесса оценки риска:

- оценка возможного ущерба при прорыве плотины;
- идентификация учитываемых опасностей (рисков);
- анализ этих рисков в форме отдельных событий или дерева;
- определение вероятности таких событий;
- вычисление совместной вероятности факторов риска для определения обобщенной вероятности прорыва;
- оценка риска как произведения общего (суммарного) ущерба и вероятности прорыва;
- определение приемлемого риска.

Оцененный в результате этих процедур риск может использоваться для решения следующих задач:

- как собственно рисковый критерий;
 - для определения страховой премии;
 - для принятия экстренных ремонтно-восстановительных мер;
 - для определения первоочередных действий или капиталовложений;
 - для составления плана экстренных мероприятий;
 - или, в современных терминах, для принятия решений.
- По мнению проф. Ломбарди, развитие в последние десятилетия рискового подхода оказало положительное влияние на проектирование, строительство, эксплуатацию и мониторинг гидротехнических сооружений. В числе достижений отмечаются:
- повышение осведомленности инженеров в вопросах риска;
 - повышение осведомленности исследователей о существующих неопределенностях;
 - развитие сценарных подходов при оценке неблагоприятных воздействий на сооружения;
 - улучшение понимания связей между воздействиями на сооружения и их функционированием;
 - использование дерева событий и других подобных приемов;
 - стимулирование поиска менее чувствительных конструкций и более надежных водосбросных устройств;
 - стремление устанавливать очередность действий.

Проф. Ломбарди цитирует ироническое определение простоты рискового анализа, данное его неназванным другом:

- «Анализ риска для ГТС весьма прост, если Вы угадываете или придумываете неизвестную вероятность события;
- строите общую гипотетическую вероятность прорыва;
- произвольно решаете, насколько последствия прорыва приемлемы для населения и, наконец,

ни за что не отвечаете и пишете статью об анализе риска и безопасности плотины.»

У самого проф. Ломбарди, на самом деле не согласного с иронизирующей коллегой, время от времени возникает вопрос: Нет ли некой ловушки в методе оценки риска для авторов и пользователей подхода? Наибольшие сомнения вызывают у него понятие и количественное значение «приемлемого (допустимого) риска». Ведь жителю нижнего бьефа плотины вряд ли ясна разница между вероятностями опасного для него события 10^{-2} и 10^{-20} . Ему нельзя объяснить, почему, живя в маленькой деревне, он должен подвергаться опасности затопления в 100 раз чаще, чем житель большого города...

Из докладов по теме 1 вытекают, что дополнительного обсуждения требуют следующие вопросы:

- определение понятия безопасности;
- оценка вероятности дефекта сооружения;
- технический мониторинг и выявление дефектов;
- приемлемость остаточного риска;
- ответственность за определение (оценку) риска.

Весьма интересен доклад немецких ученых (Huber и др., Аахенский технологический университет), посвященный принципам и процедуре определения ущербов (социального, экологического и экономического) от затопления при прорыве плотин в зависимости от расчетных параметров прорывной волны.

Детальность и обстоятельность описанных авторами исследований могут иллюстрировать законодательные положения края Северный Рейн-Вестфалия, охватывающие все плотины высотой более 5 м с водохранилищами объемом не менее 100 тыс. м³ и включающие объекты шести типов: плотины и водосливы; плотины хвостохранилищ на водотоках; прочие плотины, требующие мер безопасности; противопаводковые водохранилища; водоемы ГАЭС; плотины наливных хвостохранилищ.

Структура процесса оценки риска, входящего в общую процедуру управления риском, включает 6 фаз: анализ риска, собственно риск, оценку риска, остаточный риск и регулирование (управление) риска.

Намечаемые мероприятия по смягчению риска направлены как на уменьшение его вероятности, так и на смягчение его последствий. Приемлемость риска определяется с точек зрения экономики, экологии и, в первую очередь, воздействия события (или его последствий) на население. Оценка экономического ущерба от прорыва плотины включает две составляющие: последствия от затопления (основные параметры — глубина слоя воды и скорость тече-

ния) и ущерб от разрушений, вызванных прорывной волной, также зависящий от глубины и скорости потока.

Помимо использования статистических данных об ущербах, оценивавшихся в отдельных регионах, и потерях от разрушений в зависимости от глубины затопления территории, для особо крупных хозяйственных объектов рекомендуется индивидуальная оценка ущерба.

В генеральном (обзорном) докладе *по теме 2*, подготовленном владельцем и генеральным директором консалтинговой фирмы Jesus Granelly, выделяются три составляющие действий по повышению гидрологической безопасности гидроузлов:

восстановление и улучшение регулирующей способности водохранилищ;

повышение работоспособности водосбросных и водопропускных сооружений гидроузлов;

улучшение экологической обстановки в бьефах гидроузлов.

В числе мероприятий по обеспечению регулирующей способности водохранилищ указываются и описываются (со ссылками на соответствующие доклады по теме 2 Конгресса): промывка заиляющихся водохранилищ через глубинные отверстия, разработка и гидравлическое изъятие (землесосами) отложений, механическое изъятие отложившихся наносов; уменьшение притока наносов в водохранилище (создание наносонакопительных бьефов на малых потоках путем строительства фильтрующих плотин, усиление растительного покрова водосбора, укрепление берегов водоема); повышение высоты (наращивание) насыпных и бетонных плотин с анкерровкой новой бетонной части к существовавшему бетонному телу либо с использованием существующей гравитационной плотины в качестве опоры для новой, более высокой. Нарращивание плотины и повышение ее гребня позволяют увеличить объем и регулируемую способность существующих водохранилищ.

Улучшение работы водосбросов и водовыпусков достигается путем создания дополнительных водоотводящих устройств (пример — отвод части половодного притока из Асуанского водохранилища в бессточное понижение рельефа), перестройка водосброса (четырёхкратная на гидроузле Сантолеа на р.Гуадалопе в Испании), а также переустройство водобойного колодца для обеспечения безаварийного пропуска расхода воды, превышающего проектный; и, наконец, чрезвычайно модное использование лабиринтных водосбросов как взамен существующих, так и на новых гидроузлах, и приспособление плотин из местных материалов для переливного пропуска паводковых расходов воды (покрытие гребня и низового откоса плотин каменной наброской,

габионами, железобетонными плитами либо ступенчатым устройством из укатанного бетона).

В обзорном докладе *по теме 3* известного бразильского специалиста по укатанному бетону и владельца консалтингового бюро F.R.Andriolo, названном «Патология плотин: симптоматика, диагностика и терапия», излагается содержание большей части 50 представленных докладов по использованию новых технических решений и современных материалов для ремонта и повышения устойчивости и водонепроницаемости плотин различного типа.

Наиболее примечательные доклады

1. **Karunarante S.** Оценка риска для 32 крупнейших плотин Шри-Ланки для определения очередности капиталовложений.
2. **Huber N.P., Rettemeier K., Klienfeld R., Kongeter J.** Определение риска для немецких гидроузлов: Введение в методику оценки риска и экономического ущерба.
3. **Utrillas J.L., Ayllon V., Molina A., Escuder I.** Оценка гидравлического режима речных русел при сбросе воды из водохранилищ во время паводков.
4. **Escuder I., Molina A., Utrillas J.L., Ayllon V.** Оценка гидрологической безопасности плотин.
5. **Veesaert C.J.** О недостаточной гидрологической безопасности.
6. **Granell Vicent J.** Повышение регулирующей способности водохранилищ и надежности водопропускных устройств.
7. **Capote del Villar A., Saenz de Ormijana F., Martinez Marin E.** Модификация водосброса и наращивание плотины Лос Молинос.
8. **Hughes R.A.H., Scott C.W.** Перспективы увеличения высоты плотин в Великобритании.
9. **Zedan T.H., Osman H.V., Osman M.K.** Увеличение противопаводковой способности Высотной Асуанской плотины.
10. **Patrone J., Plat A., Failacke G.** Актуализация критериев управления водохранилищами каскада гидроузлов на Рио Негро (Уругвай) в периоды нормальных и экстремальных паводков.
11. **Moreno Diaz O., Noguera Larrain G.** Увеличение объема водохранилища Коготи в Северном Чили.
12. **Belmonte Sanchez A.F., Hontoria Asento J.M.** Расширение водосбросов и увеличение пропускной способности гидроузлов Румблар в Хаэне и Гуадилоба (в Касересе).
13. **Somalo Martin J.M., Carvajal Fernandez de Cordova J.** Увеличение пропускной способности и срезочного эффекта гидроузла Пуэнтес на р. Гуадалентин в Мурсии.

По вопросам приобретения материалов конгресса можно обратиться в издательство А.А. Balkema: www.balkema.nl, www.szp.nl.

А.Е. Асарин, доктор техн. наук (ОАО «Институт Гидропроект»)

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Прудовский А.М.</i> Наводнения и защита от них (Вместо предисловия)....	3
<i>Тарасов Н.М., Антонов В.Н., Давыдов С.А.</i> Наводнения в бассейнах рек Северного Кавказа в 2002 году	7
<i>Орешкин О.Ф., Прудовский А.М.</i> Наводнения в странах Европы в 2002 году. ..	11
<i>Кроммер Р.</i> Комплексное использование реки Рейна с учетом паводков. 18	18
<i>Гусев А.В., Малинецкий Г.Г., Семенченко Б.А.</i> Паводки, их причины и необходимость прогнозирования.....	24
<i>Лятхер В.М.</i> Выбор максимального расхода паводка при ограниченном сроке службы гидротехнического сооружения.....	29
<i>Горин С.Л.</i> Использование модели талого и дождевого стока для расчётов и прогнозов гидрографа стока рек бассейна Северной Двины.....	33
<i>Акименко Т.А., Алексеевский Н.И., Круглова Г.В., Самохин М.А.</i> Генетические составляющие и прогноз уровня воды в р. Оке в период половодья. 40	40
<i>Малик Л.К.</i> Причины и последствия наводнений	50
<i>Низметов Г.М., Филатов Ю.А.</i> Основные тенденции и характеристики чрезвычайных ситуаций, вызванных наводнениями в XIX, XX веках и начале XXI века.....	75
<i>Калустян Э.С., Горбушина В.К.</i> Особенности чрезвычайных природных и техногенных паводков	90
<i>Магрицкий Д.В.</i> Типизация наводнений в низовье р. Кубани	99
<i>Чалов Р.С., Рулева С.Н., Завадский А.С., Беляков А.А.</i> Оценка влияния глобальных изменений климата на навигационную обстановку на реках России.....	111
<i>Бритвин С.О., Беликов В.В., Милитеев А.Н., Прудовский А.М., Родионов В.Б.</i> Компьютерное моделирование - современный инструмент решения задач речной гидравлики. Прогнозирование паводков в проекте «Волга-Рейн» ..	126
<i>Беликов В.В., Милитеев А.Н., Прудовский А.М., Родионов В.Б.</i> Компьютерная гидравлическая модель речного бассейна — основа определения ущербов народному хозяйству от наводнений.....	132
<i>Прокофьев В.А.</i> Моделирование последствий воздействия паводка на ГТС с помощью метода Hapsock на регулярной сетке.....	148
<i>Беликов В.В.</i> Компьютерное моделирование дождевого паводка, приведшего к разрушению плотины (на примере р. Дюрсо под Новоросийском).....	169
<i>Крыленко И.Н.</i> Математическое моделирование взаимодействия в паводки водных потоков в узле слияния рек Сухоны и Юга.....	175
<i>Асарин А.Е.</i> Наводнения на р. Лене: причины и пути смягчения.....	186
<i>Шаталина И.Н., Трегуб Г.А.</i> О системе мероприятий по предотвращению образования ледовых заторов (зажоров) на реках РФ и борьбе с ними.....	201
<i>Зайцев А.А.</i> Роль ледовых явлений в формировании ложа и берегов русел крупных рек бассейна р. Лены.....	211
<i>Зайцев А.А., Милитеев А.Н.</i> Ледовые заторы и русловые процессы на р. Лене	224

<i>Козлов Д.В.</i> Одномерные математические модели движения воды и льда в руслах водотоков	237
<i>Каинова С.А., Флорова Н.Л.</i> Формирование максимальных заторных уровней воды р. Сухоны у г. Великий Устюг и возможности их долгосрочного и краткосрочного прогнозирования	265
<i>Иванов А.А., Михайлов В.Н., Магрицкий Д.В.</i> Причины, хроника событий и последствия наводнения в низовье р. Кубани зимой 2001-2002 гг.	275
<i>Авакян А.Б.</i> Актуальные положения, подлежащие учету при разработке Федерального закона защиты от наводнений	284
<i>Низметов Г.М., Бабусенко М.С.</i> Влияние длительного наводнения на элементы застройки населенных пунктов	299
<i>Стефанишин Д.В., Кузло Н.Т.</i> Метод вероятностной оценки устойчивости грунтовых откосов с учетом режимов фильтрации, возникающей при спаде паводков	306
<i>Красильников Н.А.</i> Об основных положениях Рекомендаций по расчету устойчивости откосов грунтовых плотин, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях	310
<i>Красильников Н.А., Олимпиев Д.Н.</i> Расчеты устойчивости низового откоса грунтовой плотины Гугонг при переливе воды через гребень сооружения	316
<i>Осипенко Б.В., Гавриленко В.И.</i> Типичные аварии на малых водохранилищах и прудах юга Дальнего Востока	325
<i>Куприянов В.П., Юрченко А.Н.</i> Натурные обследования проточных трактов водосбросных сооружений гидроузла Капанда в преддверии пропуска паводка	336
<i>Низметов Г.М., Юзбеков Н.С.</i> Оценка риска для населения при разрушении грунтовой плотины водохранилища.	347
<i>Баранов А.Е., Куприянов В.П., Олимпченко Г.Ф.</i> Противопаводковая эффективность Юмагозинского гидроузла	352
<i>Мажбиц Г.Л., Буланов Е.П.</i> Обоснование изменения схемы пропуска паводков через Волжскую (Волгоградскую) гидроэлектростанцию	359
<i>Колосов М.А.</i> Защита от наводнений саморегулирующимися плотинами....	369
<i>Жук В.А., Печникова О.В.</i> Использование накопления половодных и паводковых вод в бассейне реки Москвы для улучшения режима водопользования	376
<i>Семенков В.М., Новикова И.С.</i> Пропуск экстремальных паводков через сооружения первой очереди Богучанского гидроузла	387
<i>Беликов В.В., Милитеев А.Н., Третьюхина Е.С., Цыпин В.Ш.</i> Выбор проектных решений по ликвидации последствий катастрофического наводнения в Приморском крае на основе результатов компьютерного моделирования	396
<i>Беднарук С.Е.</i> О планировании мероприятий по снижению риска ущербов от наводнений	407
<i>Авакян А.Б., Истомина М.Н.</i> Масштабы ущербов от наводнений различного генезиса	415

<i>Беликов В.В., Милитеев А.Н., Прудовский А.М., Родионов В.Б., Кочетков В.В.</i> Использование электронных топографических карт для оценки ущерба от катастрофических паводков	434
<i>Мажбиц Г.Л., Школьников С.Я., Буланов Е.П.</i> Влияние расчетных характеристик естественных паводков на оценки ущерба от гидродинамических аварий	443
<i>Стефанишин Д.В.</i> К вопросу страхования риска убытков от наводнений, вызываемых паводками и половодьями	447
<i>Авдоткин В.П., Самсонов В.П., Егорова И.В., Сухоручкина Ю.С., Широков Г.В., Дзыбов М.М.</i> Учет влияния чрезвычайных ситуаций при анализе и прогнозировании социально-экономического развития Российской Федерации	453
Из интервью Министра МЧС РФ <i>Шойгу С.К.</i>	459

По материалам международных форумов

Гидравлические и гидрологические аспекты надёжности и безопасности гидротехнических сооружений (<i>Санкт-Петербург, 2002 г.</i>).....	463
2-ой Международный Симпозиум по защите от наводнений (<i>Пекин, 2002 г.</i>)..	468
Поддержание работоспособности и реконструкция плотин (<i>Мадрид, 2002 г.</i>)	470

Российское открытое акционерное общество энергетики и электрификации
«Единая энергетическая система России»
(ОАО РАО «ЕЭС России»)

Открытое акционерное общество
«Научно-исследовательский институт энергетических сооружений»
(ОАО «НИИЭС»)

**ОБЪЯВЛЯЕТ В 2003 ГОДУ ПРИЕМ В АСПИРАНТУРУ ОАО «НИИЭС»
с отрывом и без отрыва от производства ПО СПЕЦИАЛЬНОСТЯМ**

1. Гидротехническое строительство
2. Строительные материалы и изделия
3. Строительные конструкции, здания и сооружения
4. Гидравлика и инженерная гидрология
5. Технология и организация строительства
6. Электростанции и энергетические системы

Заявление о приеме в аспирантуру с указанием специальности и формы обучения направлять на имя исполнительного директора ОАО «НИИЭС» кандидата техн. наук *Бритвина Сергея Олеговича* с приложением следующих документов:

- личного листка по учету кадров с фотографией, заверенного в отделе кадров по месту работы;
- автобиографии;
- характеристики-рекомендации с последнего места работы или из ВУЗа, если не прошло двух лет со времени его окончания;
- нотариально заверенной копии диплома об окончании ВУЗа;
- реферата по избранной специальности или опубликованной статьи.

Паспорт и диплом об окончании ВУЗа представляются лично поступающими в аспирантуру.

Прием заявлений до 25 сентября 2003 года.

Вступительные экзамены по специальности, философии и иностранному языку проводятся с 20 октября 2003 года.

Обучение в аспирантуре платное. Форма и размер оплаты - по соглашению сторон.

Аспиранты имеют возможность работать по совместительству.

Документы направлять по адресу: 123362, Москва, а/я 393, Строительный проезд, дом 7-а, ОАО «НИИЭС» (аспирантура). Телефон: (095) 493-51-32, 492-66-71. Факс: (095) 363-56-21

Заведующая аспирантурой — Косырева Ирина Михайловна

ОАО «НИИЭС»

Лицензия ИД № 06483 от 19 декабря 2001 г.

Предлагает полный цикл изготовления печатной продукции (листовки, брошюры, буклеты, приглашения, напки, визитки) — разработка оригинал-макета, дизайн, сканирование графики, верстка, вывод пленок, офсетная печать.

Предлагает приобрести Научно-технический и производственный сборник «Безопасность энергетических сооружений» (БЭС) — вып. 2 — 11 по следующим расценкам:

№ 2 — 3	— 150 руб;
№ 4	— 120 руб;
№ 5	— 60 руб;
№ 6	— 120 руб;
№ 7	— 160 руб;
№ 8	— 60 руб.
№ 9	— 160 руб
№ 10	— 90 руб
№ 11	— 320 руб

Почтовые расходы (10% от стоимости заказа) и НДС (на научно-техническую литературу — 10% от стоимости заказа) просим включить в общую сумму.

Для получения указанных изданий следует:

перечислить необходимую сумму на наш расчетный счет

№ 40702810438210101135 в Краснопресненском ОСБ

№ 1569/01694 Сбербанк России, г. Москва.

Корреспондентский счет 30101810400000000225

БИК 044525225; ИНН 7733021533; ОКПО — 00113543;

ОКОНХ — 95120; КФС — 41,

направить письмо с перечнем заказываемой литературы и указанием почтового адреса, кодов ОКПО и ОКОНХ для оформления счета-фактуры, а также копию платежного поручения с отметкой банка.

Наш адрес: 125362, Москва, а/я 393, Строительный проезд, д. 7а

Телефон: (095) 493-51-32, 492-67-35; 492-21-51,

Факс (095)363-56-51

**Безопасность энергетических сооружений
Сборник**

Научный редактор А.М. Прудовский
Технический редактор Т.А. Григорьева
Оригинал-макет и компьютерная верстка А.Г. Мелихова

Подписано в печать 02. 03. 2003
Формат 60x90/16. Гарнитура Таймс
Бумага офс. №1. Печать офсетная.
Объем 30 п.л. Тираж 1000 экз.

Лицензия ИД № 06483 от 19 декабря 2001 г.
ОАО «НИИЭС».
125362 г. Москва, Строительный проезд, д. 7а.

Отпечатано в типографии ООО «ГЕО_ТЭК»
г. Красноармейск, Московской области.
Тел.: 254 97 27; 254 99 58, 584 16 23.