



ГИДРО- ТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Ежемесячный
научно-технический журнал

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РФ,

ОАО «РУСГИДРО»,

АССОЦИАЦИЯ «КОРПОРАЦИЯ ЕЭЭК»,

ЗАО НТФ «ЭНЕРГОПРОГРЕСС»,

НП «НТС ЕЭС»

Основан в 1930 г.

№ 1

январь

2010

Содержание

Лапин Г. Г. Планы и реальность	2	Безопасность гидротехнических сооружений	
Строительство и эксплуатация			
Стефаненко Н. И., Затеков В. Б., Пермякова Л. С., Решетникова Е. Н., Газиев Э. Г. Поведение Саяно-Шушенской плотины после катастрофического разрушения здания ГЭС . . .	5	Тарасов А. В., Топаж Г. И. Обоснование оптимальных параметров гидроагрегатов малых ГЭС	27
Мухаммадиев М. М., Носиров Ф. Ж., Уришев Б. У. Повышение эффективности работы водоприемных устройств насосных станций .	11	Каганов Г. М., Волков В. И., Секисова И. А. Сравнение параметров волны прорыва, определенных различными методами . . .	31
Абрамов Н. Н., Епимахов Ю. А. Влияние эксплуатационных факторов ГЭС на состояние вмещающего массива гидротехнических туннелей	14	Расчеты, исследования, эксперименты	
Михайлов М. Г. Непредусмотренные ситуации, возникшие при монтаже, пусконаладке и эксплуатации оборудования гидроэлектростанций	18	Грицук И. И., Дебольский В. К., Исаенков А. Ю., Пономарев Н. К. Модели прогнозирования транспорта наносов водными потоками на урбанизированных территориях в зимний период	38
		Брянская Ю. В. Динамический подход к анализу неравномерного установившегося движения в широких призматических руслах . . .	44
		Ветров Е. П., Сергеев А. И. Способ выбора оптимальных диаметров самотечных водотоков	50

Планы и реальность

Традиционно в первом номере журнала подводились некоторые итоги ушедшего года и говорилось о новых задачах. Благо, что до 2008 г. имел место подъем в экономике России и было приятно писать об амбициозных планах, радужных надеждах и перспективах развития.

К сожалению, подводя итоги 2009 г., приходится писать о негативном, чтобы напомнить о недостатках, ошибках, просчетах и уменьшить их количество в будущем.

17 августа 2009 г. произошла катастрофа на Саяно-Шушенской ГЭС, самой мощной ГЭС России, считавшейся жемчужиной российской гидроэнергетики, которая привела к трагической гибели 75 человек и разрушению всех гидроагрегатов станции. Российская гидроэнергетика в течение нескольких минут лишилась 6400 МВт установленной мощности, что составляет 14 % мощности всех ГЭС России или 25 % установленной мощности ГЭС ОАО «РусГидро». Многие специалисты, ученые и граждане России высказывают свое мнение о причинах этой катастрофической аварии. Журнал предоставляет свои страницы для публикаций всем специалистам, желающим проанализировать случившееся и дать предложения с целью недопущения подобных аварий. Для гидроэнергетиков и всех граждан России авария на Саяно-Шушенской ГЭС — самая крупная техногенная катастрофа последних лет. По своему масштабу, последствиям, воздействию на сознание людей она аналогична аварии на Чернобыльской АЭС. Эта авария поставила под сомнение все заслуги и достижения советской школы проектирования и строительства ГЭС, которой мы так гордились. Она, безусловно, значительно замедлит развитие гидроэнергетики в России. Все гидроэнергетики: ученые, проектировщики, конструкторы, поставщики оборудования, строители, эксплуатационники должны критически проанализировать причины аварии и сделать правильные выводы. Вполне объяснимо желание читателей журнала получить глубокий, взвешенный анализ произошедшего, однако для такого осмысления необходимо время.

Сегодня хочу рассказать о другом, к сожалению тоже неприятном, вспомнить, что планировали, какие цели и задачи ставили, что обещали в области гидроэнергетики и каковы ожидаемые итоги выполнения этих планов.



В статье “О перспективах развития электроэнергетики России до 2010 г.”¹ сообщалось, что Правительство РФ рассмотрело и одобрило доклад Минпромэнерго РФ, согласно которому планировался ввод новых генерирующих мощностей за период 2006 – 2010 гг. включительно в объеме 21,8 ГВт, в том числе: 16,4 ГВт — на ТЭС; 1,0 ГВт — на АЭС и 4,375 ГВт — на ГЭС, ГАЭС и ПЭС. Согласно “Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2020 года”, одобренной распоряжением Правительства Российской Федерации

от 22 февраля 2008 г. № 215-р, ввод мощностей на ГЭС, ГАЭС и ПЭС за пятилетку также планировался в объеме 4,3 ГВт. В другой статье “О некоторых итогах и планах”² приводились данные из “Основных положений стратегии ОАО “Гидро-ОГК” (ныне ОАО “РусГидро”), утвержденных Советом директоров этой компании 19 октября 2007 г.

Руководство и пиарщики ОАО РАО “ЕЭС России” предрекали новую эру в развитии электроэнергетики, новый мощный рывок вперед. Свои планы руководителя ОАО РАО “ЕЭС России” подчас называли планом ГОЭЛРО-2, чтобы подчеркнуть их грандиозность и значимость для России. Двигателем реализации плана должны были стать инвестиции от результатов реструктуризации ОАО РАО “ЕЭС России”, которые “золотым дождем” должны были пролиться на электроэнергетику.

Сейчас, на исходе планового периода, можно с большой точностью спрогнозировать ожидаемые результаты выполнения этих программ (таблица).

Богучанская ГЭС. Как известно, имеется решение бывшего Президента РФ Путина В. В. о вводе первых агрегатов в 2010 г. Несколько позже бывший председатель правления ОАО РАО “ЕЭС России” А. Б. Чубайс поставил задачу по вводу первых агрегатов в 2009 г., что нашло отражение во всех программах. Однако ввод первых агрегатов в 2009 г. не был осуществлен.

Нельзя однозначно охарактеризовать партнерские отношения между ОАО “РусГидро” и ОАО “РУСАЛ” и принятую ими “многоступенчатую” схему управления строительством. Это тоже не

¹ Гидротехническое строительство. 2006. № 11.

² Гидротехническое строительство. 2008. № 1.

способствовало ускорению строительства ГЭС. В связи с катастрофической аварией на Саяно-Шушенской ГЭС, ввод первых агрегатов на Богучанской ГЭС стал еще более злободневен, однако имеются серьезные опасения, связанные со сроками поставки и монтажа электротехнического оборудования, точнее с задержкой прохождения процедур проведения торгов. Это обстоятельство не позволяет в полном объеме выдать рабочие чертежи и заключить договоры на поставку оборудования.

По плану предполагался ввод 1667 МВт на пяти гидроагрегатах: трех в 2009 г. и двух в 2010 г. Фактически, при максимальной концентрации усилий всех участников строительства, возможен ввод только трех агрегатов. Вводимая мощность при УВБ 185 м составит максимум 555 МВт.

Бурейская ГЭС. Все агрегаты ГЭС введены. Нештатное оборудование, предназначенное для работы на пониженных отметках, заменено на штатное. Станция вступила в фазу завершения строительства, что при достаточном финансировании должно состояться в 2011 г.

Верхнекрасногорская ГЭС. Включение ГЭС в программу является отрицательным примером формирования планов при отсутствии проектного задела. С большой вероятностью можно предположить, что такой ГЭС не будет вообще. Более предпочтительно на этом участке реки выглядит вариант с одной ГЭС вместо двух — Верхнекрасногорской и Нижнекрасногорской, однако для принятия окончательного решения требуются дальнейшие проектные проработки.

Гельбахская ГЭС. Объект введен в эксплуатацию в 2007 г.

Гоцатлинская ГЭС. Строительство “балансирует” на грани консервации из-за недостатка средств у ОАО “РусГидро”. Ввода в 2010 г. не будет.

Загорская ГАЭС-2. Ввод двух обратимых машин в 2010 г. изначально представлялся излишне оптимистичным. При достаточном финансировании ввод первых агрегатов возможен не ранее 2012 г. Особо надо отметить, что, несмотря на очевидность необходимости ГАЭС для оказания системных услуг, в рыночной российской экономике этот тип гидроэлектростанций убыточен из-за отсутствия платы за эти услуги. Названный фактор сдерживает строительство новых ГАЭС.

Зарамагские ГЭС. В 2009 г. введена Головная ГЭС установленной мощностью 15 МВт. Ввода ГЭС-1 в 2010 г. не будет.

Зеленчукская ГЭС-ГАЭС. Объект не строится ввиду неэффективности и убыточности ГАЭС для ОАО “РусГидро”.

Капхатау ГЭС. Главным препятствием для ввода станции является проходка оставшегося уча-

стка деривационного туннеля, сложенного обводненными песками. Все остальные работы практически завершены. Пуск этой станции, надеемся, состоится в 2010 г.

Нижнебурейская и Нижнезейская ГЭС. Строительство ГЭС не начиналось по причине отсутствия потребителей. Ввод Бурейской ГЭС на полную мощность еще больше осложнил проблему сбыта электроэнергии Зейской и Бурейской ГЭС. Зейская ГЭС “вошла” в зиму с превышением уровня ВБ над НПУ на 1,5 м. Для обеспечения к маю 2010 г. предпаводковой сработки водохранилища до отметки 310,0 м необходимо обеспечить максимальную загрузку агрегатов этой ГЭС в зимний период 2009/10 гг.

Усть-Среднеканская ГЭС. Ввода в 2010 г. не будет. Станция неэффективна по экономическим сценарным условиям ОАО “РусГидро”, утвержденным Советом директоров компании. Будут иметь место проблемы со сбытом электроэнергии, вырабатываемой станцией, после ввода ее на полную мощность.

Северная и Мезенская ПЭС. Включение в программы ввода этих станций было ошибкой. Мезен-

Планируемые и ожидаемые вводы новых мощностей, МВт

Объект	Программа Минпромэнерго РФ на 2006 – 2010 гг.		Стратегия ОАО “РусГидро” на 2008 – 2020 гг.	
	План	Ожидаемый факт	План	Ожидаемый факт
Богучанская ГЭС	1667	555	1667	555
Бурейская ГЭС	1001	1001	335	335
Верхнекрасногорская ГЭС	75	0	–	–
Гельбахская ГЭС	46	46	–	–
Гоцатлинская ГЭС	–	–	100	0
Загорская ГАЭС-2	420	0	420	0
Зарамагские ГЭС	352	15	15	15
Зеленчукская ГЭС-ГАЭС	140	0	140	0
Капхатау ГЭС	65	65	65	65
Нижнебурейская ГЭС	107	0	–	–
Нижнезейская ГЭС	100	0	–	–
Усть-Среднеканская ГЭС	–	–	69	0
Северная и Мезенская ПЭС	402	0	10	0
Итого	4375	1682	2821	970

ская ПЭС с 2 тыс. агрегатов и отсечной плотиной длиной 80 км никогда возведена не будет³.

Таким образом, при благоприятных условиях и вводе трех агрегатов на Богучанской ГЭС в 2010 г., программа Минпромэнерго РФ будет выполнена на 38,4 %, а стратегия ОАО “РусГидро” — на 34,4 %. Без ввода этих агрегатов планы будут выполнены на 25,8 и 14,7 % соответственно.

С большой долей вероятности предполагаю, что не лучше обстоят дела в сетевом строительстве и строительстве ТЭС. Все громкие заявления о плане ГОЭЛРО-2 на поверку оказались пустым звуком. План ГОЭЛРО был научной, просчитанной с учетом темпов развития всего народного хозяйства Программой электрификации СССР. Так называемый план ГОЭЛРО-2 выглядит “фильминой грамотой” в сравнении с настоящим планом ГОЭЛРО.

Почему так плохи результаты реализации всех программ? Причиной назовут мировой экономический кризис. Уверен, что результаты были бы такими же и при его отсутствии — экономический кризис здесь ни при чем.

Причинами невыполнения намеченных планов, по моему мнению, являются:

- ошибки в прогнозировании электропотребления;
- волюнтаризм при выборе объектов и назначении сроков их ввода;
- недостаток квалифицированных кадров;
- отсутствие необходимых материально-технических ресурсов.

Никаких реальных шагов для безусловного выполнения намеченных программ сделано не было. В статье “Гидроэнергетика и кадровая политика”⁴ отмечалось: “... Нисколько не драматизируя ситуацию, хочу подчеркнуть, что для выполнения этих грандиозных планов необходимы финансовые, материально-технические и, в первую очередь, кадровые ресурсы. Нужны квалифицированные кадры, способные провести изыскания, выполнить проектирование и в установленные сроки осуществить строительство, монтаж и пусконаладку.

Известно, что мощное “строительное крыло” бывшего Минэнерго СССР в 60 – 80 годы прошлого века насчитывало 700 тыс. работников, в т.ч. проектировщиков, строителей и монтажников ...

... только в 1980 г. в организации министерства были направлены 8 тыс. выпускников вузов и 12 тыс. выпускников техникумов. И такие пополнения осуществлялись ежегодно. Монтажные организации Минэнерго СССР насчитывали около 70 тыс. специалистов по всем видам монтажа и наладки, причем это были квалифицированные кадры, имеющие богатый производственный опыт.

... После провозглашения плана ГОЭЛРО и курса на индустриализацию в тридцатые годы прошлого столетия были организованы десятки новых высших учебных заведений, крупные проектно-исследовательские и научные институты, мощные строительномонтажные управления, тресты и стали выходить отраслевые научно-технические журналы ...”.

В последние годы высшие и средние учебные заведения сокращали или полностью ликвидировали выпуск специалистов для гидротехнического строительства. В 2008 г. строительные ВУЗы России подготовили всего 160 инженеров по специальности “Гидротехническое строительство”. Переход на двухуровневую систему образования вообще не предполагает подготовку инженеров.

Проектно-исследовательские институты были провозглашены ОАО РАО “ЕЭС России” как “непрофильный бизнес” и стали предметом купли-продажи. Не развитие этих институтов на благо российской гидроэнергетики, а получение прибыли от их продажи и перепродажи стало целью реформ научно-проектного комплекса ОАО РАО “ЕЭС России”.

Некогда мощные строительные и монтажные организации в гидротехническом строительстве практически деградировали. Вместо дееспособных мощных строительных генподрядных организаций появляются так называемые “организаторы строительства”, не имеющие в своем штате ни одного рабочего. По своей сути это посредники между заказчиком и подрядчиками, создаваемые для “управления денежными потоками”.

Можно предположить, что при составлении грандиозных планов преследовалась цель — поставить большие задачи с целью мобилизации людей на их выполнение. Но изначально невыполнимые задачи не мобилизуют, а наоборот, деморализуют людей.

Почему руководители различных рангов и депутаты многочисленных выборных органов много обещают и редко выполняют свои обещания? Потому что они чувствуют безнаказанность за невыполнение этих обещаний. Безответственность стала признаком сегодняшнего времени.

Сегодня гидроэнергетика России переживает трудный период, остаются нерешенными многие проблемы. Будем надеяться, что наступивший 2010 год не будет таким жестоким по отношению к нам, гидроэнергетикам, каким стал 2009 год.

Уважаемые коллеги! Поздравляю вас с Новым годом! Желаю здоровья и успехов вам, вашим родным и близким!

Главный редактор журнала
“Гидротехническое строительство”
Г. Г. Лапин

³ Гидротехническое строительство. 2009. № 9.

⁴ Гидротехническое строительство. 2007. № 1.

Поведение Саяно-Шушенской плотины после катастрофического разрушения здания ГЭС

Стефаненко Н. И., инженер, Затеев В. Б., Пермякова Л. С., кандидаты техн. наук,
Решетникова Е. Н., инженер (Саяно-Шушенская ГЭС),
Газиев Э. Г., доктор техн. наук (ЦСГНЭО)

Характеристика гидроузла. Арочно-гравитационная Саяно-Шушенская плотина, построенная на р. Енисее, является одной из крупнейших в мире: ее высота 242 м, длина по гребню 1074,4 м, ширина по гребню 25 м, ширина в основании 105,7 м (рис. 1, 2 и 3). Максимальный напор равен 220 м.

Полная и полезная емкость водохранилища — 30,71 и 14,71 км³. Водосбросная плотина длиной 189,6 м имеет 11 заглубленных пролетов и при уровне водохранилища 539 м рассчитана на пропуск 12 870 м³/с, а при форсированном — 13 090 м³/с.

Климат на участке расположения основных сооружений гидроузла умеренно континентальный, с жарким летом и холодной зимой. Минимальная температура воздуха достигала минус 44 °С, максимальная — плюс 40 °С.

Установленная мощность ГЭС при расчетном напоре — 6400 МВт (десять агрегатов по 640 МВт).

Основание плотины сложено прочными изверженными породами (орто- и парасланцами), физико-механические свойства которых практически одинаковы. Поэтому, несмотря на выявленные тектонические нарушения скального массива, на котором расположены гидротехнические сооружения, он рассматривался в проекте как квазиоднородный блок, сложенный высокопрочными породами. Модуль деформации сохранных пород в массиве изменяется в зависимости от заглубления от 10 до 18 ГПа. В зонах влияния главных тектонических нарушений и крупных пологих тектонических трещин модуль деформации снижается до 5 – 9 ГПа.

После заполнения водохранилища в 1989 г. стало очевидным, что напряженно-деформированное состояние плотины превосходит предусмотренные в проекте значения. На напорной грани плотины появились горизонтальные трещины растяжения, и в основании напорной грани плотины было отмечено нарушение контакта. Фильтрация через бетон плотины и через основание достигла 520 и 549 л/с соответственно [1].

Персонал гидроузла вместе со специалистами института “Ленгидропроект” и французской фирмы “Солетанш” разработал новую технологию ремонтных работ с использованием эпоксидных рас-

творов, которую применяли для заделки трещин в теле плотины и в ее скальном основании с 1996 по 2003 г. В результате выполненных работ расход фильтрации через тело плотины и скальное основание сократился на 99,5 и 78 % соответственно [1].

Выполнение ремонтных работ неизбежно сказались на поведении плотины и ее скального основания. В результате проведенного анализа можно отметить:

1) необратимые перемещения плотины в сторону нижнего бьефа продолжались до 2005 г. и составили на гребне плотины порядка 40 % от максимальной величины;

2) процесс адаптации системы “плотина — основание” не закончился, и накопление остаточных деформаций на контакте плотины с ее скальными примыканиями продолжается. Несмотря на весьма малые скорости приращения деформаций во времени, их наличие свидетельствует о непрекращающемся процессе приспособления плотины к своему скальному основанию. По-видимому, в теле плотины продолжается процесс все большей передачи усилий на арки, что приводит к перераспределению напряжений в теле плотины с ростом арочных напряжений и развитием зон разуплотнения близ напорной грани, особенно на нижних отметках в примыканиях;

3) анализ результатов деформирования контакта “плотина — основание” (по данным длиннобазных деформометров и по деформациям, замеренным в штольнях на обоих берегах плотины) свидетельствует, что значительная часть сечения каждого из примыканий со стороны напорной грани плотины находится в зоне разуплотнения и передача усилий сжатия от плотины на скальные примыкания осуществляется остальной частью сечения, расположенной в зоне сжатия у низовой грани плотины. Наиболее напряженная область взаимодействия плотины с примыканиями расположена в средней трети высоты плотины;

4) наблюдения последних лет свидетельствуют о наметившейся тенденции стабилизации и затухания остаточных перемещений, что может быть связано с постепенным возрастанием модуля деформации примыканий в результате продолжающегося “уплотнения” скального массива в примыканиях

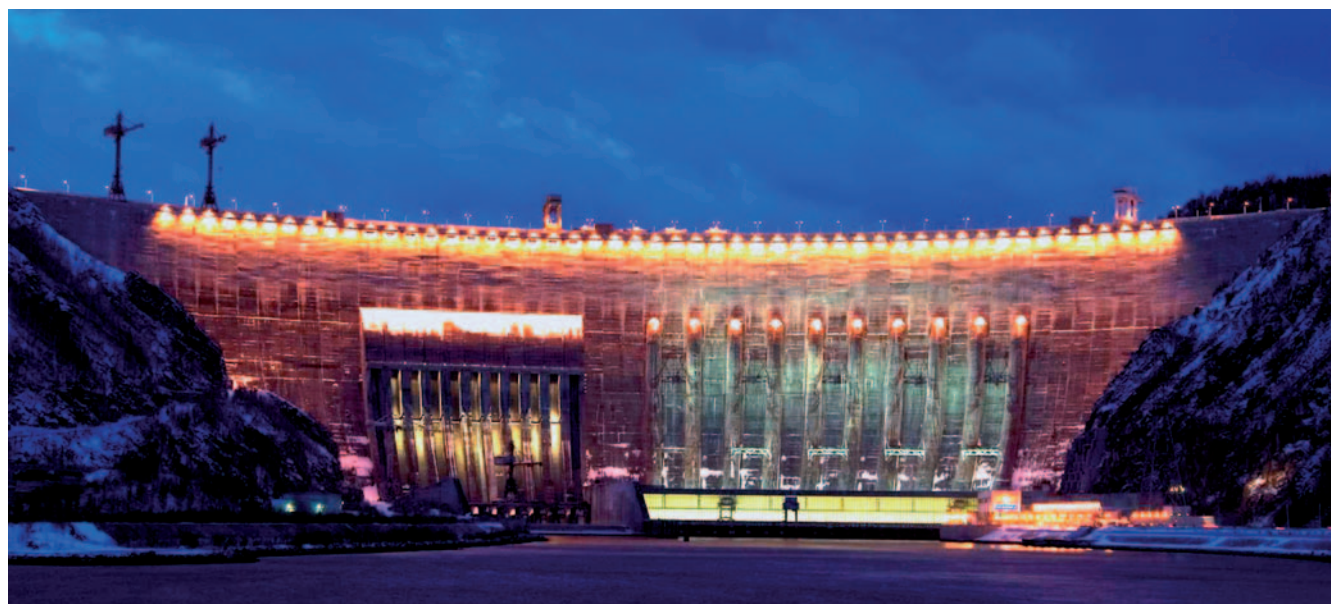


Рис. 1. Саяно-Шушенская плотина

плотины. Этот процесс “приспособления” плотины к своему скальному основанию, несомненно, сопровождается перераспределением напряжений в теле плотины и в её примыканиях, в результате чего создаются новые условия взаимодействия системы “плотина — основание”;

5) скорости нарастания деформаций сжатия на контакте примыканий плотины можно рассматривать как один из критериальных диагностических параметров, свидетельствующих о состоянии плотины и степени ее безопасности. Стабилизация

процесса деформирования примыканий на контакте со снижением до нуля скоростей нарастания деформаций будет свидетельствовать о наступлении условий нормального функционирования плотины.

Катастрофические события 17 августа 2009 г.

17 августа в 8 ч 13 мин сейсмометрами, установленными в плотине Саяно-Шушенской гидроэлектростанции, было зарегистрировано динамическое воздействие на плотину, возникшее в результате аварии в здании ГЭС. Реакция секции 33 плотины на отм. 344 м (ближайшая к месту аварии точка) в направлении по потоку имела следующие характерные особенности:

до возникновения динамического воздействия в течение 17,7 с с начала записи имели место фоновые колебания плотины от работающих в нормальном режиме агрегатов;

в течение последующих 32,5 с зарегистрированы затухающие низкочастотные колебания с периодом около 4,5 с и максимальной амплитудой 125 мкм, которые явились следствием выброса и падения ротора гидроагрегата ГА-2;

далее в течение 74 с происходили полихромные колебания с периодом от 0,05 до 0,18 с и максимальной амплитудой до 120 мкм, вызванные разрушительным воздействием на конструкции здания ГЭС потока воды из турбинной камеры ГА-2;

с этого момента и до конца записи зарегистрированы нарастающие по амплитуде колебания с периодом от 0,07 до 0,15 с и максимальной амплитудой до 450 мкм, вызванные воздействием ГА-7 и ГА-9, вращающихся в угонном режиме.

Произошли вертикальные выбросы турбины № 2 с находящимся на ее валу ротором генератора, разрушение здания ГЭС и его затопление. Все десять турбин были остановлены, водосливные от-

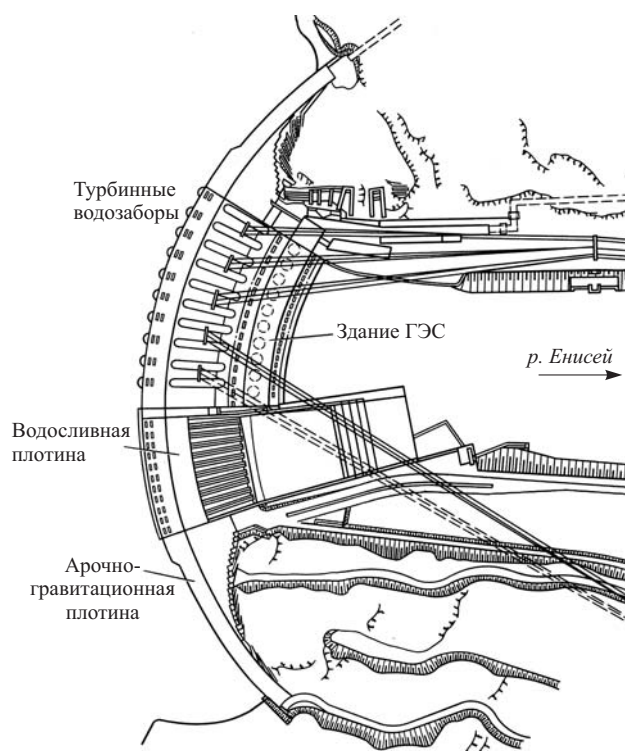


Рис. 2. План Саяно-Шушенской плотины

верстия открыты, и весь расход реки был направлен через водосбросную плотину.

Были полностью разрушены монолитные железобетонные перекрытия ГА-2, ГА-7 и ГА-9 (на отм. 327 м), колонны под монолитными перекрытиями этих гидроагрегатов и стены кольцевых шахт генераторов. Разрушены или повреждены колонны, поддерживающие монолитные перекрытия под отм. 327 м. Полностью разрушены ограждающие конструкции машинного зала в районе гидроагрегатов ГА-2, ГА-3 и ГА-4.

Наибольшие повреждения здания ГЭС отмечаются на отм. 327 и 320 м. На отм. 315 м разрушений зафиксировано меньше, состояние несущих конструкций можно оценить как удовлетворительное. Наибольшие разрушения получили конструкции гидроагрегатов ГА-2, ГА-7 и ГА-9 (рис. 4 и 5).

После откачки воды было проверено состояние швов между агрегатными блоками. По показаниям геодезической аппаратуры (по трехосным щелемерам и по гидронивелирам) состояние швов на отм. 306,2 м соответствует состоянию перед аварией.

Поведение плотины после 17 августа 2009 г.
Служба мониторинга гидротехнических сооружений Саяно-Шушенской ГЭС сразу же после аварии

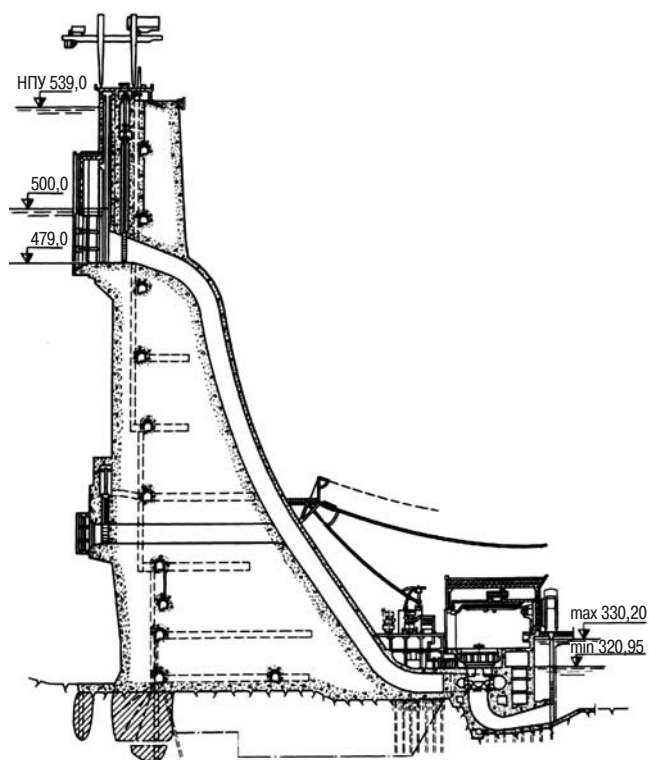


Рис. 3. Разрез Саяно-Шушенской плотины и здания ГЭС



Рис. 4. Повреждение турбины и генератора блока № 2 в результате катастрофы



Рис. 5. Повреждение статора генератора агрегата № 7 в результате короткого замыкания при затоплении здания ГЭС

начала детальное обследование плотины, ежедневно составляя подробную информацию о ее состоянии.

С 11 по 18 августа 2009 г. уровень водохранилища повысился на 22 см. Среднесуточная температура наружного воздуха при этом понизилась с 21,6 до 11,1 °С. В результате произошедшей в здании ГЭС 17 августа аварии плотина подверглась значительному динамическому воздействию. В связи с выводом всех гидроагрегатов из работы, 17 августа, начиная с 13 ч, для пропуска воды из верхнего бьефа были открыты все 11 водосбросных пролетов плотины.

Напряженно-деформированное состояние плотины за период с 2007 по сентябрь 2009 г. определялось изменениями гидростатической нагрузки (УВБ) и температурными воздействиями. Никаких аномалий в смещениях ключевой консоли плотины (секция 33) после аварии зарегистрировано не было (рис. 6).

Авария произошла при УВБ = 537 м. Послеаварийный период с 17 августа по 10 сентября характеризуется незначительным ростом УВБ до максимальной отм. 537,68 м (22 августа) и последующим его снижением до 536,9 м (10 сентября). Натурные измерения в послеаварийный период проводились в учащенном режиме. В частности, выполнено восемь циклов измерения перемещений отвесами.

С 18 по 24 августа 2009 г. радиальные перемещения плотины увеличились от 0,3 мм на отм. 344 м до 1,2 – 2,0 мм на гребне. Максимальное приращение перемещений (2 мм на отм. 542 м) отмечено в центральной секции 33.

В период 2007 – 2009 гг. необратимых составляющих перемещений плотины в нижний бьеф не было выявлено. Максимальное перемещение, наблюдаемое на гребне ключевой секции 33, составило 132,6 мм (в 2008 г.).

В зонах плотины, для которых приведены количественные критерии безопасности, максимальные сжимающие напряжения оставались меньше их критических значений и составляли: в арочном направлении у напорной и низовой грани соответственно 11,9 (секция 33, отм. 504 м) и 9,7 МПа (секция 33, отм. 504 м), а в консольном направлении — 12,8 МПа (секция 45, отм. 322 м). Указанные напряжения рассчитаны с учетом начальной ползучести в течение первого года. Учет многолетней ползучести дает снижение измеряемых напряжений по розеткам телетензометров на 20 – 25 %.

В зоне сжимающих напряжений в каждом из примыканий образовались зоны, в которых длиннобазные деформометры продолжают фиксировать остаточные деформации. В левобережном примыкании из 45 имеющихся деформометров 21 прибор

(46 %) продолжает фиксировать рост деформаций сжатия, а в правобережном примыкании из 50 имеющихся деформометров 13 приборов (26 %) продолжают регистрировать остаточные деформации сжатия.

В основании плотины, в секциях 18 и 25 на удалении 94 – 106 м от напорной грани, из установленных в период строительства и работоспособных в настоящее время шести струнных датчиков ежегодное увеличение сжатия зарегистрировано по пяти датчикам. Максимальная величина замеренных за последние 9 лет приращений деформаций сжатия составила порядка $1 \cdot 10^{-5}$ отн. ед. в год.

Продолжается процесс уплотнения скального основания под низовым клином отдельных секций плотины. Деформации сжатия в основании центральной секции 33 в последние годы продолжают нарастать с небольшой, но постоянной скоростью примерно $1,6 \cdot 10^{-5}$ отн. ед. в год. Суммарная деформация под низовой гранью секции 18 с 1990 по 2009 г. составила $9,2 \cdot 10^{-5}$ отн. ед. с наметившейся в последние годы тенденцией к затуханию. Затухание деформаций и снижение их скоростей во времени происходят постепенно у ряда наблюдаемых деформометров.

Несмотря на полученные малые величины деформаций, их наличие свидетельствует о продолжающемся процессе приспособления плотины к своему скальному основанию.

Одновременно под воздействием сезонных изменений уровня водохранилища происходят уплотнение береговых примыканий и смещение секций плотины к берегам, что, в свою очередь, вызывает дополнительный наклон плотины в сторону нижнего бьефа.

Характер диаграмм деформаций скальных примыканий плотины на правом берегу значительно более спокойный, чем на левом, что, видимо, связано с большей трещиноватостью левого берега.

Суммарный расход в основании и берегах при УВБ 537,44 м (по состоянию на 20 августа 2009 г.) составил 80,1 л/с, что на 5 л/с выше расхода до аварии на ГЭС. Новых трещин, новых очагов фильтрации, локального роста расходов через напорный фронт плотины не было зафиксировано.

С 13 по 20 августа 2009 г. фильтрационный расход через напорный фронт плотины увеличился незначительно (с 14,3 до 14,9 л/с). Практически по всем контролируемым зонам напорного фронта плотины фильтрационный расход незначительно превысил значения 2007 г., но оставался существенно меньше, чем в 2006 г.

Противодавление в основании плотины не превысило нормативных значений, т.е. эффективность цементационной завесы была обеспечена. При проведении измерений фильтрационного давления в

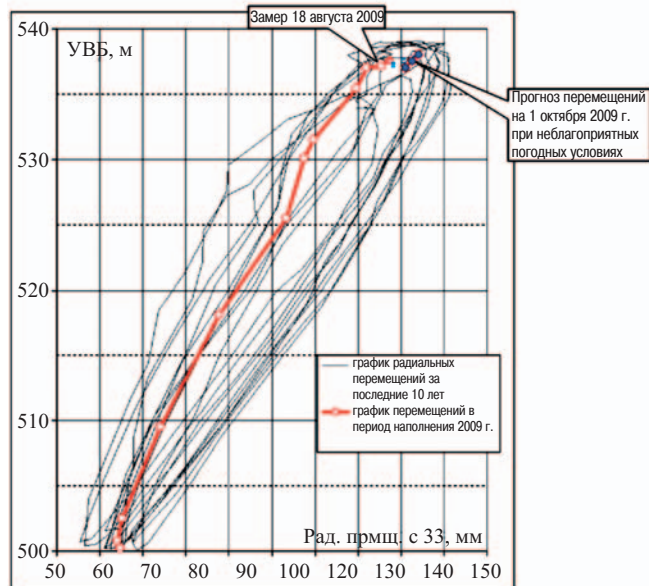


Рис. 6. Диаграмма перемещений гребня плотины в центральной секции 33 за последние 10 лет

основании русловой части плотины (секции 16 – 47) 20 августа 2009 г. было зафиксировано небольшое повышение пьезометрических уровней под III и IV столбами плотины, что не оказало влияния на состояние цемзавесы.

Можно заключить, что система “плотина — основание” Саяно-Шушенской ГЭС находится в нормальном эксплуатационном состоянии. Изменения показателей ее состояния за рассмотренный период адекватны внешним условиям.

Зимний пропуск р. Енисея через плотину. Одним из серьезных испытаний будет предстоящий зимой 2009/10 г. пропуск воды р. Енисея через водосброс в теле плотины при выключенных десяти гидроагрегатах. Дело в том, что водосброс никогда не работал в зимнее время, так как в этот период вода всегда пропускалась через работающие турбины. Пропуск воды через водосброс высотой 161 м при общем напоре 210 – 220 м связан с обильным образованием водяной пыли и перехлестом воды через боковые стенки лотков (рис. 7).

Зимняя работа водосброса ставит ряд требующих решения проблем:

- обледенение пазов затворов, исключающее возможность их маневрирования;

- обледенение стенок лотков водосброса;

- снижение температуры низовой грани плотины вследствие опорожнения напорных водоводов, что может привести к увеличению наклона плотины в нижний бьеф (текущая по водоводам плотины вода при работе гидроагрегатов имеет температуру не ниже + 2 °С);

- понижение температуры в машинном зале ГЭС из-за поступления холодного воздуха через опорожненные водоводы.



Рис. 7. Работа водосброса при открытии 11 пролетов на первой ступени (0,25 от полного открытия)

Расчетные исследования и опыт эксплуатации подтверждают, что при пропуске расходов более $5000 \text{ м}^3/\text{с}$ водобойный колодец не обладает необходимой надежностью и длительная его эксплуатация может привести к частичным разрушениям плит крепления колодца.

Невозможность маневрирования затворами требует выставить их на такое открытие, которое позволит к 1 мая 2010 г. сработать водохранилище до отм. УМО = 500 м (для приема весеннего паводка), обеспечивая минимальные санитарные расходы воды р. Енисей для водоснабжения нижележащих городов и Майнского гидроузла, а также учитывая ограничения по пропуску максимальных расходов воды в зимний период в районе г. Минусинска. Была разработана схема работы эксплуатационного водосброса Саяно-Шушенской ГЭС в период с ноября 2009 г. по май 2010 г., базирующаяся на графике пропуска расходов среднего года. При такой схеме работы эксплуатационного водосброса обеспечивается сработка водохранилища Саяно-Шушен-

ской ГЭС с отм. 536,0 м до отметки уровня мертвого объема 500,0 м.

В октябре 2009 г. осуществлялся сброс $1700 \text{ м}^3/\text{с}$, после снижения притока воды в водохранилище до $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ открытие затворов решено снизить до 1,2 м (половина первой ступени). Такое открытие на всех 11 отверстиях должно обеспечить сброс $1100 \text{ м}^3/\text{с}$, а при снижении уровня водохранилища сброс снизится до $800 - 900 \text{ м}^3/\text{с}$ — это минимум, который обеспечит работу двух агрегатов Майнской ГЭС.

Список литературы

1. Bryzgalov V. I. Rehabilitation of the Sayano-Shushenskaya HPS dam-foundation system // Proceedings of the International Congress on Conservation and rehabilitation of Dams, Madrid, Spain, 11 – 13 November 2002. PP. 695 – 697.
2. Брызгалов В. И., Газиев Э. Г. Поведение плотины Саяно-Шушенской ГЭС до и после ремонтных работ // Вестник Красноярской государственной архитектурно-строительной академии. 2003. № 6. С. 77 – 86.

Повышение эффективности работы водоприемных устройств насосных станций

Мухаммадиев М. М., доктор техн. наук, Носиров Ф. Ж., инженер, Уришев Б. У.,
кандидат техн. наук (Ташкентский государственный технический университет)

Водоприемные устройства насосных станций являются важнейшими элементами машинного водоподъема, показатели которых напрямую влияют на эффективность эксплуатации насосной станции. Кавитационный, гидроабразивный износ элементов проточного тракта, засос воздуха из поверхности воды в водоприемном устройстве, заилиение — вот некоторые из тех негативных явлений, которые являются последствиями несовершенной конструкции и неправильной эксплуатации водоприемных устройств.

Особо выделяется заилиение входной части водоприемных устройств, которому подвержены многие насосные станции оросительных систем Амударьинского бассейна, перекачивающие взвешенный поток. В течение значительной части года в зависимости от графика водоподдачи на станциях работают не все насосы, что приводит к неравномерному забору воды из аванкамеры. Такой режим работы насосной станции приводит к снижению скорости воды меньше незаиляющей, к появлению водоворотных зон, к осаждению наносов. Больше всего подвергаются заилению боковые части аванкамеры и крайние водоприемные устройства. Заиляемая часть аванкамеры и входных оголовков водоприемных устройств иногда занимает до 67 % от их площади [1]. По данным наших наблюдений высота слоя отложенных наносов в насосных станциях М-2-1 и М-2-2 Каршинского магистрального канала составляет 0,5 – 1,2 м, а занимаемая ими площадь — 46 – 52 %.

Процесс отложения наносов зависит от их гидравлической крупности и скорости потока. При скорости потока меньше незаиляющей частицы наносов, имеющие удельный вес больше единицы, падают на дно и откосы аванкамеры. При этом поперечные пульсационные скорости имеют величину, недостаточную для образования подъемной силы, действующей на частицы и способной противостоять их падению.

В процессе осаждения наносов эпюра скоростей, размеры частиц, концентрация твердой фазы принимают примерно такой вид, как на рис. 1 [2].

Из рис. 1 видно, что самая высокая концентрация наносов и их наибольшие размеры приходится на придонный слой, где скорость течения почти равна нулю. Отсюда можно сделать вывод о том, что искусственное увеличение поперечных и радиальных скоростей в придонном слое придает до-

полнительную силу воздействию на частицы наносов, которое заставляет их двигаться и не дает им возможность осесть на дне.

Очевидно, что величина и направление силы зависят от параметров искусственно создаваемой скорости в данной точке и рассматриваемого момента времени.

На движение наносов существенно влияет еще такой фактор, как интенсивность пульсационных скоростей [3]. Как показывают опыты, интенсивность пульсации скоростей в случае безнапорных потоков уменьшается при удалении от дна потока и на поверхности спокойных потоков она практически равна нулю [2]. Из этого следует, что на некоторой высоте от дна пульсационная скорость оказывается равной гидравлической крупности самой мелкой частицы наносов и дальнейший ее подъем невозможен, так как при этом пульсационная скорость окажется меньше гидравлической крупности, т.е. $u^1 < \omega_0$.

Для предотвращения осаждения наносов на дне сооружений необходимы специальные конструкции, создающие пульсационные скорости в придонном слое. Значения этих скоростей должны быть больше гидравлической крупности самой большой по размерам частицы наносов.

Действительно, на дне сооружения мгновенная скорость потока в трехмерном движении записывается следующими формулами:

$$u_x = \bar{u}_x + u'_x; u_y = \bar{u}_y + u'_y; u_z = \bar{u}_z + u'_z,$$

где $\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_z$ — проекция осредненных скоростей; u'_x, u'_y, u'_z — проекция пульсационных составляющих скоростей.

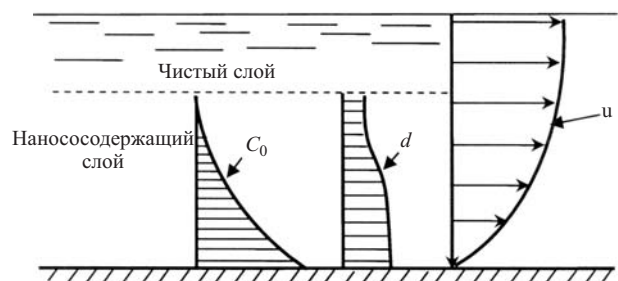


Рис. 1. Эпюра параметров при осаждении наносов:

c_0 — эпюра местной предельной концентрации твердой фазы; d — эпюра диаметров частиц; u — эпюра осредненных продольных скоростей

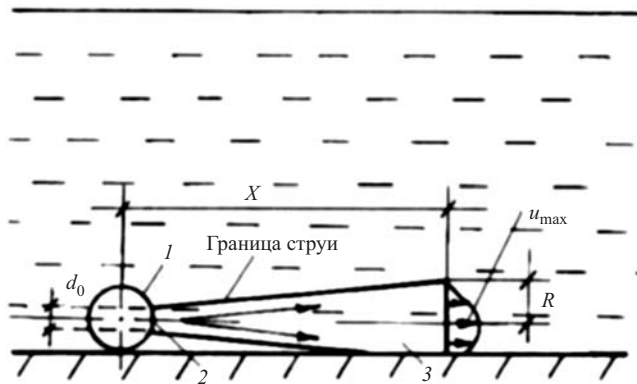


Рис. 2. Схема истечения воды из перфорированной трубы:
1 — перфорированная труба; 2 — отверстие; 3 — струя

Известно, что на дне сооружения значения осредненных скоростей близки к нулю, а чтобы получить мгновенную скорость, равную незаилюющей скорости, необходимо увеличить величину пульсационных составляющих. При этом основную роль играет вертикальная составляющая u_z , именно под ее действием частицы наносов будут находиться во взвешенном состоянии. Изменение u_z вследствие создания пульсации скорости u'_z приводит к непрерывным подъемам и опусканиям частиц, которые будут постепенно перемещаться вместе с потоком воды [4]. Это обстоятельство требует принятия действенных мер для предотвращения осаждения наносов на дне аванкамеры и для обеспечения их транспортировки по водопроводящему тракту в верхний бьеф.

Для решения этого вопроса нами предложено новое устройство, позволяющее предотвратить осаждение наносов на дне аванкамеры [6]. Устройство представляет собой напорную подводящую трубу, которая с одной стороны соединяется с нагнетательным трубопроводом насосного агрегата, а с другой — имеет специальное приспособление в виде перфорированных труб, проложенных по откосам или дну аванкамеры в тех местах, где оседают наносы. Под действием давления, создаваемого в перфорированных трубах, вода вытекает из их отверстий струями, образуя в среде пульсационное движение потока.

При истечении воды из трубы струя постепенно расширяется. На границе струи и вблизи нее формируется струйный пограничный турбулентный слой. Интенсивные пульсации скорости и перемешивание приводят к тому, что между струей и окружающим потоком происходит обмен количеством движения, за счет чего струя увлекает с собой часть окружающей жидкости [5]. При этом в зоне истечения струи можно наблюдать вихревое (водоворотное) движение, которое по мере увеличения расстояния x постепенно затухает отдельными водоворо-

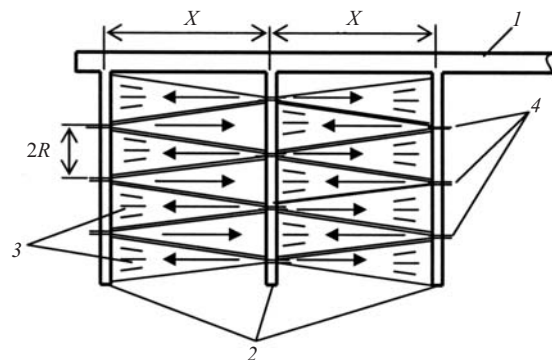


Рис. 3. Схема прокладки перфорированных труб:

1 — напорная подводящая труба; 2 — перфорированные трубы; 3 — струи; 4 — отверстия перфорированных труб

тами, обусловленными поперечной диффузией механической энергии [2].

Основными параметрами, характеризующими струи, являются следующие (рис. 2):

максимальная скорость струи u_{\max} на расстоянии x ;

скорость истечения воды из отверстия u_0 ;

диаметр отверстия d_0 ;

радиус струи R на расстоянии x .

Эти величины можно определить по следующим формулам, полученным Г. Н. Абрамовичем [5]:

$$u_{\max} = \frac{0,96u_0d_0}{2ax + 0,29}, \quad (1)$$

где a — коэффициент структуры потока, который для круглой струи принимается равным 0,08; d_0 — диаметр отверстия;

$$u_0 = \mu_0 \sqrt{2gz}, \quad (2)$$

где μ_0 — коэффициент расхода, который для практических расчетов принимается равным 0,62 [2, 4]; z — превышение напора насоса H_2 в месте истечения из трубы над напором H_1 в водоприемном устройстве (в аванкамере): $z = H_2 - H_1$;

$$R = \left(\frac{6,8ax}{d_0} + 1 \right) \frac{d_0}{2}. \quad (3)$$

Для максимальной эффективности создания турбулентной среды струями воды из перфорированных труб расстояние между ними предлагаем принимать равным x , а расстояние между отверстиями — равным $2R$ (рис. 3). При такой компоновке перфорированных труб и их отверстий появляется возможность максимально использовать гидродинамическую силу струи для образования турбулентного состояния потока.

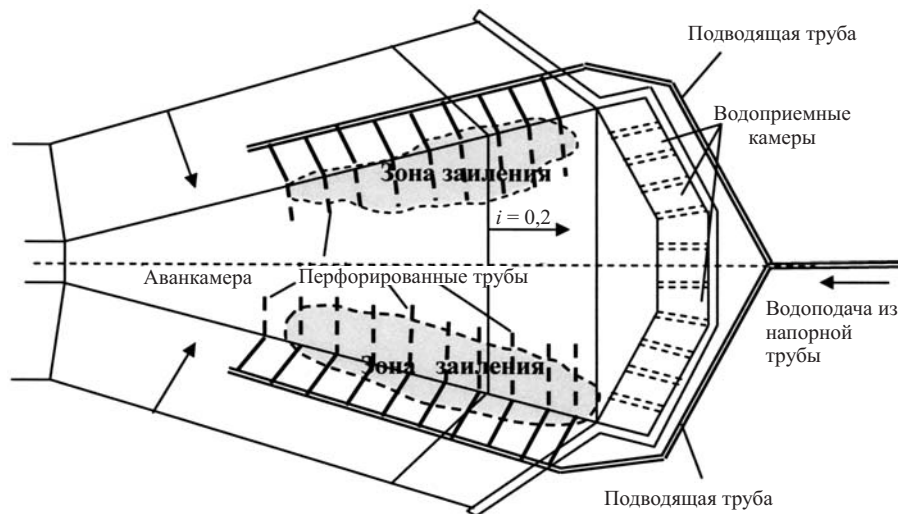


Рис. 4. Схема аванкамеры насосной станции М-2-2

На вышеупомянутой насосной станции М-2-2 нами были проведены натурные исследования с применением нового устройства. Перфорированные трубы были проложены с боковых сторон аванкамеры, в тех местах, где наблюдалось наибольшее отложение наносов (рис. 4). Расчеты по определению напорно-расходных параметров подводящей трубы, которая была соединена с дренажно-осушительной системой насосной станции, велись с учетом обеспечения гарантированной напорной струи из отверстий перфорированных труб. Проверка работоспособности данной системы показала, что при обеспечении расчетных напорно-расходных параметров подаваемой воды зона действия струй охватывает 89 % площади, на которой были проложены перфорированные трубы.

В результате исследования установлено, что в период подачи воды в вышеприведенную систему в зоне нахождения перфорированных труб отложения наносов не наблюдалось на 92 % площади аванкамеры. При этом изменялась привычная структура потока в придонном слое, мутность перекачиваемой воды увеличивалась до $8,2 \text{ кг/м}^3$ (при работе трех агрегатов до применения вышеприведенного устройства мутность составляла $1,8 - 2,2 \text{ кг/м}^3$). При повторных пусках устройства

после непродолжительных остановок небольшие слои наносов, отложенных в зоне действия струеобразующих труб, подвергались размыву и восстанавливалось высокое содержание наносов в воде.

Очевидно, что применение предложенной системы является целесообразным только при отсутствии или при низком содержании абразивных частиц в перекачиваемой воде, не приводящих к гидроабразивному износу элементов проточного тракта.

Список литературы

1. Гловацкий О. Я., Очилов Р. А. Совершенствование эксплуатации крупных мелиоративных насосных станций: Обзорн. информ. / ЦБНТИ Минводстроя СССР, 1990. Ч. I.
2. Чугаев Р. Р. Гидравлика: Учебник для вузов. — 4 изд. Л.: Энергоиздат (Ленингр. отд.), 1982.
3. Мирихулава Ц. Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. М.: Колос, 1967.
4. Штеренлихт Д. В. Гидравлика: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М.: Физматиздат, 1960.
6. Пат. Р. Узб. FAP 00238. Водоприемное сооружение / Мухаммадиев М. М., Уришев Б. У., Носиров Ф. Ж. // Бюллетень изобретений. 2006. № 2 (Ташкент).
7. Мухаммадиев М. М., Уришев Б. У., Носиров Ф. Ж. Улучшение всасывающей способности насосных агрегатов при сильном заиливании аванкамеры // Вестник ТашГТУ. 2008. № 2 – 3.

Влияние эксплуатационных факторов ГЭС на состояние вмещающего массива гидротехнических туннелей

Абрамов Н. Н., чл.-корр. МАНЭБ,
Епимахов Ю. А., доктор техн. наук (Горный институт КНЦ РАН)

В отечественной практике гидротехнического строительства большепролетные подземные сооружения используются для размещения машинных залов ГЭС, а также в качестве подводящих и отводящих напорных и безнапорных туннелей, значительное количество которых эксплуатируется без крепления. Как правило, туннели пройдены с использованием обычных паспортов БВР. Эксплуатационные факторы работы подземных ГЭС, связанные с постоянными вибрационными нагрузками, длительно воздействующими на межблоковые контакты массива, способствуют развитию зон его разуплотнения.

Вынужденные вибрационные нагрузки, в зависимости от состояния и конструктивных размеров объекта воздействуют по-разному. В результате исследований деформационных проявлений виброчувствительности горных пород было выявлено скачкообразное аномальное изменение деформаций и их скоростей во время действия вибраций на нагруженные образцы горных пород. В момент появления вибраций отмечалось существенное снижение уровня акустической эмиссии по сравнению с периодом деформирования образца без вибрации. В настоящее время вопрос об иницирующем воздействии слабых вибраций на процесс деформирования нагруженных геоматериалов, в связи с задачами активного воздействия на очаги концентрации напряжений и оценкой устойчивости механических систем, остается открытым.

Неразрушающий контроль состояния подземных объектов, связанный в первую очередь с безопасностью их эксплуатации особенно актуален. Гидротехнической службой филиала “Кольский” ОАО “ТГК-1” совместно с Горным институтом КНЦ РАН (г. Апатиты) разработан регламент обследования подземных сооружений ГЭС Кольского полуострова. Важным моментом при проведении натурного обследования гидротехнических туннелей является не только обычная фиксация очагов зон вывалообразования из кровли и стен сооружений, но и оценка природы вывалов, образовавшихся в процессе эксплуатации сооружения. Исходя из современных представлений о формировании состояния массива во времени программой работ учитывалась необходимость организации и проведения периодических наблюдений. Для этой цели в туннеле закладывались стационарные наблюдательные полигоны для долговременных геофизических на-

блюдений. В качестве основного инструментального метода наблюдений был выбран метод сейсмической томографии с использованием многоканальной сейсмической аппаратуры. Для проведения оперативных оценок состояния приконтурного массива подземных сооружений использовалась портативная одноканальная сейсмостанция “Bison”.

В соответствии с требованиями технической эксплуатации были проведены обследования туннелей Верхнетериберской, Борисоглебской и Верхнетулумской ГЭС (Кольский полуостров) (табл. 1). Методика обследований включала:

визуальный осмотр туннелей, документирование вывалов, их классификацию;

инструментальную оценку на отдельных участках туннелей параметров приконтурного массива сейсмическим методом.

Массив скальных пород, вмещающий подземные сооружения ГЭС, представлен микроклиновыми гранитами Балтийского щита, гранитогнейсами и сиенитами, ослабленными на отдельных участках зонами разлома, и глинистыми прослойками с подчиненными гранодиоритами верхнеархейского возраста. Вариации минерального состава для данных вмещающих пород невелики, в связи с чем характеристики плотности изменяются в небольших пределах. Плотность гранитов, содержащих в основном легкие минералы — кварц и полевые шпаты, составляет $2,70 - 2,75 \text{ т/м}^3$. На характеристики упругости и прочности в большей мере влияют структурно-текстурные факторы и трещиноватость, вследствие чего и вариации изменчивости этих характеристик более широкие. Скорости продольных и поперечных волн составляют соответственно $5,15 - 5,42$ и $3,01 - 3,26 \text{ км/с}$. Прочность пород на сжатие $160 - 247 \text{ МПа}$, максимальная глубина заложения выработок от свободной поверхности $60 - 100 \text{ м}$.

По результатам визуального обследования водонесущих туннелей на рис. 1 представлена обобщенная гистограмма распределения поперечных размеров вывалов, зафиксированных в выработках. Характеристика кусков породы из кровли и стен подземных выработок и их размеры указывают на природу вывалов. Обрушения произошли в основном в пределах нарушенного техногенного слоя приконтурного массива пород. В табл. 2 приведены характеристики массива, полученные с использованием сейсмического метода наблюдений.

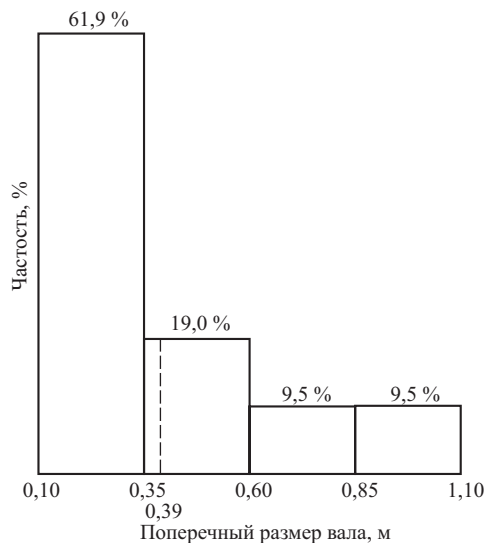


Рис. 1. Гистограмма распределения поперечных размеров вывалов в подводящем туннеле

Трещиноватость пород массива и качество межтрещинных контактов, как важнейшие характеристики состояния массива оценивают по классификации [1], используя апробированные геофизические показатели трещиноватости B_e и K :

$$B_e = (V_{p0}/V_{pi})^2 - 1; \quad (1)$$

$$K = \mu_i/\mu_0, \quad (2)$$

где V_{pi} — скорость продольной сейсмической волны по направлению i ; V_{p0} — скорость продольной волны в отдельностях, слагающих массив; μ_i и μ_0

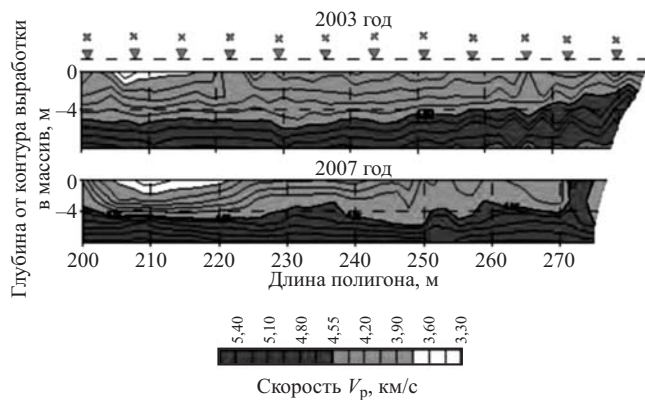


Рис. 2. Сейсмотограммы скоростей продольных волн на полигоне НП № 1 в 2003 – 2007 гг.

— коэффициенты Пуассона в нарушенном и сохранном массивах, рассчитываемые по соотношениям скоростей V_p и V_s , [2, 3].

Выполненная инструментальная оценка параметров приконтурного массива позволила классифицировать породы в пределах нарушенной зоны как среднетрещиноватые (III категория трещиноватости) с размером блока 0,5 – 1,0 м.

В пределах точности измерений данная оценка хорошо согласуется с результатами визуального обследования туннелей. Оцененные мощности нарушенной зоны от контура выработок не превышают 1,1 м (как на момент проходки). Это свидетельствует о том, что массив не потерял своих несущих свойств и обладает достаточным запасом устойчивости.

На состояние окружающего массива подземной ГЭС-12 (табл. 1), вмещающей подземный машин-

Т а б л и ц а 1

Основные характеристики гидротехнических сооружений ГЭС

ГЭС	Сооружение	Сечение, м ² /длина, м	Тип крепления	Способ проходки	Срок эксплуатации, лет
Верхнетериберская	Водонапорный туннель	40/1410	Без крепления, на отдельных участках, торкрет-бетон, анкеры	Обычная технология буровзрывных работ	22
Борисоглебская	Безнапорные туннели:	Без крепления на отдельных участках, анкеры	То же	То же	43
	подводящий	145/817			
	отводящий 1	160/130			
	отводящий 2	160/158			
Верхнетуломская	Машинный зал	25 × 100 × 25	Торкрет-бетон, анкеры	То же	45
	Щитовая галерея	8 × 100 × 25	Без крепления, на отдельных участках, анкеры		
	Подходная штольня	6 × 10 × 500			

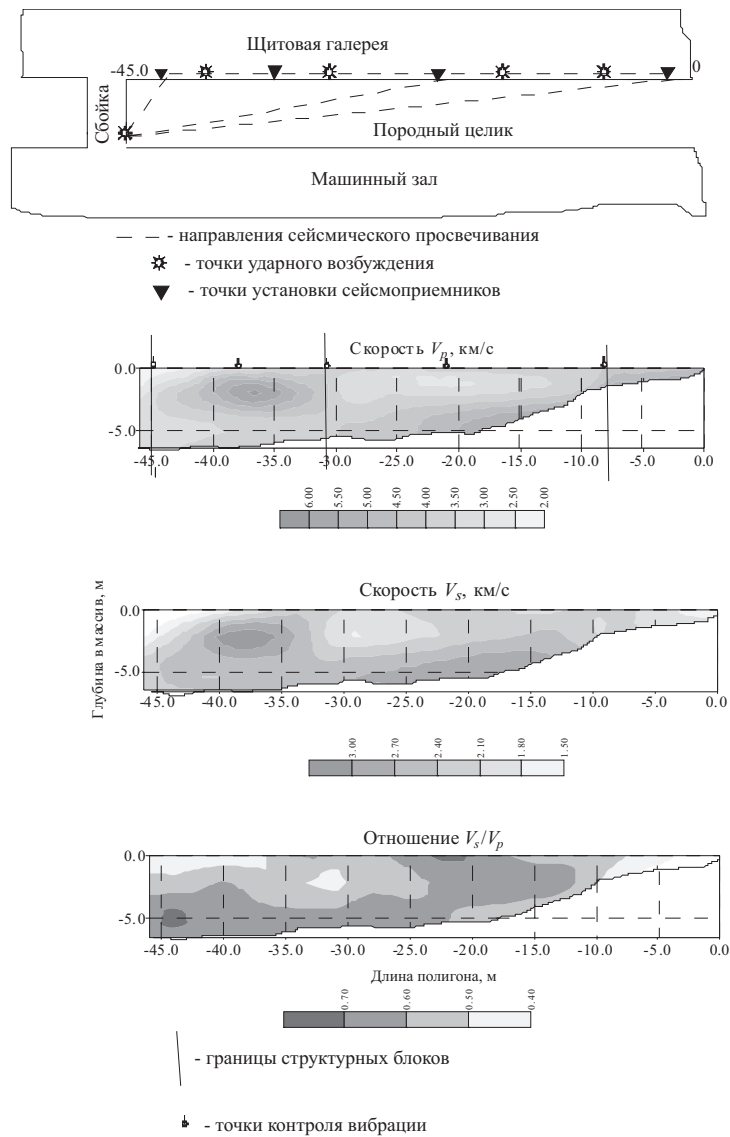


Рис. 3. Схема сейсмомониторинга породного целика и томограммы V_p и V_s на полигоне НП № 3

ный зал с четырьмя гидрогенераторами по 67 МВт каждый, кроме процессов выветривания влияет воздействие постоянно действующих вибронагру-

зок от работы генераторов. Основным объектом воздействия вибраций являются межблоковые границы — трещины, заполненные рыхлым материалом. Под действием вибрационных нагрузок, особенно в течение длительного времени, состояние контактов может ухудшаться, что приводит к снижению устойчивости массива. Результаты сейсмотомографического контроля, полученные для дальней и ближней к машинному залу областей массива, представлены на рис. 2 – 4.

Измерения скоростей сейсмических волн производились с использованием 24-канальной цифровой сейсмостанции “Elliss” на полигоне НП № 1 — в дальней зоне от воздействия вибронагрузок (эталонный участок) и полигоне НП № 3 — в непосредственной близости к машинному залу. Выполнены сейсмопрофилирование и просвечивание стенок выработок. Сейсмотомограммы скоростей распространения сейсмических волн в массиве построены

Таблица 2

Результаты натуральных измерений туннеля Борисоглебской ГЭС

Номер станции	Пикетаж, м	Мощность нарушенной зоны, м	Диапазон скоростей в пределах нарушенной зоны, км/с	Показатель трещиноватости
1	15 – 25	0,2 – 0,4	3,29 – 4,0	1,95
2	– (15 – 25)	0,8 – 1,0	3,30 – 3,50	1,6
3	40 – 50	0,8 – 1,1	3,30 – 3,50	2,1
4	280 – 290	0,6 – 0,8	3,43 – 3,65	2,1
5	650 – 660	0,5 – 0,7	3,27 – 3,76	1,6

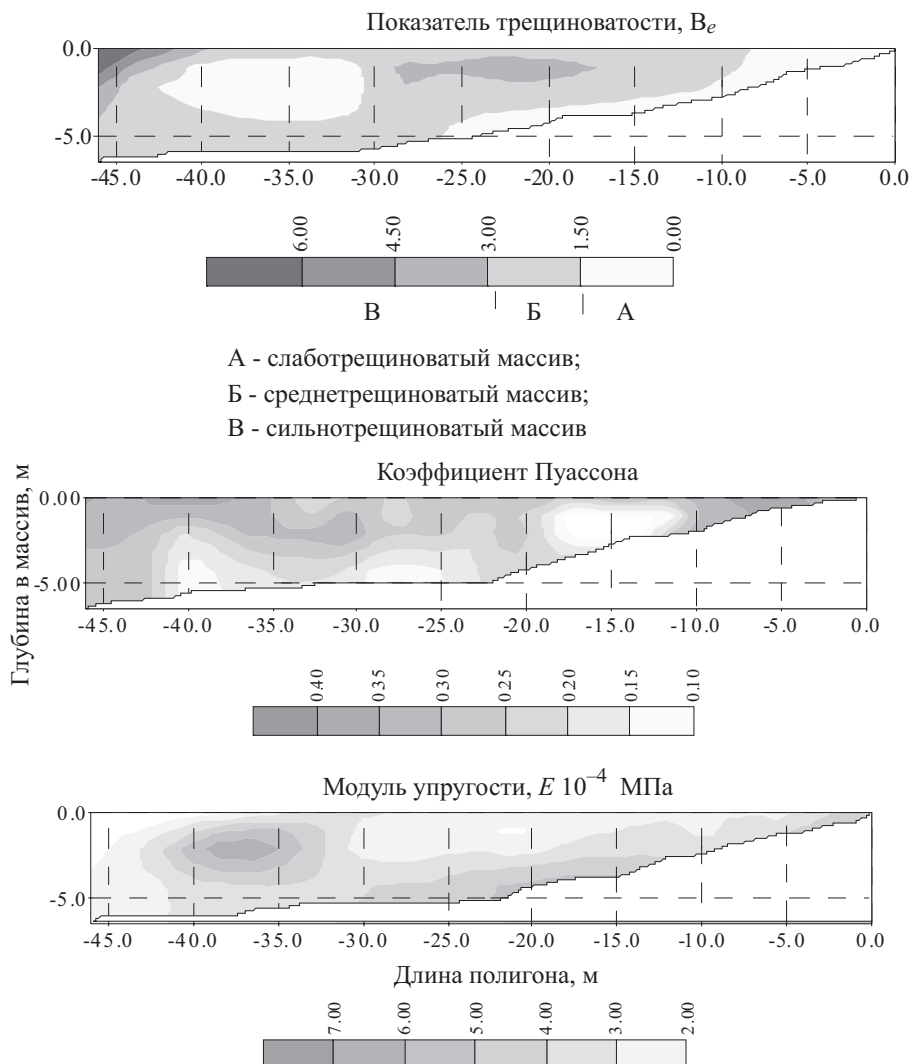


Рис. 4. Оценка свойств вмещающих пород по результатам сейсмомониторинга на полигоне НП № 3

с использованием пакета программ “Х-Томо” (разработчик ФГУП “Севморгео”, г. Санкт-Петербург).

Результаты сейсмотомографического обследования по двум циклам мониторинга в 2003 и 2007 гг. на полигоне НП № 1 представлены на рис. 2. Диапазоны изменения скоростей для обоих циклов наблюдений совпадают (3,0 – 5,4 км/с) с вариацией средних значений ($V_{\text{ср.2003}} = 4,47$ км/с, $V_{\text{ср.2007}} = 4,51$ км/с), не превышающей 1 %, что находится в пределах точности измерений и не является значимой величиной. Геофизический показатель V_e варьирует в пределах 0,8 – 1,3. По коэффициентам Пуассона показатель $K = \mu_{2007}/\mu_{2003} = 1,16$. Принимая $V_0 = V_{\text{ср.2003}} = 4,47$ км/с, оцениваем состояние массива по трещинной нарушенности как сохранное и слаботрещиноватое. Таким образом, в результате мониторинга существенных изменений параметров состояния массива на данном участке не выявлено.

Результаты сейсмомониторинга на полигоне НП № 3 (щитовая галерея), полученные в 2008 –

2009 гг., представлены на рис. 3, 4. Как видно из приведенных данных, участок характеризуется снижением нижней границы скорости продольной волны до 2,0 км/с. По существующим представлениям для сохранных скальных пород коэффициент Пуассона составляет 0,22 – 0,32. Для одних и тех же комплексов пород рост этого показателя для различных участков массива свидетельствует либо о росте нарушенности пород, либо о снижении прочности межтрещинных связей массива. При анализе распределения коэффициента Пуассона на контролируемом участке массива (рис. 4) прослеживается тенденция его роста до 0,35 – 0,40 (темная палитра рисунка) на участках средне- и крупноблочной трещиноватости ($V_e = 1,4$). Можно предположить, что причиной такой вариации свойств массива является ослабление его естественных межблоковых связей. Этот вывод подтверждается и снижением на этих же участках скоростей продольных волн и модуля упругости пород до $(2 - 3) \cdot 10^4$ МПа. Причиной такого проявления могут стать постоянно действующи-

щие динамические вибрагрузки от работы гидрогенераторов. Устойчивость массива в приконтурной части шандронной галереи обеспечивается использованием надежной анкерной крепи.

Выводы

1. Длительная эксплуатация незакрепленных гидротехнических туннелей под влиянием процессов выветривания и воды приводит к снижению геомеханических характеристик приконтурного массива с образованием зон отдельных вывалов. В зонах тектонических нарушений фиксируется процесс ослабления естественных межблоковых связей под действием активных процессов выветривания и напорных вод, в особенности для водонапорных туннелей.

2. Эксплуатационные вибрагрузки подземной ГЭС при длительном воздействии на массив спо-

собствуют ослаблению его межблоковых связей и оказывают негативное влияние на устойчивость приконтурного массива подземных сооружений.

3. Эксплуатация сооружений должна производиться с обязательным геомеханическим мониторингом состояния массива, особенно в ближней зоне очагов динамических воздействий.

Список литературы

1. Мельников Н. Н., Епимахов Ю. А., Абрамов Н. Н. Научные основы интенсификации введения большепролетных подземных сооружений в скальном массиве. — Апатиты: Колесниковский научный центр РАН. 2008.
2. Никитин В. Н. Основы инженерной сейсмологии. — М.: МГУ, 1981.
3. Савич А. И., Яценко З. Г. Исследования упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами. — М.: Недра, 1979.

Непредусмотренные ситуации, возникшие при монтаже, пусконаладке и эксплуатации оборудования гидроэлектростанций

Михайлов М. Г., инженер (ОАО «Силовые машины»)

В статье рассмотрены ситуации, имевшие место на различных ГЭС в России и за рубежом. Данная информация представляет интерес для специалистов, осуществляющих проектирование гидроэлектростанций, конструирование, изготовление, монтаж, пусконаладку, натурные испытания, эксплуатацию и ремонт гидроэнергетического оборудования, а также для студентов гидроэнергетических специальностей.

Монтаж оборудования

1. Гидроагрегат мощностью 375 МВт, турбина радиально-осевого типа, расчетный напор 156,54 м, генератор зонтичный, частота вращения 150 об/мин, изоляция полюсов ротора класса F, полюсы изготовлены по методу вакуумно-нагнетательной пропитки, при этом катушка, сердечник и детали изоляции являются единым целым. Вес одного полюса более 5 т. Подземное здание ГЭС.

Для определения мест установки полюсов по весу на обод ротора генератора в соответствии с инструкцией завода-изготовителя необходимо записать вес заводского взвешивания каждого полюса. Для этого приходится неоднократно вскрывать и переключать ящики с полюсами с помощью грузоподъемного механизма. При выполнении этой работы обнаружили, что на нескольких полюсах не был указан вес. Взвешивать полюсы ротора генератора в условиях стройплощадки затруднительно.

Ошибка во взвешивании на заводе-изготовителе генератора или в навеске полюсов по весу на обод ротора в условиях монтажа может привести к механическому небалансу ротора, повышенной вибрации, ухудшению динамических характеристик гидроагрегата.

Для сокращения объемов и сроков монтажных работ на стройплощадке взвешивание и определение места каждого полюса на ободу ротора целесообразно выполнять на заводе-изготовителе гидрогенератора. Соответствующий документ о координатах местоположения каждого полюса на ободу ротора должен находиться в составе заводской документации на каждый генератор.

2. Гидроагрегат мощностью 375 МВт, турбина радиально-осевого типа, расчетный напор 156,54 м, генератор зонтичный, подземное здание ГЭС.

В процессе сборки ротора на монтажной площадке и статора генератора в кратере гидроагрегата при замерах обнаружили низкое сопротивление изоляции обмоток ротора и статора, причиной чему было отсутствие вентиляции. Пришлось организовать круглосуточный подогрев ротора (на монтажной площадке) и статора (внутри него) лампами накаливания, чтобы не допустить увлажнения изоляции. Низкое сопротивление изоляции обмоток не позволяет выполнить высоковольтные испытания до опускания ротора генератора в кратер. Исполь-

зование системы подогрева усложняет проведение монтажных работ.

В подземном здании ГЭС с начала монтажа оборудования должна предусматриваться система вентиляции строительного периода (временная) до переключения на постоянную.

3. Транспортировка оборудования автотранспортом к месту монтажа:

1) при транспортировке трехфазного трансформатора на грузовой платформе к проектному месту установки произошло сползание трансформатора на мягкий грунт криволинейного участка временной строительной автодороги. Последующий осмотр специалистами завода-изготовителя трансформатора и специальные измерения технических параметров не выявили повреждений;

2) при транспортировке вала турбины с базы оборудования заказчика в здание ГЭС на повороте временной строительной автодороги произошло падение вала турбины с грузовой платформы на песчаный откос. Последующий осмотр и проверка линии вала гидроагрегата не выявили никаких повреждений;

3) при транспортировке на длинномерной площадке со склада монтажной фирмы в здание ГЭС одной из балок коробчатого сечения, образующих в сборе тележку мостового крана с установленным на ней электродвигателем главного подъема, на повороте строительной автодороги произошло опрокидывание с повреждением электродвигателя и других элементов оборудования, которые пришлось заменить.

Транспортировка оборудования в пределах строительной площадки требует подготовки как со стороны генподрядчика, так и со стороны монтажной организации. При этом особое внимание необходимо уделять: допустимой нагрузке, уклону и радиусу поворота автодороги, допустимой скорости передвижения, надежному креплению оборудования на транспорте, сопровождению крупногабаритных грузов.

4) Два гидроагрегата мощностью по 60 МВт, турбина радиально-осевого типа, расчетный напор 150 м, генератор подвесной, частота вращения 428,6 об/мин, наземное здание ГЭС.

В проектной документации поставщика системы автоматического управления (САУ) гидротурбины была указана граница поставки оборудования, но не были указаны требования к генеральному проектировщику. По этой причине во время монтажных работ пришлось запроектировать трубопровод для выпуска сжатого воздуха (63 кг/см^2) из масловоздушных сосудов (гидроаккумуляторов) двух гидроагрегатов. В технической документации САУ гидротурбины отсутствовали технические требования к компрессору высокого давления. В

частности, рабочее давление компрессора должно быть на $2 - 3 \text{ кг/см}^2$ больше номинального давления (63 кг/см^2) в гидроаккумуляторе. При покупке компрессора и ресивера это обстоятельство не было учтено. В соответствии с документацией завода-поставщика гидротурбины требовалось выполнить гидравлическое испытание гидроаккумулятора (96 кг/см^2). Для этого были необходимы заглушки на гидроаккумулятор на время испытания. В поставку они не входили. Заглушки были выполнены монтажной фирмой на основе замеров.

Поставщикам систем автоматического управления гидротурбин необходимо указывать в технической документации требования к генеральному проектировщику, касающиеся оборудования, не входящего в поставку. В комплект специальных монтажных приспособлений для САУ должно входить приспособление для гидравлического испытания гидроаккумулятора (в том числе заглушки на все отверстия и крепеж), тем более что испытания производятся при вводе в работу САУ, после ремонта, а также при техническом освидетельствовании во время эксплуатации.

5. Два гидроагрегата мощностью 60 МВт, турбина радиально-осевого типа, расчетный напор 150 м, генератор подвесной, частота вращения 428,6 об/мин. Наземное здание ГЭС.

На полу шахты генератора рядом с водяными воздухоохладителями был предусмотрен кольцевой лоток для сбора и отвода воды пластмассовыми трубами без запорной арматуры в дренажный канал, расположенный на более низкой отметке, с последующим сливом в приямок дренажной насосной. В качестве противопожарной системы гидрогенератора проектом предусматривалось газовое пожаротушение (углекислый газ). Таким образом, в случае аварийного или случайного срабатывания системы газового пожаротушения углекислый газ, опустившись из шахты генератора по дренажным трубам, появился бы на более низкой отметке, что может привести к тяжелому несчастному случаю. Для исключения подобной ситуации на нижние концы пластмассовых труб в качестве временной меры были установлены съемные заглушки.

При проектировании строительной части здания ГЭС при наличии проектной системы газового пожаротушения (углекислый газ) гидрогенератора необходимо исключить проникновение газа по водяным дренажным трубам из шахты генератора на другие отметки здания ГЭС. Данное требование должно быть учтено в ГОСТ 5616-89 (2003 г.) "Генераторы и генераторы-двигатели электрические гидротурбинные, общие технические требования".

Проверка и испытание оборудования до заполнения водой водоподводящих и водоотводящих устройств

1. Два гидроагрегата мощностью по 60 МВт, турбина радиально-осевого типа, расчетный напор 150 м, генератор подвесной, частота вращения 428,6 об/мин.

Через несколько дней после наладки направляющего аппарата в шахте гидротурбины при движении лопаток направляющего аппарата появился звук низкой частоты. Осмотр кинематики направляющего аппарата выявил наличие песчинок в направляющих планках регулирующего кольца, изготовленных из антифрикционного материала фирмы “Thordon”. После удаления песчинок из направляющих планок регулирующего кольца гидротурбины звук исчез.

При монтаже рабочих механизмов гидротурбины необходимо поддерживать чистоту на рабочих местах и защищать трущиеся части от попадания посторонних частиц.

2. Два гидроагрегата мощностью по 60 МВт, турбина радиально-осевого типа, расчетный напор 150 м, генератор подвесной, частота вращения 428,6 об/мин, частота сети 60 Гц, напряжение генератора 13,8 кВ. Электрическая цепь генератора — блочный трансформатор выполнена экранированным токопроводом с общей для фаз алюминиевой оболочкой круглой формы.

В проектной документации на токопровод с заземлением оболочки в одной точке не была указана минимально допустимая величина сопротивления изоляции оболочки. По запросу со строительной площадки проектировщик сообщил, что сопротивление изоляции необходимо замерить мегомметром при напряжении 500 В и что величина сопротивления изоляции должна быть не менее 10 кОм. При замере сопротивления изоляции оболочки смонтированного токопровода выяснилось, что на участке от генераторного выключателя до блочного трансформатора сопротивление изоляции равно нулю. Поиск места заземления позволил обнаружить второе место заземления на блочном трансформаторе (первое, проектное также находилось на блочном трансформаторе, но с другой стороны), после удаления которого сопротивление изоляции по-прежнему отсутствовало. Дальнейший поиск места заземления оболочки привел к строительному перекрытию здания ГЭС на уровне поверхности земли, рядом с блочным трансформатором. Как оказалось, строительная организация самовольно смонтировала стальной обруч из круглой арматуры вокруг оболочки токопровода и приварила его электросваркой к строительным закладным маркам (металлическим пластинам с анкерами), заложенным в бетон, тем самым заземлив оболочку, после чего залила

пространство вокруг оболочки электроизоляционной мастикой. После удаления этого заземления сопротивление изоляции восстановилось и составляло сотни мегом.

В проектной документации на токопроводы необходимо указывать требование к заземлению и величине сопротивления изоляции оболочки, а также к способу проверки сопротивления изоляции. Заказчикам и генеральным проектировщикам строительной части ГЭС необходимо обращать внимание на способ и материал герметизации пространства между оболочкой токопровода и проемами здания.

Заполнение водой водоподводящих и водоотводящих устройств при проверке и испытании оборудования при неподвижном агрегате

1. Два гидроагрегата мощностью 60 МВт, турбина радиально-осевого типа, расчетный напор 150 м, генератор подвесной, частота вращения 428,6 об/мин, наземное здание ГЭС. Напорный водовод общий для двух гидроагрегатов. Перед входом в спиральную камеру каждой гидротурбины установлен дисковый затвор.

По окончании инспекции напорного водовода от водоприемника до перехода в наклонную часть был запланирован осмотр развилки напорного водовода перед дисковыми затворами. При этом задвижки опорожнения водовода до и после дисковых затворов были открыты на двух гидроагрегатах. Поскольку на первом гидроагрегате система автоматического управления дискового затвора еще не была смонтирована, то дисковый затвор был открыт с помощью мостового крана машинного зала здания ГЭС. Ротор гидрогенератора был поджат тормозами. Люк в спиральную камеру открыт. Направляющий аппарат открыт. Был проведен осмотр пространства за затвором со стороны верхнего бьефа, откуда были удалены посторонние предметы. После этого дисковый затвор был закрыт и поставлен на стопор. Перешли к соседнему гидроагрегату. На этом гидроагрегате тормоза не были поджаты воздухом к ротору генератора. Направляющий аппарат закрыт. Люк в спиральную камеру открыт для осмотра пространства за дисковым затвором. На этом гидроагрегате система автоматического управления дисковым затвором была введена в работу. Дисковый затвор открывали с панели управления в ручном режиме. Как только дисковый затвор приоткрылся, в спиральную камеру хлынула вода из напорного водовода. Дисковый затвор немедленно закрыли. За это время спиральная камера успела наполниться водой до люка в спиральную камеру, откуда вылилось некоторое количество воды на бетонный пол. Проанализировав ситуа-

цию, поняли, что решетка трубы опорожнения напорного водовода перекрыта посторонними предметами, а дренажные протечки через затвор верхнего бьефа частично наполнили именно этот участок развилки напорного водовода. Задраили люк в спиральную камеру, после чего для опорожнения напорного водовода несколько раз приоткрывали и закрывали дисковый затвор. Вода наполняла спиральную камеру, откуда сливалась в отсасывающую трубу.

Перед открытием дисковых затворов для осмотра напорного водовода необходимо закрыть направляющий аппарат турбины и поставить его на стопора. Убедиться в отсутствии воды в напорном водоводе. Ротор генератора поджать тормозами. Люк в спиральную камеру должен быть задраен. Все отводы воды от спиральной камеры закрыты. Задвижки опорожнения спиральной камеры и напорного водовода должны быть открыты. Клапан опорожнения отсасывающей трубы открыт, насосная откачки должна быть в рабочем состоянии.

Осмотры напорных водоводов необходимо осуществлять в строгом соответствии с подготовленной, согласованной и утвержденной программой.

Пробный пуск гидроагрегата и его испытания на холостом ходу

1. Два гидроагрегата мощностью по 60 МВт, турбина радиально-осевого типа, расчетный напор 150 м, генератор подвесной, частота вращения 428,6 об/мин, подпятник генератора комбинированный с эластичными металлопластмассовыми сегментами. Наземное здание ГЭС.

В соответствии с заводскими инструкциями для определения вибрационного состояния гидроагрегата на уровне верхнего, нижнего генераторных и турбинного подшипников под углом 90° были установлены датчики виброперемещений. Гидроагрегат пустили на холостой ход. Выполнили замеры биения вала. Определили с помощью специальной компьютерной программы места навески балансировочных грузов на спицы остова ротора генератора. После пуска гидроагрегата на холостой ход выяснилось, что биение вала увеличилось. Специализированная фирма, определяющая вибрационное состояние гидроагрегата, сообщила поставщику оборудования, что ротор гидроагрегата не поддается балансировке. Повторный анализ выполненных замеров биения вала специалистами завода-поставщика показал, что место навески балансировочных грузов не соответствовало выполненным замерам. После навески балансировочных грузов на спицы ротора генератора под контролем специалистов за-

вода-поставщика в строгом соответствии с выполненными замерами биения вала гидроагрегата на уровне всех подшипников оказались в допуске.

При получении противоречивых данных при балансировке ротора гидроагрегата необходимо перепроверить правильность установки датчиков, электрических подключений; выполнить перепроверку мест навески грузов с помощью другого оборудования или определить место навески грузов с помощью рисок на валу турбины, которые наносятся при вращении ротора гидроагрегата. В этом случае место навески балансировочных грузов на спицы ротора генератора должно находиться на противоположной стороне центра рисок на валу турбины.

2. Гидроагрегат мощностью 60 МВт, турбина радиально-осевого типа, расчетный напор 150 м, генератор подвесной, частота вращения 428,6 об/мин, угонная скорость 732 об/мин. Наземное здание ГЭС.

Вал гидроагрегата длиной около 13 м состоит из вала генератора, промежуточного вала и вала гидротурбины. Сварной остов ротора генератора был насажен на вал генератора “на горячую” на заводе-изготовителе с последующей обработкой вала на станке. Обод ротора генератора набран из отдельных сегментов с последующей горячей расклиновкой ободными клиньями, что также выполнено на заводе-изготовителе. Полусы ротора генератора навешивались при монтаже.

Проверка линии вала генератора выполнялась при монтаже проворотом ротора с помощью мостового крана. В результате была выявлена неперпендикулярность плоскости вращения зеркального диска к валу генератора, которую устранили с помощью шабровки на клин текстолитовой поверхности зеркального диска. После первого пуска на холостой ход гидроагрегат вращался на номинальных оборотах. Биение вала, замеренное индикаторами часового типа на уровне двух генераторных и турбинного подшипников, находилось в допустимых пределах (менее 240 мкм). Во время второго пуска (через несколько дней после первого) была выполнена настройка первой ступени защиты (электрической) гидроагрегата от повышенных оборотов (115 % от номинальных) без замечаний по биению вала. Во время третьего пуска, выполненного после второго в тот же день, была проверена настройка второй ступени защиты (механической) от повышенных оборотов (162 % от номинальных) и замечаний по биению вала гидроагрегата не было. Центробежное приспособление (вторая ступень защиты), установленное на валу турбины, сработало при 160 % оборотов от номинального значения, после чего направляющий аппарат закрылся, частота вращения плавно снижалась регулятором скорости

гидротурбины до включения автоматического торможения генератора.

При очередном пуске гидроагрегата (через несколько дней после третьего пуска) было замечено с помощью индикаторов часового типа недопустимое биение вала на нижнем генераторном подшипнике (600 мкм). Выполнили проверку линии вала гидроагрегата. Вращение ротора гидроагрегата производили с помощью заводского приспособления и мостового крана. При этом обнаружили задевание рабочего колеса турбины за неподвижные части. Разъединили валы генератора и турбины. Радиальное биение фланца вала генератора превысило допустимое. Установили кольцевую (из двух частей) прокладку из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм между тыльной стороной зеркального диска и втулкой подшипника. Проверили линию вала, а затем прокладку вынули и отштабрили ее на клин, в соответствии с выполненными замерами. При прокрутке с отштабренной прокладкой получили допустимое биение фланца. Соединили фланцы генератора и гидротурбины. Получили неудовлетворительные результаты по биению вала турбины на уровне турбинного подшипника. Разъединили фланцы вала генератора и промежуточного вала турбины и установили клиновую прокладку из полос нержавеющей стали (максимальная толщина клина 0,075 мм, составлен из трех полос: 0,075; 0,05 и 0,025 мм). После обтяжки фланцевого соединения проверили линию вала и получили удовлетворительные результаты по биениям вала агрегата на уровне подшипников турбины и генератора (турбинный подшипник 0,15 мм, нижний генераторный подшипник 0,15 мм, фланец вала генератора 0,11 мм). Собрали гидроагрегат и пустили на холостой ход. Замеры вибрационного состояния гидроагрегата определили необходимость балансировки ротора гидроагрегата, что и было выполнено. После получения положительных результатов продолжили пусконаладочные испытания на гидроагрегате. Анализ данной ситуации показал, что причина повышенного биения вала гидроагрегата сверх допустимой величины была связана с перераспределением посадочных напряжений под втулкой ротора в валу генератора, которое произошло при забросе частоты вращения до 160 % от номинальных оборотов.

Одной из причин нарушения линии вала гидроагрегата во время пуско-наладочных работ может быть перераспределение посадочных напряжений под втулкой сварного остова ротора, насаженного на вал генератора при изготовлении.

3. Гидроагрегат мощностью 60 МВт, турбина радиально-осевого типа, расчетный напор 150 м, генератор подвесной, частота вращения 428,6 об/мин, угонная скорость 732 об/мин. В ге-

нераторе имеется подпятник, совмещенный с верхним подшипником. Сегменты подпятника, верхнего и нижнего генераторных подшипников выполнены с тефлоновым покрытием.

По окончании монтажных работ гидроагрегат пустили на холостой ход. При замерах вибрационного состояния гидроагрегата было замечено влияние кожаных уплотнений подшипников генератора на величину биения вала. На нижнем генераторном подшипнике в течение 30 мин плавно возрастало биение вала. Выполнили балансировку ротора гидроагрегата, навесив на спицы остова ротора груз весом 35 кг. Смазали турбинным маслом кожаные уплотнения подшипников генератора. Убедились в отсутствии температурного влияния трения о вал кожаных уплотнений верхнего и нижнего генераторных подшипников на увеличение биения вала после балансировки. Так, после пуска гидроагрегата на холостой ход биение вала на уровне нижнего генераторного подшипника в процессе нагрева гидроагрегата не увеличилось, а наоборот уменьшилось с 80 до 60 мкм; на верхнем генераторном подшипнике биение вала оставалось стабильным, на уровне 120 мкм. Тем не менее представители завода-изготовителя генератора приняли решение о подрезке всех кожаных уплотнений верхнего и нижнего подшипников. Обрезку кожи произвели на валу генератора, подняв кожаные кольца вверх по валу на меньший диаметр. После этого были продолжены пусконаладочные работы.

Плавный рост биения вала с течением времени, обратимый при охлаждении, указывает на температурное влияние трения уплотнения подшипников по кольцевому контакту кожа — вал. В этом случае по согласованию с заводом-изготовителем генератора производится ослабление натяга уплотнения.

Испытания гидроагрегата под нагрузкой

1. Два гидроагрегата мощностью по 60 МВт, турбина радиально-осевого типа, расчетный напор 150 м, генератор подвесной, частота вращения 428,6 об/мин. Дисковый предтурбинный затвор (диаметр 2 600 мм) типа “биплан” с горизонтальной осью поворота диска. Закрытие затвора осуществляется под действием груза, закрепленного на рычаге. Открытие затвора производится сервомотором, в который подается масло под давлением от маслонапорной установки общей для турбины и дискового затвора.

В соответствии с инструкцией завода-изготовителя при проведении пуско-наладочных работ на предтурбинном дисковом затворе предусматривалось три испытания аварийного закрытия затвора в потоке: при работе гидроагрегата на холостом ходу,

при мощности в 50 и 100 % при существующем напоре. Для выполнения первого испытания гидроагрегат пустили на холостой ход, для проверки электрических защит возбудили генератор, установили минимально возможную мощность. На панели управления дисковым затвором повернули ключ на закрытие. Дисковый затвор закрывался в течение 99 с. При этом регулятор скорости по мере закрытия затвора начал открывать направляющий аппарат, чтобы поддержать мощность. С какого-то положения закрывающегося затвора выдаваемая мощность начала уменьшаться, перешла в отрицательное значение до включения защиты от обратной мощности, что привело к отключению генераторного выключателя и последующей остановке гидроагрегата. Для проведения второго испытания гидроагрегат пустили на холостой ход, синхронизировали с энергосистемой и набрали 30,55 МВт нагрузки. Также ключом на местной панели управления включили затвор на закрытие. Затвор закрывался в течение 78 с. В последнем испытании при существующем напоре максимальная мощность составила 48,25 МВт, а время аварийного закрытия дискового затвора в потоке составило 68 с. Необходимо отметить, что повышение уровня водохранилища было ограничено неготовностью строительной части гидросооружения.

Время аварийного закрытия затвора при номинальной мощности 60 МВт по проекту должно составлять 50 – 60 с. Однако при проведении данного испытания напор нетто на гидротурбине составлял менее 140 м вместо 150 м по проекту, максимальная мощность составила только 48,25 МВт, поэтому время аварийного закрытия составило 68 с. Полученные результаты были согласованы заводом-поставщиком дискового затвора как расчетные и удовлетворили заказчика.

2. Гидроагрегат мощностью 60 МВт, турбина радиально-осевого типа, расчетный напор 150 м, генератор подвесной, частота вращения 428,6 об/мин.

В программе пусконаладочных испытаний, которые проводятся на каждом гидрогенераторе на месте установки, составленной заводом-изготовителем гидрогенератора, предусматривалось сначала определение характеристики холостого хода, а затем — трехфазного короткого замыкания. Такая же последовательность указана и в норме ИЕС 34-4, п. 25 (холостой ход) и п. 26 (короткое замыкание), и в ГОСТе 5616–89 (с изменениями от 07. 2003 г.) “Генераторы и генераторы-двигатели электрические гидротурбинные, общие технические требования”, и в “Руководящих указаниях по пуску, наладке и комплексному опробованию смонтированных гидроагрегатов” (1975 г.). Однако при опыте холостого хода при подаче напряжения на статор генератора в

случае пробоя изоляции должна сработать дифференциальная защита генератора, которая настраивается при опыте трехфазного короткого замыкания. Таким образом, более правильно с технической точки зрения в условиях строительной площадки сначала выполнить опыт трехфазного короткого замыкания, а затем — холостого хода. Это требование должно быть отражено в заводской программе пусконаладочных работ, потому что заказчики проводят испытания в той последовательности, которая указана в документации поставщика, а в случае отклонения требуют письменных пояснений.

В заводской программе пусконаладочных испытаний гидрогенератора на месте установки опыт трехфазного короткого замыкания должен быть произведен (для настройки электрических защит) до опыта определения характеристики холостого хода.

3. Два гидроагрегата мощностью по 211 МВт, турбина радиально-осевого типа, расчетный напор 97 м, генератор зонтичный, подпятник комбинированный, сегменты на жестких опорах, частота вращения 138,4 об/мин.

После окончания пусконаладочных работ первый гидроагрегат находился в режиме комплексного опробования в течение 72 ч. Через некоторое время в шахте турбины послышался свист, затем гудение, затем скрежет доносившиеся из шахты генератора. Потом в шахту турбины хлынуло масло из генератора. Гидроагрегат остановили. Проблема оказалась в уплотнении крышки подпятника. Уплотнение было выполнено в металлическом варианте, лабиринтного типа. Касание неподвижных и подвижных лабиринтов привело к нагреву и деформации крышки подпятника, затем из ванны вылилось масло, сторели баббитовые сегменты подпятника и нижнего генераторного подшипника. Простой гидроагрегата занял полгода. Задержка была вызвана повторным изготовлением поврежденного оборудования и его доставкой.

Металлические уплотнения ванн подшипников и подпятников требуют высокой точности при изготовлении и особенно при выполнении монтажных работ.

4. Два гидроагрегата мощностью по 60 МВт, турбина радиально-осевого типа, расчетный напор 150 м, генератор подвесной, частота вращения 428,6 об/мин, подпятник генератора комбинированный с эластичными металлопластмассовыми сегментами.

Во время пусконаладочных работ при вращении гидроагрегата на холостых оборотах, при подаче возбуждения, работе под нагрузкой и сбросах нагрузки производилась запись вибрационного состояния гидроагрегата, в том числе биения вала на

уровне верхнего и нижнего генераторных и турбинного подшипников. Заказчик, ссылаясь на международный стандарт ISO 7919 – 5, предъявил претензию к величине биения вала на уровне нижнего генераторного подшипника, превысившей 140 мкм, что в соответствии с нормой является допустимой границей для нового генератора. Заказчика ознакомили с последней редакцией ISO 7919 – 5 от 04.2005, в которой понятие “новый генератор” исключено, а величина допустимого биения вала гидроагрегата не должна превышать 240 мкм. Это объяснение полностью удовлетворило заказчика и пуско-наладочные работы были продолжены.

При решении спорных технических вопросов между заказчиком и поставщиком следует ссылаться в первую очередь на контрактные документы, во вторую — на международные нормы и в третью — на местные нормы.

5. Два гидроагрегата мощностью по 60 МВт, турбина радиально-осевого типа, расчетный напор 150 м, генератор подвесной, частота вращения 428,6 об/мин, подпятник генератора комбинированный с эластичными металлопластмассовыми сегментами.

Гидроагрегат находился на 72-часовом комплексном опробовании под нагрузкой. Из-за отключения высоковольтной линии энергосистемы произошло отключение гидроагрегата. Повторный пуск не удался из-за аварийного уровня горизонтальной вибрации корпуса турбинного подшипника (двойная амплитуда вибрации составляет 180 – 230 мкм, тогда как уставка на предупредительный сигнал 100 мкм, аварийная остановка — 200 мкм). Для выяснения причин и исключения тяжелых последствий для оборудования в связи с возможным попаданием в направляющий аппарат гидротурбины посторонних предметов проточная часть гидроагрегата была осушена. Осмотрели спиральную камеру, направляющий аппарат, рабочее колесо и конус отсасывающей трубы. Никаких видимых поврежденных или следов ударов не было обнаружено.

Приняли решение продолжить испытания. При пуске гидроагрегат дважды останавливался по сигналу аварийно высокого уровня вибрации корпуса турбинного подшипника. При этом биение вала на уровне турбинного подшипника составляло незначительную величину (0,07 мм). Пустили гидроагрегат еще раз. Подключили к системе контроля вибрации компьютер, чтобы узнать величину вибрации, так как сама система выдает только предупредительный и аварийный сигналы. Компьютер показал горизонтальную вибрацию 180 – 250 мкм на установившемся режиме холостого хода, поэтому на верхний уровень АСУ ТП поступал сигнал отключения гидроагрегата.

С пульта управления ГЭС поступила информация о том, что датчик измерения давления в спиральной камере выдает сигналы непонятных колебаний давления. Проверка показала, что повышенная вибрация корпуса турбинного подшипника и пульсации давления в спиральной камере никак не связаны между собой. В щите приборов гидротурбины на трубе подвода давления из спиральной камеры к датчику давления появилась течь в монтажном сварном шве. После ремонта сварного шва непонятные колебания давления в спиральной камере исчезли.

На следующий день с помощью мобильного виброметра определили незначительный уровень горизонтальной вибрации корпуса турбинного подшипника. Осмотр стационарно установленного датчика контроля вибрации корпуса турбинного подшипника показал, что было отломано резьбовое крепление втулки датчика к корпусу подшипника. Втулка была предназначена для вкручивания в корпус турбинного подшипника с одной стороны и для вкручивания в нее датчика вибрации с другой стороны. После изготовления и установки новой втулки показания уровня горизонтальной вибрации, поступавшие на верхний уровень АСУ ТП, пришли в норму. Комплексное опробование работы гидроагрегата под нагрузкой было продолжено.

В случае неожиданной остановки гидроагрегата из-за аварийно высокого уровня вибрации, в первую очередь, необходимо проверить установку (крепление) датчика вибрации.

Эксплуатация и ремонт оборудования

1. Гидроагрегат мощностью 50 МВт, турбина радиально-осевого типа, расчетный напор 180 м, расход 40 м³/с, генератор подвесной.

Гидроагрегат неожиданно сбросил нагрузку. Попытки дежурного персонала повторно пустить гидроагрегат ситуацию не изменили. Осмотр проточной части гидротурбины показал отсутствие рабочего колеса. Гидроагрегат был выведен в ремонт, во время которого установили запасное рабочее колесо, после чего гидроагрегат был вновь введен в эксплуатацию.

Неожиданный сброс нагрузки гидроагрегатом может означать потерю рабочего колеса гидротурбины.

2. Гидроагрегат мощностью 92 МВт, турбина ковшового типа, расчетный напор 880 м, генератор подвесной.

На входе в длинный деривационный туннель, выполненный в скале, диаметром 2,2 м из-за неисправной работы автоматики закрылся дисковый затвор, а на выходе из туннеля, переходившего в стальную напорный водовод, продолжал работать гид-

роагрегат, что привело к понижению давления (относительно атмосферного) в туннеле. Понижение давления разрушило металлическую дверь подходной строительной штольни к деривационному туннелю (не имевшему облицовки) на горизонтальном участке, что и спасло туннель от аварийных повреждений.

При установке затворов на входе в деривационный туннель и выходе из напорного водовода необходимо предусматривать условия совместной работы, в том числе, в случае аварийных ситуаций.

3. Гидроагрегат мощностью 105 МВт, турбина ковшового типа, напор 1050 м, расход воды 37 м³/с, скорость вращения 514 об/мин.

Гидроагрегат, работавший в обычном режиме, неожиданно сбросил нагрузку. Система автоматики зафиксировала неисправность системы возбуждения генератора. Причиной отказа послужил отрыв вывода медной шины полюса ротора генератора, служащей в качестве междуполюсного соединения. Тщательный осмотр междуполюсных соединений выявил трещины и на других выводах полюсов, что указывало на причину конструктивного характера. Для устранения дефекта потребовался демонтаж всех полюсов ротора с переделкой выводных шин полюсов по технологии и с участием завода-поставщика гидрогенератора.

При осмотрах во время ревизии, текущего или капитального ремонта гидроагрегата необходимо обращать особое внимание на состояние междуполюсных соединений ротора гидрогенератора.

4. Водолазные работы:

1) водолаз в акваланге спустился под воду для осмотра порога напорного водовода. Осмотрев порог, без предварительного согласования зашел за паз аварийно-ремонтного затвора. Однако в результате грубой ошибки затвор опустили на порог в то время, когда водолаз был за затвором, со стороны напорного водовода. Этот случай закончился трагически;

2) получив задание на осмотр порога плоского затвора водоприемника верхнего бьефа на глубине 65 м, водолаз в акваланге начал спуск к проему на сороудерживающей решетке. Потеряв ориентировку под водой, он приблизился к проему в сороудерживающей решетке соседнего гидроагрегата, работавшего под нагрузкой. В результате водолаз погиб;

3) на этой же гидроэлектростанции, через три года после предыдущего несчастного случая, водолаз в акваланге осматривал опущенный плоский затвор верхнего бьефа. Конструкция затвора представляла собой три секции. Байпасом затвора служил проектный зазор до 100 мм между первой и второй секциями плоского затвора, что достигалось подъемом первой секции с помощью козлового крана. В данном случае затвор находился на поро-

ге, байпас был закрыт. Началось опорожнение водовода. В это время водолаз опустился ниже третьей секции, убедился в плотности посадки затвора на порог и начал обратный подъем. Однако по мере осушения водовода, когда появилась разность давлений до и после затвора, через поврежденное уплотнение байпаса на всю ширину затвора появились протечки. Как только водолаз приблизился к уплотнению байпаса между первой и второй секциями затвора, его развернуло и прижало к щели. Этот случай также закончился трагически;

4) по инструкции водолазы должны были сначала осмотреть два порога плоских затворов в самом начале деривационного туннеля, а потом опустить затворы для осушения водовода и последующего технического обслуживания гидроагрегата. Первый затвор сел на порог удачно. Когда опустили второй затвор, услышали шум протечек. Для выяснения причины направили водолаза в акваланге. Опустившись до порога затвора, водолаз почувствовал, как носки его ног затянуло в зазор между затвором и порогом. Освободиться ему не удалось. Группа поддержки попыталась помочь, но также безрезультатно. Тогда срочно открыли второй затвор на водоприемнике, чтобы заполнить водовод и выровнять давление воды до и после затворов и таким образом освободить водолаза. Однако из-за большой протяженности деривационного трубопровода процесс заполнения не был быстрым. Водолаз находился под водой более одного часа. Этот случай закончился также трагически из-за сердечного приступа, хотя в баллонах аквалангиста кислород имелся в достаточном количестве.

В дальнейшем в этой стране было запрещено использовать акваланги для любых видов водолазных работ на гидротехнических сооружениях.

5. На одном из трех гидроагрегатов, принятом в эксплуатацию после комплексного опробования под нагрузкой в течение 72 ч, были замечены частое включение насосов маслонапорной установки гидротурбины, нагрев масла, шевеление лопастей. Эксплуатационный персонал менял нагрузку, пытаясь изменить режим работы (снижение и обратный подъем нагрузки иногда помогал), и лопасти рабочего колеса управлялись, но на панели электрогидравлического регулятора скорости при снижении нагрузки высвечивался сигнал “рассогласование рабочего колеса и направляющего аппарата”. Эксплуатационная организация пришла к выводу о некорректной работе электрогидравлического регулятора скорости гидротурбины. Проверка работы регулятора скорости показала его непричастность к выявленному отклонению в работе гидроагрегата. Проверили рабочее колесо и маслоприемник, в них также не обнаружили отклонений от проекта. Пришлось разъединить валы гидротурбины и гидроге-

нератора, затем поднять вал гидрогенератора на 250 мм. После разъединения верхней и нижней штанг маслопровода было выявлено, что уплотнительное резиновое кольцо между верхней и нижней штангами не соответствует проекту, а именно имеет большие размеры. Кольцо находилось не в уплотняющем пазу, а было сдвинуто вниз, в кольцевую проточку нижней штанги. При работе такое положение уплотняющего кольца создавало эффект обратного клапана, что подтверждалось испытаниями на герметичность верхней и нижней штанг. После замены уплотнения из комплекта запасных частей и сборки демонтированных узлов гидроагрегат был введен в эксплуатацию без замечаний.

При монтаже штанг маслопроводов поворот-но-лопастных гидротурбин, наряду с укрытием полостей штанг от попадания посторонних предметов, с контролем чистоты масляных каналов, с качеством фиксации крепежа, необходимо обращать особое внимание на размеры и установку уплотнений.

6. Гидроагрегат мощностью 60 МВт, турбина радиально-осевого типа, расчетный напор 150 м, генератор подвесной, частота вращения 428,6 об/мин. На напорном водоводе перед турбиной установлен дисковый затвор, маслонапорная установка общая для системы автоматического управления гидротурбиной и дисковым затвором.

После окончания пусконаладочных работ гидроагрегат находился в коммерческой эксплуатации. Неожиданно произошло отключение энергоснабжения собственных нужд. При этом дизель-генератор, предназначенный для работы в такой ситуа-

ции, не включился. Произошло отключение насосов дренажной насосной. После подачи напряжения на собственные нужды дренажные насосы не включились, что должно было произойти автоматически. Колодец дренажной насосной переполнился. Вода начала поступать на отметку дисковых затворов, затопив лекажные агрегаты систем автоматического управления гидротурбинами и дисковыми затворами. Из лекажных агрегатов вода попала в баки маслонапорных установок (масло пришлось полностью заменить). После включения дренажных насосов в ручном режиме уровень воды быстро понизился, работа дренажной насосной перешла в автоматический режим. Модернизировали схему автоматического управления дренажной насосной здания ГЭС таким образом, чтобы при потере питания собственных нужд происходило автоматическое включение дизель-генератора, а после появления напряжения в системе собственных нужд происходило восстановление постоянной схемы энергоснабжения насосной для продолжения работы в автоматическом режиме, без вмешательства оперативного персонала.

Во время пусконаладочных работ необходимо проверять работу систем автоматического управления дренажными и другими насосными, имитируя аварийные ситуации, например потерю напряжения собственных нужд, убеждаясь в автоматическом включении насосной от независимого источника электроснабжения, а также в восстановлении нормального режима работы после подачи напряжения.

Обоснование оптимальных параметров гидроагрегатов малых ГЭС

Тарасов А. В., инженер (НПО “Ранд”), Топаж Г. И., доктор техн. наук
(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)

Около 70 % территории России находится вне централизованной системы энергоснабжения [1]. Условия жизнедеятельности населения этой территории существенно зависят от своевременной доставки органического топлива к тепловым и дизельным электростанциям. Устойчивая тенденция удорожания природных источников органического топлива (уголь, нефть, газ) отрицательно сказывается на экономическом развитии этих регионов, а также на благосостоянии местного населения. При этом на указанной территории имеется множество небольших рек, которые являются надежными и возобновляемыми источниками дешевой электрической энергии. В связи с этим, в последние годы возрос интерес к развитию малой гидроэнергетики, которая особенно перспективна для отдаленных и труднодоступных районов нашей страны, в которых отсутствуют линии электропередач.

Разработки проектов малых гидроэлектростанций (ГЭС) показывают их низкую экономическую эффективность из-за высокой удельной стоимости как строительной части, так и основного энергетического оборудования. Стоимость строительства малых ГЭС оценивается в среднем от 500 до 5000 долл. за 1 кВт установленной мощности со сроком окупаемости до 12 лет, в зависимости от конкретных условий [1]. Особенно увеличивается удельная стоимость 1 кВт мощности для низконапорных малых ГЭС, работающих при напорах менее 5 м. Причем именно такие малые ГЭС являются наиболее перспективными для многих регионов России, однако высокая удельная стоимость этих гидроэлектростанций во многих случаях приводит к отказу от их строительства.

В настоящее время в связи с возросшим интересом к малым низконапорным ГЭС идет активный поиск путей снижения их стоимости за счет разработки упрощенных конструкций гидротурбин, создания унифицированного оборудования гидроагрегатов, использования в качестве гидрогенераторов трехфазных асинхронных или синхронных стандартных электродвигателей, применения сравнительно дешевых систем автоматического управления на базе балластной нагрузки [2]. В частности, в НПО “Ранд” накоплен богатый опыт разработки экономически эффективных гидроагрегатов для малых ГЭС [3].

Следует отметить, что затраты на изготовление гидроагрегатов низконапорных малых ГЭС соизмеримы со стоимостью строительно-монтажных работ, а иногда и превышают ее. Причем по мере уменьшения напора на ГЭС доля затрат на оборудование увеличивается и составляет в среднем не менее 50 %, а для свободно-поточных гидроагрегатов достигает 60 – 70 % от суммарных капиталовложений, в связи с чем задача снижения затрат на изготовление гидроагрегатов малых низконапорных ГЭС является особенно актуальной.

Одним из основных показателей, определяющих экономическую эффективность оборудования ГЭС, являются затраты на 1 кВт установленной мощности [4]. При одной и той же суммарной мощности ГЭС удельные затраты на изготовление гидроагрегатов могут существенно отличаться при установке различного числа гидроагрегатов с различным диаметром рабочего колеса.

Рассмотрим задачу обоснования оптимальных параметров гидроагрегатов малых ГЭС, развивающих заданную суммарную мощность при фиксированном расчетном напоре. В качестве критерия решения задачи оптимизации принимаем условие минимизации удельных капитальных затрат. Решение указанной задачи является особенно актуальным для ГЭС, на которых предполагается установка большого числа гидроагрегатов небольшой мощности (свободно-поточные, приливные, низконапорные гидроэлектростанции).

Удельные затраты на изготовление одного гидроагрегата равны

$$K_{уд} = \frac{\Sigma S}{N}, \quad (1)$$

где ΣS — стоимость изготовления и монтажа гидроагрегата, состоящего из гидротурбины, генератора и системы автоматического управления; N — мощность гидроагрегата.

Анализ затрат, связанных с изготовлением гидроагрегатов малых ГЭС, показал, что стоимость изготовления и монтажа гидротурбины S_T , генератора S_G и системы автоматического управления S_Y можно представить в виде следующих зависимостей от мощности гидроагрегата N , диаметра D_1 и частоты вращения n рабочего колеса:

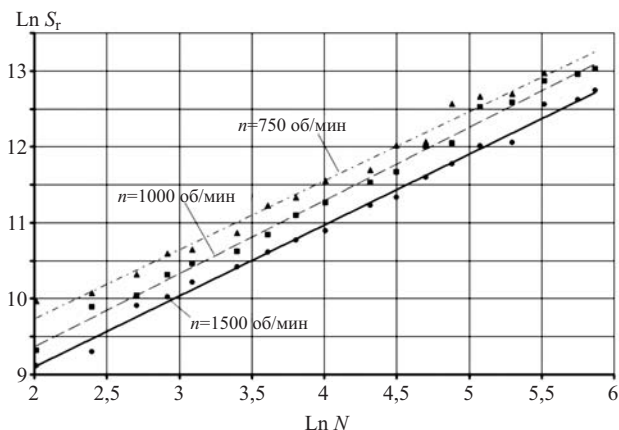


Рис. 1. Зависимости стоимости электродвигателей от их мощности ($n = \text{const}$)

$$S_T = A_T D_1^\delta; \quad S_T = \frac{A_T N^\beta}{n^\varphi}, \quad S_y = B_y + A_y N, \quad (2)$$

где A_T, A_D, B_y, A_y — коэффициенты и δ, β, φ — показатели степени являются постоянными величинами.

Мощность гидроагрегата определяется по формуле

$$N = 9,81 Q_1' H_p \sqrt{H_p} \eta D_1^2, \quad (3)$$

где Q_1' — приведенный расход, зависящий от выбранной системы гидротурбины (осевая, радиально-осевая) и типа рабочего колеса; H_p — расчетный напор; η — коэффициент полезного действия гидроагрегата, равный произведению коэффициентов полезного действия гидротурбины и генератора; D_1 — диаметр рабочего колеса.

Выбор системы гидротурбины и типа рабочего колеса (осевое, радиально-осевое) определяется в результате предварительного технико-экономического расчетного обоснования и в значительной степени зависит от заданного расчетного напора, поэтому для заданного напора H_p и выбранной системы гидротурбины можно считать величины приведенного расхода Q_1' и коэффициента полезного действия гидротурбины η одинаковыми для серии геометрически подобных гидротурбин с различным диаметром рабочего колеса D_1 . В этом случае мощность гидроагрегата можно представить в виде

$$N = A_N D_1^2, \quad (4)$$

где A_N — постоянный коэффициент, зависящий от расчетного напора H_p и выбранного типа рабочего колеса гидротурбины с известным коэффициентом полезного действия η .

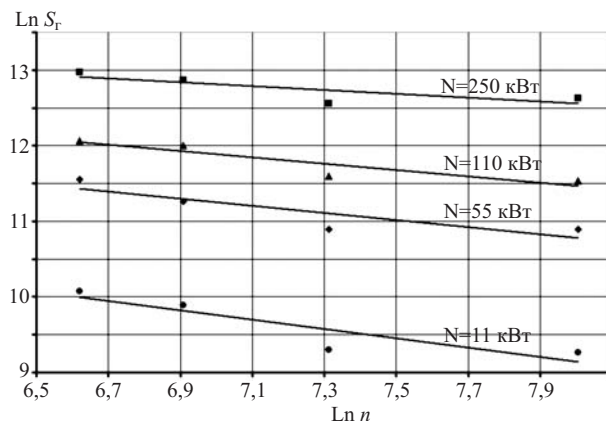


Рис. 2. Зависимости стоимости электродвигателей от частоты вращения ($N = \text{const}$)

Для определения постоянных коэффициентов, входящих в зависимости (2), были выполнены исследования стоимости гидротурбин, генераторов и систем автоматического управления различных фирм, занимающихся разработкой и изготовлением энергетического оборудования малых и крупных ГЭС. Анализ затрат, связанных с изготовлением и монтажом малых гидротурбин, а также опыт разработки крупных гидротурбин [5] показывают, что для фиксированного напора стоимость изготовления и монтажа геометрически подобных гидротурбин можно определить по зависимости

$$S_T = A_T D_1^{2,6-2,8}. \quad (5)$$

Стоимость системы автоматического управления гидротурбины складывается из затрат на разработку электронно-вычислительного блока управления, которые не зависят от мощности и размеров гидроагрегата, и затрат на систему балластной нагрузки и силовой привод, которые практически пропорциональны мощности гидроагрегата.

Стоимость генераторов (электродвигателей) увеличивается с ростом их мощности и с уменьшением частоты вращения:

$$S_T = \frac{A_T N^\beta}{n^\varphi}.$$

Для определения коэффициентов β и φ , входящих в эту зависимость, были рассмотрены многочисленные данные фирмы ОАО “ELDIN”, а также других фирм, занимающихся изготовлением трехфазных синхронных и асинхронных электродвигателей. При этом определялась стоимость электродвигателей, мощность которых менялась в пределах от 10 до 350 кВт при задании различной синхронной частоты их вращения 750 – 3000 об/мин.

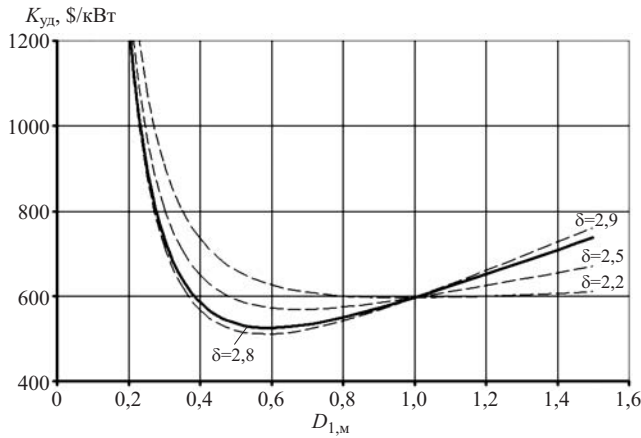


Рис. 3. Зависимость удельной стоимости изготовления гидроагрегата “Ранд” от диаметра рабочего колеса D_1 при различных значениях показателя степени δ

При постоянной частоте вращения стоимость генератора в соответствии с зависимостью (2) равна

$$S_{\Gamma} = A_{1\Gamma} N^{\beta}. \quad (6)$$

Логарифмируя выражение (6), получим зависимость

$$\ln S_{\Gamma} = \beta \ln N + \ln A_{1\Gamma}. \quad (7)$$

На рис. 1 показаны тренды логарифмической зависимости (7) стоимости электродвигателей от их мощности при задании различных значений синхронной частоты вращения. С помощью этих трендов могут быть найдены значения коэффициентов β , которые равны тангенсу угла наклона тренда зависимости (7) к оси абсцисс и меняются незначительно ($\beta = 0,75 \dots 0,85$) в широких пределах изменения мощности электродвигателей.

Для серии генераторов постоянной мощности их стоимость в зависимости от частоты вращения n , в соответствии с (2), можно представить в виде

$$S_{\Gamma} = \frac{A_{2\Gamma}}{n^{\varphi}}. \quad (8)$$

Логарифмируя выражение (8), получим зависимость

$$\ln S_a = \ln A_{1a} - \varphi \ln n. \quad (9)$$

Построив тренды зависимости (9), аналогичные рис. 1, можно найти значения коэффициентов φ , которые для рассмотренных генераторов также менялись в небольших пределах — $\varphi = 0,35 \dots 0,43$ (рис. 2).

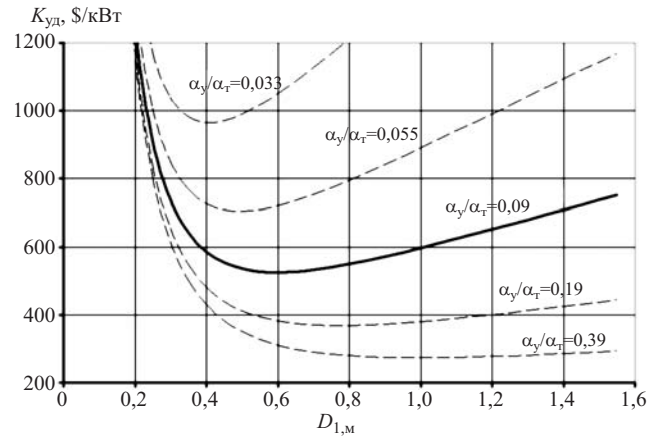


Рис. 4. Зависимость $K_{уд} = f(D_1)$ от коэффициента α_y/α_{τ}

Определив значения коэффициентов β и φ , входящих в зависимость (2) для стоимости электродвигателей, преобразуем это выражение, заменив в нем мощность и частоту вращения рабочего колеса через его диаметр. Для заданного напора и выбранной системы гидротурбины частота вращения рабочего колеса равна

$$n = \frac{n_1' \sqrt{H_p}}{D_1} = \frac{B}{D_1}, \quad (10)$$

где n_1' — приведенные обороты гидротурбины выбранной серии.

Учитывая выражения (4), (10) и (2), получим следующие зависимости суммарной стоимости гидроагрегата и удельных затрат на его изготовление от диаметра рабочего колеса гидротурбины:

$$\Sigma S = A_{\tau} D_1^{\delta} + B_{\Gamma} D_1^{2\beta+\varphi} + B_{1y} D_1^2 + B_y; \quad (11)$$

$$K_{уд} = \alpha_{\tau} D_1^{\delta-2} + \alpha_{\Gamma} D_1^{2\beta+\varphi-2} + \alpha_y D_1^{-2} + \alpha_{1y}. \quad (12)$$

При ранее полученных средних значениях коэффициентов $\delta = 2,8$; $\beta = 0,8$; $\varphi = 0,4$; $2\beta + \varphi - 2 = 0$ выражение (12) для удельных затрат окончательно примет вид

$$K_{уд} = \alpha + \alpha_{\tau} D_1^{0,8} + \alpha_y D_1^{-2}. \quad (13)$$

Постоянные коэффициенты α , α_{τ} и α_y , входящие в выражение (13), зависят от быстроходности выбранной системы гидротурбины, компоновки и конструкции турбины, напора на ГЭС и используемой системы автоматического управления.

Анализ структуры удельных затрат на изготовление гидроагрегата малой ГЭС показал, что основную долю (до 60 – 70 % от общих затрат) составляют затраты на изготовление гидротурбины; в

отличие от крупного гидротурбиностроения, затраты на изготовление генератора (в качестве которого используется стандартный электродвигатель) представляют меньшую долю от суммарных затрат на изготовление гидроагрегата. Удельные затраты на изготовление стандартных электродвигателей близки к постоянной величине и не зависят от диаметра рабочего колеса гидротурбины.

Найдем оптимальный диаметр рабочего колеса $D_{1\text{опт}}$ из условия $(\partial K_{\text{уд}})/(\partial D_1) = 0$. Учитывая зависимость (12) и условие $2\beta + \varphi - 2 = 0$, получим

$$D_{1\text{опт}}^{\delta} = \frac{2\alpha_y}{(\delta - 2)\alpha_T}. \quad (14)$$

При $\delta = 2,8$ будем иметь

$$D_{1\text{опт}}^{2,8} = 2,5 \frac{\alpha_y}{\alpha_T}.$$

Анализ результатов расчетов (рис. 3) показал, что при изменении показателя степени δ в пределах 2,2 ... 3,0 оптимальный диаметр $D_{1\text{опт}}$ меняется незначительно и в основном зависит от значения α_y/α_T , которое равно отношению постоянной слагаемой стоимости системы управления к стоимости гидротурбины.

В качестве примера найдем оптимальный диаметр для базового гидроагрегата, разработанного в НПО "Ранд". Гидроагрегат имеет следующие основные параметры: диаметр рабочего колеса $D_1 = 0,8$ м, расчетный напор $H_p = 2$ м, мощность $N = 27$ кВт, удельная стоимость изготовления $K_{\text{уд}} = 550$ долл./кВт. Коэффициенты α , α_T и α_y в формуле (13) для этого гидроагрегата соответственно равны 130, 430 и 40.

На рис. 3 показана зависимость $K_{\text{уд}} = f(D_1)$ (сплошная кривая), полученная из выражения (13) для данного гидроагрегата. Как видно из рис. 3, оптимальный диаметр для этого гидроагрегата $D_{1\text{опт}} = 0,6$ м. Причем при диаметре рабочего колеса $D_1 < 0,75D_{1\text{опт}}$ удельные затраты $K_{\text{уд}}$ резко увеличиваются, а при увеличении диаметра в пределах

$\underline{D}_{1\text{опт}} \leq D_1 \leq 1,5D_{1\text{опт}}$ удельные затраты меняются незначительно.

Рассмотрим влияние коэффициентов, входящих в выражение (13), на величину оптимального диаметра рабочего колеса D_1 и удельную стоимость изготовления гидроагрегата. На рис. 4 показана функция $K_{\text{уд}} = f(D_1)$ при различных значениях α_y/α_T , которые менялись в широких пределах. Как видно из рис. 4, уменьшение отношения α_y/α_T приводит к значительному увеличению удельных капитальных затрат $K_{\text{уд}}$. При этом оптимальный диаметр рабочего колеса существенно уменьшается.

Выводы

1. Получены универсальные зависимости (11) – (12) стоимости и удельных капитальных затрат на изготовления гидроагрегатов малой ГЭС от величины диаметра рабочего колеса гидротурбины.

2. Исходя из условия получения минимальных удельных затрат на изготовление гидроагрегатов, предложена методика определения оптимального диаметра рабочего колеса гидротурбины малой ГЭС.

3. Выполнены расчетные исследования влияния различных составляющих стоимости гидроагрегата на величину удельных капитальных затрат и значение оптимального диаметра рабочего колеса гидротурбины.

Список литературы

1. Хузмиев И. Роль гидроэнергетики в энергоснабжении отдаленных территорий на примере горных районов РСОА. Владикавказ: Ремарко, 2001.
2. Иванов И. И., Иванова Г. А., Кондратьев В. Н., Полинковский И. А. Повышение эффективности малых ГЭС / Гидротехническое строительство. 1991. № 1.
3. Николаенко Ю. И., Макаров В. В., Тарасов А. В. Разработка низконапорных гидроагрегатов для малых ГЭС // Тр. МНТК "Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития". СПб.: СПбГПУ, 2008.
4. Беляков Ю. П., Зырянов А. Г. Экономические предпосылки восстановления малых ГЭС в Киргизии // Гидротехническое строительство. 1991. № 1.
5. Справочник по гидротурбинам / Под ред. Н. Н. Ковалева. Л.: Машиностроение, 1984. 496 с.

Сравнение параметров волны прорыва, определенных различными методами

Каганов Г. М., доктор техн. наук, Волков В. И., Секисова И. А., кандидаты техн. наук
(Московский государственный университет природообустройства)

В настоящее время особенно актуальным является вопрос об обязательном введении паспортов безопасности для гидротехнических сооружений [1], ранее не попадавших под процедуру декларирования безопасности в соответствии с постановлением [2], в результате чего от внимания надзорных органов и руководителей муниципальных образований субъектов Российской Федерации оказался скрыт значительный массив информации о состоянии гидротехнических сооружений, потенциально способных спровоцировать наступление чрезвычайной ситуации. В большинстве случаев такими объектами являются многочисленные (порядка 30 – 40 тыс.) гидроузлы III и IV классов. Одной из главных задач, касающихся составления паспортов безопасности, является определение зоны возможной чрезвычайной ситуации (зоны затопления), ущербов от аварии и количества погибших и пострадавших.

Для определения зоны возможных затоплений и ущербов от наводнения, вызванного прорывом напорного фронта гидроузла, необходимо назначить сценарий аварии и провести ее моделирование. Моделирование прорывного паводка — сложная многофакторная задача. На ход аварии могут существенно повлиять вызвавшие ее первоначальные нарушения, особенности конструкции гидроузла, геологические условия района, метеорологические факторы, условия хозяйственного использования территории в нижнем бьефе и т.д.

Как правило, исследования хода прорывных паводков проводятся с использованием одномерных или двумерных уравнений Сен-Венана [3, 4], численно реализуемых при помощи конечно-разностных схем. Одной из наиболее известных в России явных конечно-разностных схем является схема, разработанная А. Н. Милитеевым [5]. Схема позволяет проводить расчеты в руслах произвольной формы, с практически произвольными внезапными изменениями формы русла, а также в первоначально сухих руслах. Методика прошла подробное тестирование путем сравнения результатов расчетов с большим количеством аналитических тестов [6 – 8]. Тестирование показало, что она позволяет рассчитывать потоки с гидравлическими прыжками, борами, критическими сечениями. Схему А. Н. Милитеева реализует программа “SV 1”, разработанная С. Я. Школьниковым, а также программы “Бор” и “River”, разработанные В. В. Беликовым.

Помимо разработок российских ученых существует ряд зарубежных методов определения параметров волны прорыва, основанных на аналогичных принципах проведения расчета, например программа “Mike 11”, разработанная в Дании.

Решение подобных задач реализуется с помощью ЭВМ, требует высокой квалификации инженера, производящего расчет, вложения значительных денежных средств и наличия достаточно хорошо оборудованной компьютерной лаборатории, в связи с чем проведение подобных расчетов, как правило, осуществляется для высоконапорных гидроузлов, попадающих под обязательную процедуру декларирования безопасности.

Кроме точных численных методов, реализуемых с помощью ЭВМ, существуют и другие методы расчета волны прорыва. Первой серьезной работой в данной области была графоаналитическая методика Б. Л. Историка, составленная на основе изучения волн прорыва с помощью гидравлических и математических моделей. Проведение широких численных экспериментов для схематизированных условий и для натуральных объектов позволило получить большой фактический материал, на основе которого, с привлечением методов теории размерности и подобия, были выявлены общие закономерности и некоторые особенности распространения волны прорыва в различных условиях. Все это послужило базой для разработки упрощенной графоаналитической методики, пригодной для сравнительно быстрой предварительной оценки параметров волны прорыва, а в некоторых менее ответственных случаях и для окончательного прогноза ее параметров.

Безусловно, являясь упрощенной, методика Б. Л. Историка имеет ряд ограничений. В частности, она не позволяет рассчитывать последствия аварий в случае каскадного разрушения гидроузлов, так как не рассчитана на случай отсутствия подпора в нижнем бьефе от нижерасположенной плотины. Однако эта методика отличается существенной простотой проведения расчета в отличие от математического моделирования, поэтому, возможно, применение методики Б. Л. Историка позволило бы определять степень опасности многочисленных низконапорных гидроузлов для территории нижнего бьефа и тем самым выделять объекты, которые подлежат дальнейшей паспортизации безопасности, и объекты, для которых проведение этой

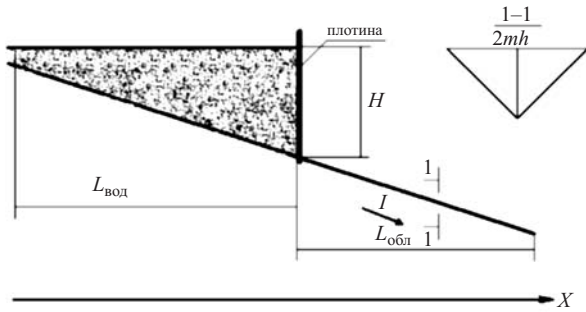


Рис. 1. Общий вид задачи расчета волны прорыва (неустановившегося течения воды) в призматическом русле треугольного поперечного сечения с постоянным уклоном дна:

H — глубина водохранилища до начала аварии; $L_{\text{вод}}$ — длина водохранилища; $L_{\text{обл}}$ — длина расчетной области (расстояние от створа плотины до расчетного створа); I — уклон; m — заложение откосов канала; h — высота канала; $2mh$ — ширина канала поверху

процедуры нецелесообразно. Применение подобной упрощенной методики, не требующей вложения значительных денежных средств, позволило бы значительно сэкономить деньги, выделяемые из госбюджета на обеспечение безопасности гидротехнических сооружений, и направить их на проведение ремонтных мероприятий.

В связи с вышеизложенным, представляет интерес сравнение результатов расчета параметров волны прорыва, полученных по различным методикам, с целью определения области применения упрощенной методики Б. Л. Историка и ее точности по сравнению с численными методами. Нами были проведены исследования, позволяющие сравнить результаты расчетов параметров волны прорыва, полученных с помощью различных методов.

По просьбе авторов статьи С. Я. Школьниковым была разработана специальная аналитическая тестовая задача для сравнения программы “SV 1” с методикой Б. Л. Историка (рис. 1), а также с упрощенной методикой Н. С. Юзбекова. Такая задача была реализована для случая призматического русла треугольного поперечного сечения без начального наполнения в нижнем бьефе. Задача решалась в безразмерных координатах, аналогичных принятым в методике Б. Л. Историка. В рамках решения этой

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	n	m
1	–	–
2	+	–
3	–	+
4	+	+

задачи была использована теория планирования эксперимента.

В соответствии с геометрией выбранной расчетной области имеем:

длину водохранилища

$$L_{\text{вод}} = H/I; \quad (1)$$

объем водохранилища

$$W = \int_0^L Imx^2 = Im \frac{L_{\text{вод}}^3}{3}; \quad (2)$$

высоту канала

$$h(x) = Ix; \quad (3)$$

площадь поперечного сечения канала

$$w(x) = Imx^2. \quad (4)$$

Для решения задачи использованы одномерные уравнения Сен-Венана:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gS - g\omega I + \frac{\lambda}{2} V^2 \chi &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где t — время; x — длина; ω — площадь поперечного сечения; V — средняя по сечению скорость течения; g — ускорение силы тяжести; λ — коэффициент гидравлического трения; $Q = \omega V$ — расход; S — статический момент сечения потока относительно свободной поверхности воды; χ — смоченный периметр.

Таблица 2

Основные параметры Верхнерузского гидроузла и гидроузла на руч. Вешенка у д. Колодкино

Параметры	Гидроузлы	
	на руч. Вешенка	Верхнерузский
Высота плотины, м	11,2	14,5
Объем водохранилища до начала аварии, млн. м ³	0,53	22
Длина водохранилища до начала аварии, км	1,2	14
Расход воды, поступающий в нижний бьеф до начала аварии, м ³ /с	5	13

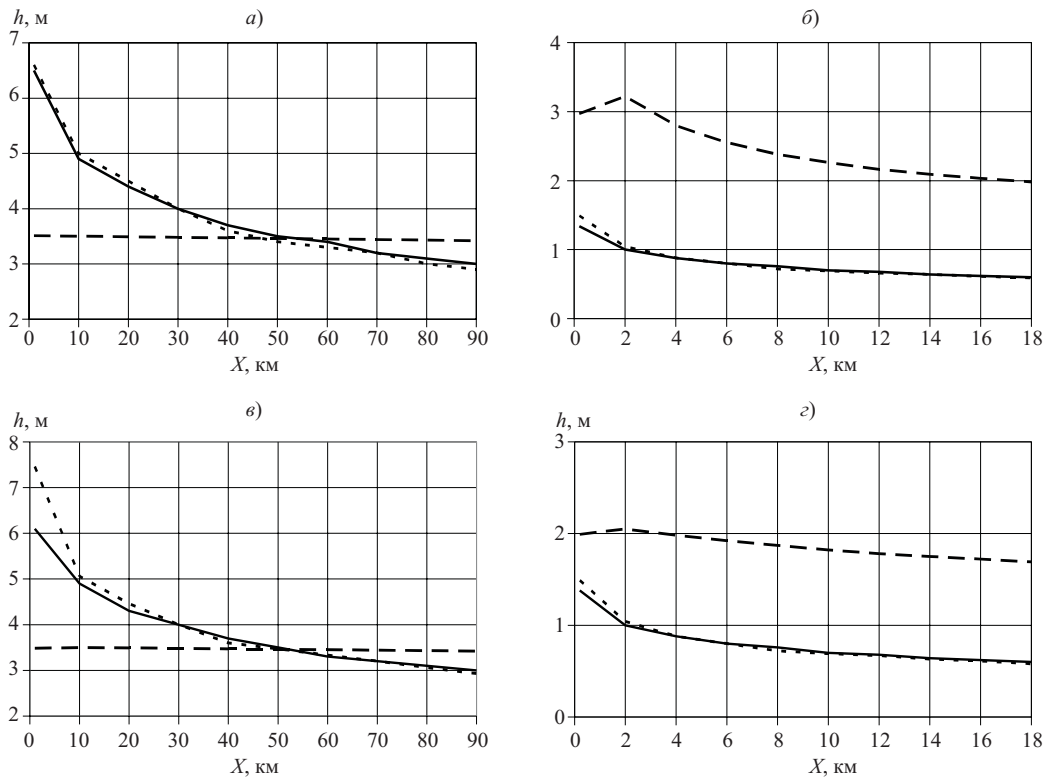


Рис. 2. Результаты сравнения расчетов глубины затопления в различных створах нижнего бьефа гидроузла в случае призматического русла треугольного поперечного сечения с постоянным уклоном дна:

a — первого; *б* — второго; *в* — третьего; *г* — четвертого расчетных случаев; — — результаты расчетов, полученные с помощью программы “SV 1”; - - - — результаты расчетов, полученные с помощью методики ВНИИ ГОЧС; — результаты расчетов, полученные с помощью графоаналитической методики Б. Л. Историка

Первое уравнение системы (5) выражает закон сохранения массы воды (несжимаемой), второе — второй закон Ньютона для руслового потока.

Произведены некоторые преобразования с помощью ввода следующих зависимостей:

$$\bar{t} = I\sqrt{gt}; \bar{x} = Ix; \bar{Q} = \frac{Q}{\sqrt{g}}; \bar{n} = \frac{n\sqrt{g}}{\sqrt{I}}.$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{Q}^2}{\partial x} + S - \omega + \frac{\bar{n}^2 \chi^{4/3} \bar{Q}^2}{\omega^{7/3}} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5a)$$

Теперь каждый член уравнения имеет размерность m^2 . Для того чтобы перейти к безразмерным величинам, выполнена следующая замена:

Таблица 3

Сравнение результатов расчета максимальных глубин затопления в створах нижнего бьефа для случая прорыва напорного фронта пруда, расположенного на руч. Вешенка

Расстояние, км	Глубина затопления, м		Δ, %
	методика Б. Л. Историка	программа “SV 1”	
1	4,8	4,74	1,3
2	4,4	4,60	4,3
3	4,3	4,45	3,4
4	3,7	2,47	33,2
5	3,7	2,42	34,6

Таблица 4

Сравнение результатов расчета максимальных глубин затопления в створах нижнего бьефа для случая прорыва напорного фронта Верхнерузского гидроузла

Расстояние, км	Глубина затопления, м		Δ, %
	методика Б. Л. Историка	программа “SV 1”	
5	6,6	7,69	14,2
10	6,0	6,39	6,1
20	5,3	5,11	3,6
30	4,8	3,16	34,2
40	4,5	2,43	46,0

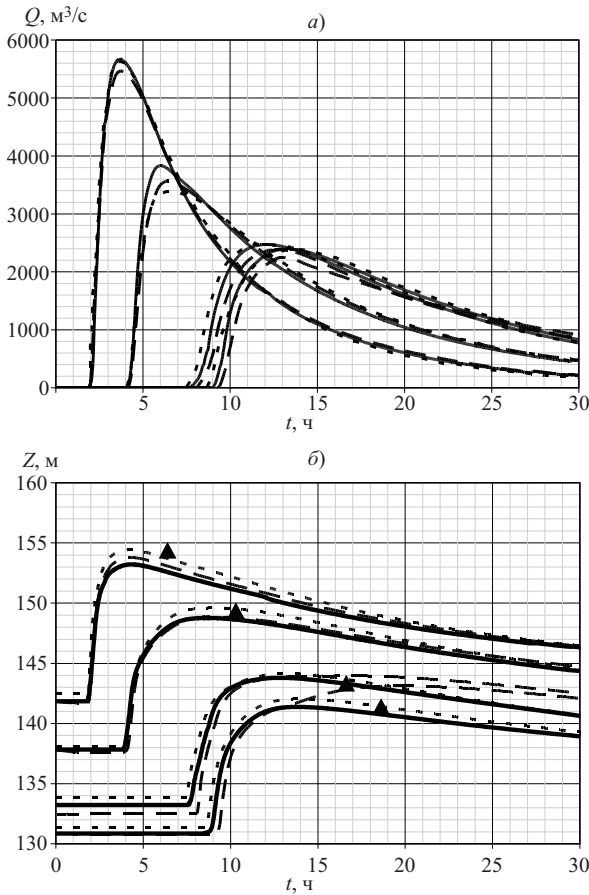


Рис. 3. Результаты сравнения расчетов параметров волны прорыва в случае аварии Истринского гидроузла в различных створах нижнего бьефа:

a — расходов; *б* — отметок затопления нижнего бьефа; ————— результаты расчетов, полученные с помощью программы “Mikell1”; - - - результаты расчетов, полученные с помощью программы “RIVER”; результаты расчетов, полученные с помощью программы “БОР”; ▲ — результаты расчетов, полученные с помощью графоаналитической методики Б. Л. Историка

$$\bar{t} = I \frac{\sqrt{gt}}{\sqrt{H}}; \bar{x} = \frac{Ix}{H}; \bar{Q} = \frac{\bar{Q}}{H^2 \sqrt{gH}}; \bar{n} = \frac{n\sqrt{g}}{H^{1/6} \sqrt{I}}.$$

Так как для треугольного русла справедливы зависимости: $\omega = mh^2$, $\chi = 2\sqrt{1+m^2}$, $S = m \frac{h^3}{3}$, то после подстановки их в формулу (5а) уравнения Сен-Венана имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \bar{t}} \frac{m\bar{h}^2}{\sqrt{H}} + \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \bar{x}} &= 0; \\ \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\frac{\bar{Q}^2}{m\bar{h}^2 H} + \frac{m\bar{h}^3}{3H} \right) - m\bar{h}^2 + \frac{\bar{n}^2 [2\sqrt{1+m^2} \bar{h}]^{4/3} \bar{Q}^2}{(m\bar{h}^2)^{7/3}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (56)$$

или

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial m\bar{h}^2}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \bar{x}} &= 0; \\ \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\frac{\bar{Q}^2}{m\bar{h}^2} + \frac{m\bar{h}^3}{3} \right) - m\bar{h}^2 + \frac{\bar{n}^2 [2\sqrt{1+m^2} \bar{h}]^{4/3} \bar{Q}^2}{(m\bar{h}^2)^{7/3}} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5в)$$

В качестве варьируемых параметров принимались следующие размерные величины:

- X_1 — уклон дна русла I 0,0001 – 0,0005
- X_2 — шероховатость русла n 0,02 – 0,06
- X_3 — глубина воды в водохранилище до начала аварии H 2 – 10 м
- X_4 — заложение откосов рассматриваемого канала m 1 – 5
- X_5 — расстояние от плотины до створа наблюдения x 0,2 – 90 км
- X_6 — объем воды в водохранилище до начала аварии W $2,7 \cdot 10^6$ – $1,7 \cdot 10^9$ м³
- X_7 — длина водохранилища $L_{\text{вод}}$ 2 – 10 км

В качестве выхода рассматривалась максимальная глубина затопления h_{max} .

Так как у нас задача с постоянным уклоном и поперечным сечением канала, это дает нам право выразить варьируемые параметры в некоторых зависимостях друг от друга. В результате преобразований получены два безразмерных варьируемых параметра, для которых составлена матрица эксперимента: \bar{n} = от 1,35 до 5,3 и m = от 1 до 5, где

$$\bar{n} = \frac{n\sqrt{g}}{H^{1/6} \sqrt{I}}. \quad (6)$$

Параметры варьировались на двух уровнях — минимальном (–) и максимальном (+). Количество опытов полного факторного эксперимента рассчитано по формуле $N = 2^k$, где N — количество опытов; 2 — количество уровней (в данном случае — верхний и нижний); k — количество факторов.

Так как два фактора и два уровня, то общее количество опытов четыре. Матрица планирования эксперимента приведена в табл. 1, а результаты расчетов показаны на рис. 2.

После проведения расчетов выяснилось, что методика Б. Л. Историка дает достаточно точные результаты: расхождение с программой С. Я. Школьниковой во всех четырех опытах составляет от 1,5 до 7 %; методика же ВНИИ ГОЧС недостаточно точна — расхождение до 70 %.

Выяснив таким образом, что одна из упрощенных методик, а именно методика Б. Л. Историка, дает достаточно близкие результаты с программой

“SV 1”, мы провели дальнейшее сравнение результатов расчета параметров волны прорыва, полученных различными методами для двух гидроузлов: Верхнерузского (III класса) на р. Рузе и гидроузла (IV класса) на руч. Вешенка у д. Колодкино Коломенского района Московской области. Основные параметры этих гидроузлов приведены в табл. 2.

В проведенных численных экспериментах с использованием программы “SV 1” расчеты волнового течения выполнялись в области, состоящей из водохранилища, прорана в теле плотины и участка нижнего бьефа. При моделировании нижнего бьефа учитывались препятствия на пути прорывной волны: небольшие плотины, автодорожные и железнодорожные мосты, перегораживающие русло, а также влияние притоков к основному руслу реки. Раскрытие прорана моделировалось при помощи полуэмпирической методики, разработанной А. М. Прудовским [9].

Для получения сопоставимых результатов расчеты с использованием графоаналитической методики Б. Л. Историка проводились по исходным данным, заложенным в программу “SV 1”.

Сравнение результатов расчета максимальных глубин затопления для Верхнерузского гидроузла было проведено в створах, удаленных на расстояние 5; 10; 20; 30 и 40 км от створа плотины; для гидроузла на руч. Вешенка у д. Колодкино — на расстояние 1; 2; 3; 4 и 5 км (табл. 3 – 4). В первых трех расчетных створах, расположенных в нижнем бьефе гидроузла на руч. Вешенка до его впадения в р. Коломенку, различие между значениями максимальных глубин затопления, найденными по различным методикам расчета, колеблется в пределах 8 %. В двух последующих створах значения глубин затопления, вычисленные по программе С. Я. Школьников, значительно меньше — на 40 %.

Это связано с тем, что программа “SV 1” в отличие от методики Б. Л. Историка учитывает потери напора на внезапное расширение русла, связанное с впадением руч. Вешенка в р. Коломенку.

Для трех первых расчетных створов Верхнерузского гидроузла максимальная отметка затопления, рассчитанная по программе С. Я. Школьников, несколько больше за счет влияния подпора, создаваемого насыпями двух мостов, перекинутых над руслом реки, и ошибка колеблется в пределах 14 %. Для двух последующих створов максимальная отметка затопления, рассчитанная по методике Б. Л. Историка, больше на 39 и 46 % соответственно.

Было принято решение провести дополнительный расчет для всех основных параметров волны прорыва, используемых при расчете ущерба вероятного вреда в случае гидродинамической аварии гидроузла, по большому количеству известных ме-

тодик расчета. Для этого по отечественной программе “БОР”, базирующейся на численном решении двумерных уравнений Сен-Венана, по отечественной программе “RIVER” на основе одномерных уравнений Сен-Венана, по зарубежной программе “Mike 11” на основе одномерных уравнений Сен-Венана с использованием неявной конечно-разностной схемы Эббота, по графоаналитической методике Б. Л. Историка были рассчитаны параметры волны прорыва в случае аварии Истринского гидроузла.

Истринский гидроузел расположен на р. Истре. Длина водохранилища около 25 км при ширине 0,5 – 1 км, глубина до 15 – 20 м, объем водохранилища (при НПУ = 168,63 м) 183 млн. м³, площадь зеркала 33,6 км². Ниже водохранилища река течет в южном направлении до г. Истры, затем в юго-восточном направлении и впадает в р. Москву на расстоянии 61,5 км от створа плотины гидроузла. В среднем течении у г. Истра ширина реки 25 – 30 м, глубина в межень 1 – 1,5 м, скорость течения 0,5 м/с, уклон 0,3 м на 1 км.

Долина р. Истры пересечена шестью крупными мостовыми переходами. При прохождении волны прорыва велика вероятность их разрушения, однако некоторые из них могут устоять либо сопротивляться разрушению длительное время. Точно рассчитать время и степень их разрушения не представляется возможным, поэтому был выбран следующий сценарий наиболее вероятной гидродинамической аварии — образование прорана в грунтовой плотине при УВБ = НПУ с разрушением всех мостовых переходов.

Сравнивались наиболее значимые параметры волны прорыва:

максимальный расход волны прорыва в выбранных контрольных створах нижнего бьефа;

максимальная глубина затопления;

время добегания фронта волны прорыва до контрольных створов;

время, за которое отметка затопления достигнет своего максимального значения в контрольных створах (время добегания пика волны).

Сравнение результатов расчета было проведено для четырех створов:

№ 1, расположенного на расстоянии 15 км от створа гидроузла в месте расположения железнодорожного моста в г. Истре, пересекающего долину р. Истры;

№ 2, расположенного на расстоянии 26,1 км от створа гидроузла в месте расположения автодорожного моста кольцевой автодороги (“бетонки”);

№ 3, расположенного на расстоянии 43,8 км в створе автодорожного моста у нас. пункта Павловская Слобода;

Таблица 5

Сравнение максимальных глубин затопления в расчетных створах (сравнение с программой “БОР”)

Номер створа	Глубины затопления, м						
	“БОР”	“RIVER”	Δ , %	“Mike 11”	Δ , %	методика Б. Л. Историка	Δ , %
1	14,66	11,94	18,54	11,38	22,34	12,52	14,59
2	11,48	11,022	4,04	10,95	4,68	11,52	0,30
3	11,61	11,527	0,71	11,36	2,16	10,89	6,20
4	11,10	12,27	9,55	10,53	5,16	10,52	5,21

№ 4, расположенного на расстоянии 54,6 км в месте пересечения долины р. Истры с Новорижским шоссе.

Изначально расчет параметров волны прорыва Истринского гидроузла был проведен В. В. Беликовым на основе численного решения двумерных уравнений Сен-Венана с использованием программы “БОР” на треугольно-четырёхугольных сетках нерегулярной структуры с учетом реальной топографии долины реки, полученной с карт М 1:10000 и М 1:200000 с применением ГИС-технологий. Расчет развития прорана в грунтовой плотине производился по методике А. М. Прудовского. Было проведено рекогносцировочное обследование мостовых переходов для определения их конструктивных параметров (высота насыпи, отверстие моста в свету, тип крепления конусов) с целью внесения этих параметров в математическую модель. По результатам компьютерного моделирования были получены характеристики затопления населенных пунктов, сельхозугодий и других объектов в нижнем бьефе гидроузла.

Для сравнения с выполненным расчетом по другим методикам исследования параметров прорывного паводка нами были использованы те же исход-

ные данные и граничные условия задачи. Результаты сравнения представлены в табл. 5 – 8, а также на рис. 3.

Анализ результатов показал, что модели, построенные с использованием одномерных уравнений Сен-Венана (программы “RIVER” и “Mike 11”), незначительно уступают по точности программе “БОР”, базирующейся на решении двумерных уравнений Сен-Венана. Ошибка колеблется в пределах от 0,71 до 22,3 % при определении максимальной глубины затопления; от 0,67 до 19,07 % при определении максимального расхода; от 0 до 14,29 % при определении времени добегания до расчетных створов; от 7,53 до 19,07 % при определении времени, за которое отметка затопления в расчетных створах достигает своего максимального значения. Причем максимальное расхождение в результатах отмечается в створах, расположенных ближе к створу плотины, а по мере удаления от него величина погрешности уменьшается. Это связано с тем, что двумерная модель лучше описывает сложные процессы, происходящие в зоне непосредственно около аварийного гидроузла, где поток, пройдя узкий проран, существенно расширяется, а также вблизи мостовых переходов; обычно при этом возникает зона, в которой течение бурное.

Программа “Mike 11” менее точна, чем программа “RIVER”, и дает чуть большее (на 2 – 3 %) искажение результатов.

Весьма близкие результаты были получены и с помощью методики Б. Л. Историка: при определении максимальной глубины затопления ошибка по сравнению с двумерной математической моделью колебалась в пределах от 0,3 до 14,6 %; при определении времени добегания до расчетных створов — от 2,9 до 15,7 %. В створе № 1, расположенном ближе остальных створов к створу плотины и находящемся непосредственно у первого мостового перехода, наблюдались наибольшие расхождения в результатах. В частности, при определении времени, за которое отметка затопления достигает своего

Таблица 6

Сравнение максимальных расходов в расчетных створах (сравнение с программой “БОР”)

Номер створа	Расходы, м ³ /с						
	“БОР”	“RIVER”	Δ , %	“Mike 11”	Δ , %	методика Б. Л. Историка	Δ , %
1	5624,16	5464,46	2,84	5662,30	0,67	13809,00	59,27
2	3390,44	3565,47	4,91	3832,20	11,53	12723,00	73,35
3	2481,05	2378,96	4,11	2468,90	0,49	11416,00	78,27
4	2386,14	2250,25	5,69	2394,73	0,36	10943,00	78,19

Сравнение времени добегания фронта волны до расчетных створов (сравнение с программой “БОР”)

Номер створа	Время добегания фронта волны до расчетных створов, ч						
	“БОР”	“RI-VER”	Δ , %	“Mike 11”	Δ , %	методика Б. Л. Историка	Δ , %
1	2,00	2,00	0,00	1,90	5,00	2,13	6,10
2	4,45	4,10	7,87	3,90	12,36	3,75	15,73
3	8,50	8,20	3,53	7,60	10,59	8,11	4,59
4	9,80	9,40	4,08	8,40	14,29	9,52	2,86

максимального значения, обнаруживалось расхождение до 27,3 %, в остальных же створах — от 4,2 до 10,3 %.

Результаты проведенного сравнения говорят о том, что для моделирования волн прорыва в протяженных (десятки и сотни километров) нижних бьефах средних и крупных гидроузлов возможно и достаточно эффективно применение одномерных численных моделей в приближении Сен-Венана, а в менее ответственных случаях — использование приближенных методик расчета. На тех участках (фрагментах) долины, где важна большая степень детализации — вблизи гидроузла, вблизи населенных пунктов с развитой инфраструктурой (мостовые переходы, застройка поймы) — желательны применение двумерных (в плане) численных моделей (построенных с применением крупномасштабных топографических карт), граничные условия для которых берутся из расчетов по одномерной модели. Такое многоуровневое (многомасштабное) моделирование может оказаться наиболее эффективным при решении всего спектра задач, связанных с прохождением волн прорыва.

Выводы

1. В настоящее время существуют различные схемы расчета параметров волны прорыва. Их определение, несмотря на возможность использования ЭВМ, является сложной задачей, требующей от инженера специальных знаний в области гидравлики, гидротехнического строительства и элементарных навыков программирования. Кроме того, имеющееся программное обеспечение является достаточно дорогостоящим, требующим больших затрат времени и материальных средств. Поэтому представляет интерес возможность использования некоторых упрощенных методик расчета.

2. Сравнение различных методов расчета параметров волны прорыва, прошедших широкую апро-

Сравнение времени наступления максимальной глубины затопления в расчетных створах (сравнение с программой “БОР”)

Номер створа	Время наступления максимальной глубины затопления в расчетных створах, ч						
	“БОР”	“RI-VER”	Δ , %	“Mike 11”	Δ , %	методика Б. Л. Историка	Δ , %
1	4,65	4,30	7,53	4,30	7,53	6,40	27,34
2	10,75	9,20	14,42	8,70	19,07	10,30	4,19
3	15,90	16,90	5,92	12,90	18,87	16,63	4,39
4	16,70	19,80	15,66	13,90	16,77	18,62	10,31

бацию применительно к ряду объектов РФ, показала приемлемую сходимость упрощенной методики Л. Б. Историка с более точными методами; расхождение составляет 7 – 20 %.

3. Методика Л. Б. Историка может быть рекомендована применительно к расчетам низконапорных гидроузлов IV класса для экспертных оценок, в том числе для выполнения соответствующих расчетов, входящих в состав “Декларации безопасности гидротехнических сооружений”.

Список литературы

1. *Сосунов И. В.* О паспортах безопасности гидротехнических сооружений как опасных объектов // Энергоназор и Энергобезопасность. 2007. № 4.
2. *Постановление* правительства РФ от 6 ноября 1998 г. № 1303 “Об утверждении Положения о декларировании безопасности гидротехнических сооружений”.
3. *Историк Б. Л.* Решение задач о формировании и распространении волн прорыва с использованием численных методов: Диссертация доктора техн. наук. ВНИИВОДГЕО, 1986.
4. *Милитеев А. Н.* Решение задач гидравлики мелких водоемов и бьефов гидроузлов с применением численных методов: Диссертация доктора техн. наук. МИСИ, 1983.
5. *Милитеев А. Н., Сладкевич М. С.* Разностная схема для решений плановых уравнений мелкой воды / Деп. в ВИНТИ. 1983.
6. *Школьников С. Я.* К вопросу о конструировании консервативных конечно-разностных схем для дифференциальных уравнений неустановившегося течения в непрямом русле // Гидротехническое строительство. 1998. № 5.
7. *Школьников С. Я., Юзбеков Н. С.* Трансформация прорывной волны на суходоле // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях: Обзорная информация ВИНТИ. 1999. Вып. 6.
8. *Школьников С. Я., Юзбеков Н. С.* О поведении прорывной волны на суходоле вблизи места излива // Безопасность энергетических сооружений / НИИЭС. 2000. Вып. 5.
9. *Прудовский А. М.* Образование прорана при прорыве земляной плотины // Безопасность энергетических сооружений / НИИЭС. 1998. Вып. 2 – 3.

Модели прогнозирования транспорта наносов водными потоками на урбанизированных территориях в зимний период*

Грицук И. И., кандидат техн. наук,

Дебольский В. К., доктор техн. наук,

Исаенков А. Ю., инженер (Институт водных проблем РАН),

Пономарев Н. К., кандидат техн. наук (Российский университет дружбы народов)

Основная концепция разработки моделей для расчета и прогнозирования транспорта наносов водными потоками на урбанизированных территориях заключается в следующем. На основе краткосрочных прогнозов метеорологической обстановки в регионе определяются осадки и температура воздуха. По этим данным рассчитывается сток воды и наносов с территории с помощью моделей, описывающих их формирование. Эти модели [1] включают зависимости, по которым вычисляется слой стока воды по модели «кинематической волны». Далее используется модель, описывающая транспорт наносов, если ставится задача об определении динамики русла городской реки, или модель переноса наносов, если рассматривается транспортирующая способность потока в коллекторе водостока. В последнем случае в качестве начальных условий для наносов принимается количество песчано-гравийной смеси, смываемой с городских дорожных покрытий.

Итак, для определения стока воды, формирующегося на водосборе, можно использовать модели, предложенные в [2].

Модель транспорта наносов в городской реке обычно состоит из уравнения баланса наносов:

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 06-05-65186).

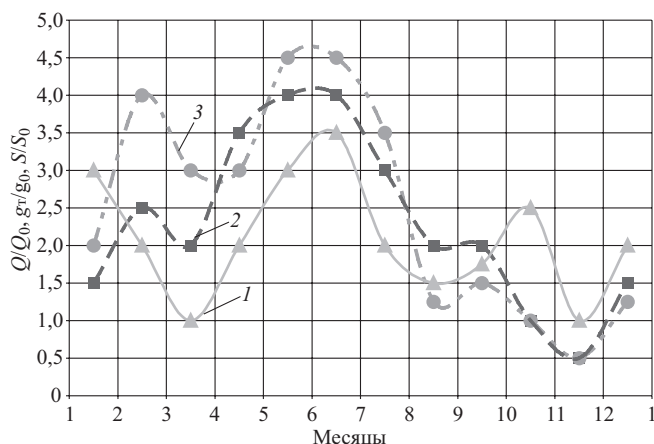


Рис. 1. Характерные изменения расходов воды Q (1), донных $g_{т}$ (2) и взвешенных S (3) наносов в водостоке по месяцам

$$\frac{\partial g_{тв}}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где $g_{тв}$ — расход наносов; ω — площадь живого сечения, или некоторое соотношение, принимаемое для определения расхода наносов [3].

В работе [3] приводится сравнение рассчитанных по формулам значений расхода наносов с данными натурных измерений. Однако эти измерения касаются только придонной области течения, а транспорт тонкодисперсной примеси транзитом не наблюдается. Применительно к рассматриваемым условиям формирования транспорта наносов эти соотношения можно использовать для оценки расхода наносов, переносимых водным потоком только из донных отложений. В то же время, как показано на рис. 1, сток воды и поступление с ним в водотоки наносов не всегда совпадают по объемам во времени. Это создает различные условия переноса водным потоком наносов. Действительно, возможен случай транспорта наносов только в придонной области, однако возможен и случай поступления в водоток только тонкодисперсной примеси. Здесь необходимо использовать методы расчета транспорта взвешенных в водном потоке наносов.

На рис. 1 представлены изменения расхода воды, удельного расхода наносов и средней концентрации взвешенных наносов по месяцам для одного из коллекторов водостока. За начальные значе-

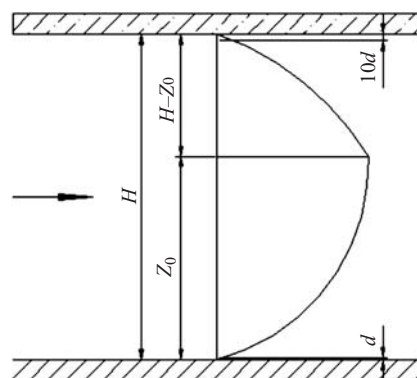


Рис. 2. Распределение скоростей течения в подледном потоке

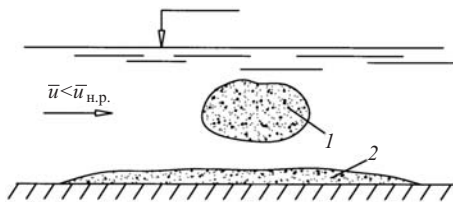


Рис. 3. Перенос мелкодисперсной взвеси (1) над неразмываемым или слабо размываемым дном (2)

ния Q_0 и S_0 приняты измеренные в октябре минимальные значения расходов воды и концентрации взвешенных наносов соответственно. Остальные величины определялись по результатам расчетов.

На графике рис. 1 видно, что имеет место разделение условий формирования транспорта наносов по подпериодам зимнего сезона. При этом транспорт преимущественно во взвеси характерен для февраля, движение наносов в грядовом режиме имеет место в апреле, сплошное влечение наносов в виде монослоя отмечается в сентябре, дефицитные донные формы образуются в октябре — ноябре, а перенос наносов в форме гряд, сплошного влечения монослоем уже по грядам и во взвешенном состоянии происходит в декабре и марте. В этом состоит главная особенность транспорта наносов водными потоками на урбанизированных территориях.

Наибольшее количество наносов поступает в водотоки при больших объемах водного стока (рис. 1). В этом случае наносы переносятся на всех горизонтах глубины потока, причем одна часть наносов — транзит, вторая — донные наносы, а третья участвует в формировании как донных, так и взвешенных наносов.

Важно отметить, что в зимних условиях объем стока воды определяется по данным о выпадении твердых осадков (снега). При этом необходимо учитывать, что после обильного снегопада большая часть твердых осадков убирается с дорог, тротуаров, территорий дворов, промышленных зон и поступает на снегоплавильные установки, на которых после растапливания снега осуществляется механическая очистка стока от твердых примесей, прежде всего мусора. Однако часть примесей, в основном тонко дисперсных, все же поступает после этого либо в водостоки, либо непосредственно в городские реки. В связи с этим возникает необходимость в корректировке обычно принимаемых значений кинематической вязкости и плотности воды как за счет температуры воды, близкой к нулю или к температуре наибольшей плотности, так и за счет наличия в водном потоке тонкодисперсной примеси.

Существующие в настоящее время различные предложения для расчета транспорта наносов во-

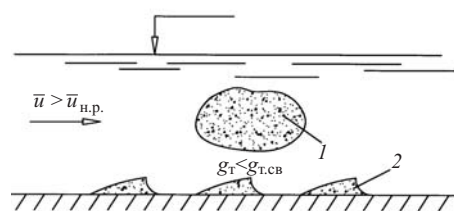


Рис. 4. Перенос наносов во взвешенном состоянии (1) и в придонной области (2) при дефиците поступающих наносов

данными потоками на урбанизированных территориях основываются либо на моделях, описывающих транспорт взвешенных наносов, либо на моделях, используемых для определения расхода наносов, перемещающихся в придонной области потока. Причем объединяющее эти концепции положение состоит в задаче пропуска воды и наносов через городские водотоки, а также в оценке, возникающих при этом загрязнений в условиях сформировавшегося максимального водного стока за счет катастрофических ливней.

Особенности транспорта наносов водными потоками в зимний период определяются прежде всего низкой температурой воды, наличием снежур или ледовой шуги в потоке и возможностью формирования полунапорного или даже напорного потока в случае сформированного устойчивого ледяного покрова.

Для температуры воды, близкой к 0°C , можно принимать коэффициент кинематической вязкости равным $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Рассматривая соотношение [4] для определения гидравлической крупности частиц наносов при ламинарном режиме их осаждения, можно видеть, что гидравлическая крупность частиц наносов при температуре воды, близкой к 0°C , уменьшается значительно:

$$w = \left(\frac{\rho_n - \rho_v}{\rho_v} \right) g d^2 (24\nu)^{-1}, \quad (2)$$

где ρ_v и ρ_n соответственно плотность воды и наносов; d — размер частиц наносов; g — ускорение свободного падения.

Рассматривая наличие в потоке снежур, следует также ввести поправку на принимаемые в этом случае значения гидравлической крупности частиц наносов.

Соотношения, предложенные в [5] для определения гидравлической крупности частиц наносов при групповом их осаждении, можно записать в общем виде

$$\omega = \omega_0 (1 - S)^{\varphi}, \quad (3)$$

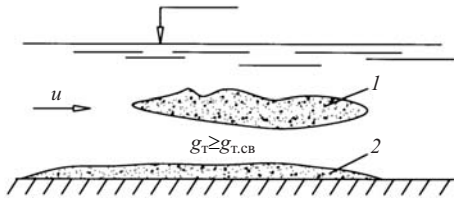


Рис. 5. Перенос наносов во взвешенном состоянии (1) и в придонной области (2)

где ω_0 — гидравлическая крупность одиночной частицы; φ — объемная концентрация частиц наносов в потоке.

Показатель степени φ в этой формуле зависит от числа Рейнольдса для частицы наносов $Re = wd/\nu$, а для снежуры это число Рейнольдса существенно меньше 1 и поэтому в соответствии с рекомендациями [5] показатель степени в формуле (3) следует принимать равным 9. Необходимо отметить, что наибольшую концентрацию снежуры S можно принимать равной 0,6 при среднем значении 0,2. В этом случае гидравлическая крупность частиц уменьшается еще больше.

Коэффициент кинематической вязкости также зависит от наличия в потоке снежуры. Эту зависимость от концентрации снежуры можно представить в виде

$$v_{сн} = \frac{\nu \rho_B}{\rho_0} e^{-5S}, \quad (4)$$

где ρ_0 — относительная плотность водного потока, транспортирующего наносы:

$$\rho_0 = (\rho_H - \rho_B) / \rho_B. \quad (5)$$

Плотность воды незначительно изменяется с приближением температуры воды к 0 °С и существенно изменяется при поступлении в воду снега и формировании ледовой шуги. Для определения плотности воды в этом случае можно воспользоваться соотношением, предложенным [5] для изменения плотности воды при переносе потоком значительного количества мелкодисперсной взвеси:

$$\rho = \rho_B + (\rho_H - \rho_B) S^\alpha. \quad (6)$$

Показатель степени α в формуле (6) можно принимать, исходя из данных выполненных натурных наблюдений, равным 3/2.

Следующей важной особенностью транспорта наносов в зимний период является формирование полунапорного и напорного потоков. Полунапорный водный поток формируется в условиях, когда устанавливается устойчивый ледяной покров, воз-

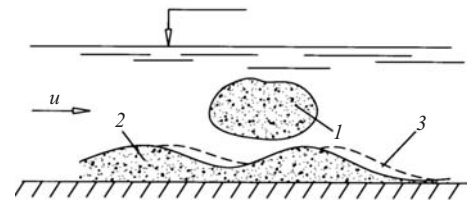


Рис. 6. Перенос наносов во взвешенном состоянии (1), размыва дна (2) и грядового движения (3)

можно и небольшой толщины, не скрепленный ни с берегами водотока, ни со стенками или опорами гидротехнических сооружений или мостов. В этом случае существенно трансформируется распределение скоростей течения по глубине потока по сравнению с открытым потоком. В связи с этим изменяется и коэффициент вертикального обмена (турбулентной диффузии), который и определяет перенос наносов водным потоком.

Распределение скоростей потока по его глубине при наличии плавающего ледяного покрова (рис. 2) определяется по формулам:

$$u = (1 + \alpha) \bar{u} \left(\frac{z + d}{z_0} \right)^\alpha \quad (\text{от } z = 0 \text{ до } z = z_0); \quad (7)$$

$$u = (1 + \alpha_1) \bar{u} \left(\frac{hz + 10d}{hz_0} \right)^{\alpha_1} \quad (\text{от } z = z_0 \text{ до } z = h), \quad (8)$$

где \bar{u} — средняя скорость потока; z — вертикальные координаты; d — размер частиц донных наносов; h — глубина потока; z_0 — горизонт максимума скоростей течения;

$$\alpha = \frac{1}{5} \left[\left(\frac{\rho_H - \rho_B}{\rho_B} \right)^{1/3} \frac{d}{h} \frac{\bar{u}}{(gv)^{1/3}} \right]^{0,06}; \quad (9)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{7} \left[\left(\frac{\rho_H - \rho_B}{\rho_B} \right)^{1/3} \frac{10d}{h} \frac{\bar{u}}{(gv)^{1/3}} \right]^{0,06}. \quad (10)$$

Горизонт, где устанавливается максимум скорости течения, определяется из условия равенства максимальных значений скорости течения, рассчитанных по формулам в [5].

Напорный поток формируется, когда имеет место существенное сцепление ледяного покрова с берегами водотока, со стенками гидротехнического сооружения или опорами моста. В этом случае распределение скоростей течения по глубине потока

можно рассчитывать по тем же формулам (8) и (9), но в формуле (9) границу скорости у ледового покрова следует принимать равной

$$u_{\text{л}} = (1 + \alpha_1) \left(\frac{30d}{h - z_0} \right). \quad (11)$$

В отношении формирования транспорта наносов водным потоком в зимний период на урбанизированных территориях необходимо учитывать следующие обстоятельства. В соответствии с гидрографом стока, формирующегося за счет осадков в виде дождя, снега и снега с дождем, выделяют четыре формы транспорта наносов: в виде сплошного слоя, в виде гряд, в виде мелкодисперсной взвеси, перемещаемой транзитом, и в виде дефицитных гряд или рифелей. Методы расчета этих форм транспорта наносов необходимо корректировать на зимние условия. Это означает, что значения различных характеристик течения изменяются в зависимости от температуры воды, наличия в водотоке снежур и шуги, наличия плавающего или закрепленного по боковым границам ледяного покрова.

В связи с неравномерностью по времени, количеству и составу поступающих с урбанизированных территорий в водотоки наносов транспорт наносов осуществляется в различных формах, которые зависят от определенных периодов поступления в поток наносов. Первый период характеризуется поступлением в водоток мелкодисперсной взвеси, которая транспортируется над неразмываемым или слабонеразмываемым дном (рис. 3). Второй период определяется поступлением в водоток наносов, состав которых соответствует перемещению их в придонной области. Если в этот период количество поступивших в водоток наносов недостаточно для транспортирования их монослоем, а скорости потока достаточны для перемещения наносов, то последние движутся в виде дефицитных донных форм. При этом мелкодисперсная взвесь транспортируется транзитом (рис. 3). В течение третьего периода наносы в придонной области транспортируются сплошным слоем, толщина которого определяется количеством поступающих наносов, их составом и скоростью течения (рис. 4). Далее при поступлении в поток большого количества наносов они движутся уже в виде донных форм (рис. 5). Все рассмотренные периоды могут быть реализованы и в случае открытого потока, и в случае потока, покрытого льдом как не закрепленным, так и закрепленным по боковым границам.

Важно отметить, что, когда осадки отсутствуют в зимний период, дно водотока может быть сковано ледяным покровом и тогда начальный период

транспорта наносов осуществляется как раз над неразмываемым дном.

В осенне-зимний и зимне-весенний периоды после прекращения выпадения осадков возможна активная аккумуляция наносов в водотоке. В связи с этим при последующем выпадении осадков транспорт наносов водотоком осуществляется и за счет размыва донных отложений, и за счет транспорта транзитных и руслоформирующих наносов во взвешенном состоянии.

Таким образом, рассмотренные закономерности формирования транспорта наносов водными потоками в зимний период предполагают разработку нескольких моделей транспорта наносов, каждая из которых отвечает определенному периоду поступления наносов в водоток (рис. 6). В первый период перенос взвеси хорошо описывается упрощенным уравнением диффузии примеси, решение которого в одномерной постановке представляет собой распределение концентрации взвеси по глубине в виде

$$S = S_{\partial} \exp\left(\frac{-w(z - \alpha)}{\varepsilon}\right) \quad (12)$$

при $S_{\partial} = S_{\partial}|_{z=a}$, где w — гидравлическая крупность частиц наносов; ε — коэффициент турбулентного обмена частиц наносов.

Адекватность этого соотношения натурным условиям была подтверждена данными натурных исследований на р. Истре [6]. Изменение коэффициента обмена в формуле (12) по глубине можно аппроксимировать следующим приближением:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \left(\frac{z}{h} - 1 \right)^2, \quad (13)$$

где ε_{\max} — максимальное значение коэффициента турбулентного обмена частиц наносов; h — глубина потока.

Здесь максимальное значение коэффициента обмена следует определять из условия формирования собственно водного потока в зимних условиях (наличие снежур и т.п.). Тем не менее по данным исследований на р. Оредеж [7] для условий зимы вполне можно принять

$$\varepsilon_{\max} = 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (14)$$

Интегрирование уравнения (12) по глубине потока с учетом формулы (13) приводит к выражению, позволяющему определить среднюю концентрацию взвеси [8]:

$$S = \frac{S_{\partial}}{h} (h-a) \left[\frac{2\varepsilon_{\max}(h-a) + wh^2}{2\varepsilon_{\max}(h-a)} \right] \times \exp\left(-\frac{wh^2}{\varepsilon_{\max}(h-a)}\right) \quad (15)$$

$$k_c = 0,2 \ln \frac{S_d}{g_{\min}} \quad (21)$$

$$g_{\min} = 0,1_{wd}, \quad (22)$$

В этих соотношениях остается неясным определение придонной концентрации взвеси, величина которой зависит от того, в какой из вышеперечисленных периодов формируется водный поток, транспортирующий взвесь. Так, если рассматривается второй период, то придонную концентрацию взвеси можно определять по известному соотношению известного вида с подстановкой соответствующей толщины слоя переноса наносов, скорости переноса и гидравлической крупности наносов:

$$S_{\partial} = \frac{g_H}{\rho_B q}, \quad (16)$$

где

$$g_H = k(\rho_H - \rho_B)(u_d - u_{d,кр})\Delta, \quad (17)$$

где k — коэффициент сплошности наносов, перемещаемых в слое Δ ; ρ_H и ρ_B — плотность наносов и воды соответственно; u_d и $u_{d,кр}$ — донная и донная критическая скорости соответственно; q — удельный расход воды; Δ — толщина слоя наносов.

$$u_{d,кр} = \frac{w}{2C_x}, \quad (18)$$

где $u_{d,кр}$ — придонная (на уровне размера частиц наносов) скорость потока, при которой обеспечивается перемещение частиц наносов с 33 %-ной вероятностью; w — гидравлическая крупность частиц наносов размером 67 %-ной обеспеченности в гранулометрическом составе материала дна; C_x — коэффициент сопротивления частиц наносов сдвигу.

Обобщение экспериментальных данных, представленных в [9], дает возможность предложить соотношение для коэффициента сплошности в виде

$$k = 0,876 \ln \left(\frac{u_d}{u_{d,кр}} \right). \quad (19)$$

В отношении дефицитных форм объем транспортируемых ими наносов может быть определен по предложенным ранее соотношениям, но с учетом зимних условий, т.е. в виде

$$g_T = 0,5h_{гр}V_{гр}k_c; \quad (20)$$

где S_d — определяется по формуле (16); $h_{гр}$ и $V_{гр}$ — высота и скорость перемещения гряд, определяются по формулам для условий сплошности грядового движения наносов.

В третий период используются уравнения [5], описывающие сальтирующее движение наносов с поправкой на зимние условия формирования водного потока:

$$g_T = 0,2\rho_H u_d (\varphi_0 - \varphi_{ов})d, \quad (23)$$

где

$$\varphi_0 = \frac{1}{\delta_H \sqrt{2\pi}} \int_{u_0}^{\infty} \exp\left[-\frac{(u - u_{д,кр})^2}{2\sigma_u^2}\right] du; \quad (24)$$

$$\varphi_{ов} = \frac{1}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} \int_{w'}^{\infty} \exp\left[-\frac{(W - w)^2}{2\sigma_w^2}\right] dw, \quad (25)$$

где σ_w — стандарт вертикальной составляющей пульсаций придонной скорости течения W [5].

Теперь при транспорте наносов в виде гряд необходимо определить собственно наличие грядовой формы транспорта наносов, т.е. вычислить значение критерия [5]:

$$30 < \bar{u}^2 d^{1/2} g^{-1/3} \nu^{-1/3} w^{-1} < 230, \quad (26)$$

и затем уже определить расход наносов, используя значения высот гряд и скоростей их перемещения:

$$g_T = 0,5h_{гр}V_{гр}, \quad (27)$$

где

$$h_{гр} = h_{гр}(w, d, u, h, \rho_H, \rho_B); \quad (28)$$

$$V_{гр} = V_{гр}(h_{гр}). \quad (29)$$

Здесь также вводятся поправки прежде всего на гидравлическую крупность в соответствии с формулами (11), (12) и (14).

Выводы

Основные закономерности транспорта наносов на урбанизированных территориях в зимних усло-

виях сводятся, во-первых, к различным периодам формирования водного потока, транспортирующего наносы. От периода зависят как характеристики собственно водного потока, так и параметры, определяющие «поведение» наносов в водном потоке. Во-вторых, — к возможности формирования потока, покрытого льдом в различном состоянии: лед плавает на водной поверхности, лед прикреплен к берегам, но может перейти в состояние плавучести, лед разрушается и формируется ледовый затор (не рассматривается в силу чрезвычайно малой статистической обеспеченности данного события), лед жестко закреплен по берегам.

Список литературы

1. Кучмент Л. С., Демидов В. Н., Мотовилов Ю. Г. Формирование речного стока. Физико-математические модели. М.: Наука, 1983. С. 173 – 165.
2. Кучмент Л. С. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). М.: ИВП РАН, 2008.
3. Bayram A., Larsen M., Miller H. C., Kraus N. C. Cross-shore distribution of longshore sediment transport: comparison between predictive formulas and field measurements // Coastal Engineering, 44, 2001.
4. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Л: Гидрометеиздат, 1962.
5. Дебольский В. К., Зайдлер Р., Массель С. Динамика русловых потоков и литодинамика прибрежной зоны моря. М.: Наука, 1994.
6. Котляков А. В., Грицук И. И., Дербенев М. В., Пономарев Н. К., Артемьев С. А., Авсянников М. Н., Лафи И. В. Натурные исследования динамики речного потока в нижнем бьефе гидроузла // Водные ресурсы. 2007. № 4. Т. 34. С. 432 – 438.
7. Котляков А. В., Мордасов М. А., Исаев Д. И., Иванов В. А., Грицук И. И., Шилов Д. В. Натурные исследования частично покрытого льдом потока в нижнем бьефе гидроузла во время прохождения волн попусков // Водные ресурсы. 2007. № 5. Т. 34. С. 554 – 559.
8. Antsyferov S. M., Akivis T. M., Deboksky V. K. Suspended sediment transport in open steady flow // Oceanology and sea technology. 1 (1) 2006.
9. Железняков Г. В., Дебольский В. К. О зависимости расхода наносов от критерия их подвижности // Тр. МИИТ. 1968. Вып. 288.

ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ

на журнал «Гидротехническое строительство»

Ежемесячный научно-технический журнал «Гидротехническое строительство» освещает отечественную и зарубежную практику по эксплуатации, проектированию и строительству гидротехнических сооружений, вопросы охраны окружающей среды, экологии, крупные водохозяйственные проблемы.

Целью издания журнала является также научно-техническое, методическое и информационно-справочное обеспечение организаций и специалистов, деятельность которых связана с проектированием, строительством, эксплуатацией, научным обслуживанием и надзором за безопасностью гидротехнических сооружений.

Журнал регулярно переводится на английский язык и распространяется по ведущим библиотекам мира.

В России подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи.

Условия подписки можно найти в Объединенном каталоге

«Пресса России. Подписка-2010»

(Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы)

70224 — индекс журнала «ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»

Динамический подход к анализу неравномерного установившегося движения в широких призматических руслах

Брянская Ю. В., кандидат техн. наук
(Московский государственный строительный университет)

К анализу закономерностей неравномерного движения обычно применяют подход, основанный на дифференциальном уравнении сохранения энергии [1], аналитическое интегрирование которого для практически важных случаев вызывает затруднения и должно выполняться численно. Примером такого подхода является решение Б. А. Бахметева [2], которое опирается на ряд допущений, содержащих определенные неточности: постоянство гидравлического показателя русла на участке неравномерного движения, который в действительности изменяется вследствие изменения относительной ширины русла B/h [3]; определение гидравлического уклона с использованием формулы Шези, применимой только для равномерного движения, а также тех или иных формул для вычисления коэффициента Шези, полученных для условий равномерного движения. Дополнительные неточности решения связаны с предположением постоянства на участке интегрирования комплекса $\frac{\alpha C^2 i B}{g \chi}$ (где α — коэффициент Кориолиса; C — коэффициент Шези, B , χ — ширина и смоченный периметр русла). Следует заметить, что энергетическое уравнение сводится к балансу уклонов, которые для равнинных водотоков являются весьма малыми, порядка $10^{-4} - 10^{-5}$, что требует высокой точности решения уравнения, чему не отвечает процедура, предложенная Б. А. Бахметевым. Указанные неточности могут привести к существенным ошибкам при прогнозировании зон затопления, в особенности на равнинных территориях. Эти обстоятельства сохраняют актуальными вопросы гидравлики неравномерных плавноизменяющихся открытых потоков.

Рассмотрим возможности использования динамического подхода при анализе неравномерного плавноизменяющегося движения в открытом широком призматическом русле.

На рис. 1 показано изменение количества движения в выделенном объеме между сечениями $1 - 2$ под действием приложенных к нему сил в проекции на направление движения. Расстояние между сечениями $1 - 2$ принимается равным dx .

За время dt масса жидкости переместится и займет положение между сечениями $1' - 2'$. Выделяя в зоне движения три области, количество движения в начальный момент можно условно записать в виде

$$(mu)_t = KD(a)_t + KD(b)_t. \quad (1)$$

В момент времени $t + dt$

$$(mu)_{t+dt} = KD(b)_{t+dt} + KD(c)_{t+dt}. \quad (2)$$

При этом изменение количества движения выразится как

$$\Delta(mu) = KD(c) - KD(a), \quad (3)$$

поскольку в отсеке b за время dt изменений не происходит, то есть $KD(b)_{t+dt} = KD(b)_t$.

Так как движение установившееся, то очевидно, что количество движения в отсеках a и c не будет зависеть от времени t , поэтому индексы в выражении (3) исключены.

Выражая количество движения в отсеке c как

$$KD(c) = \rho dW \cdot V_2, \quad (4)$$

где $dW = V_2 \cdot dt \cdot h_2$ — объем жидкости в отсеке c , запишем

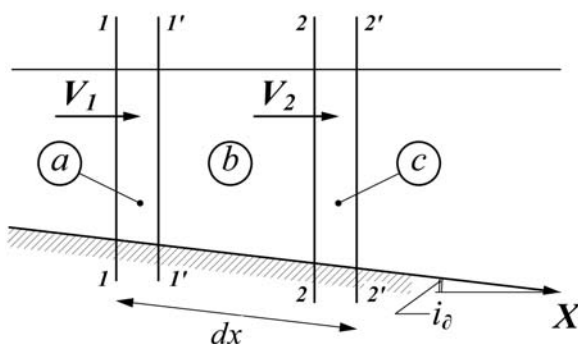


Рис. 1. Расчетная схема изменения количества движения в объеме жидкости при неравномерном движении

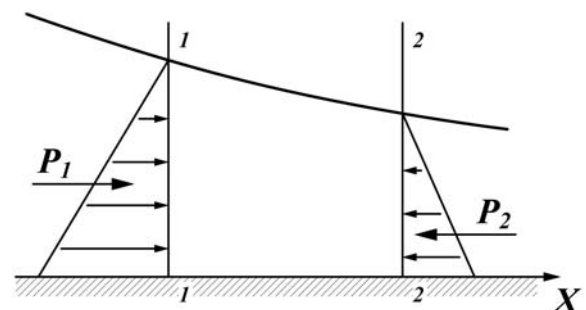


Рис. 2. Схема ускоренного течения вдоль оси x

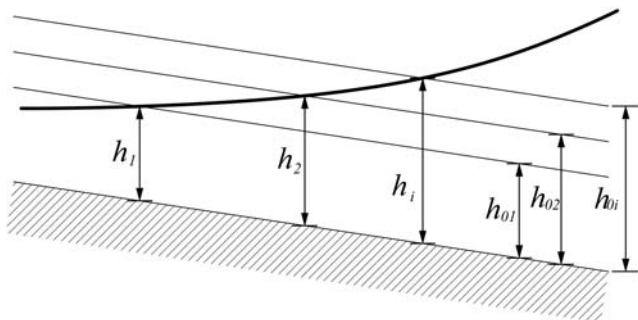


Рис. 3. Условие сопоставления касательных напряжений при неравномерном и равномерном движении

$$КД(c) = \rho h_2 V_2^2 dt. \quad (5)$$

Для учета неравномерности распределения скоростей по глубине потока в выражение (5) необходимо ввести корректив количества движения β — коэффициент Буссинеска. Тогда

$$КД(c) = \beta_2 \rho h_2 V_2^2 dt. \quad (6)$$

Учитывая, что $V_2 h_2 = q$ — удельный расход, выражение (6) можно записать в виде

$$КД(c) = \beta_2 \rho q V_2 dt. \quad (7)$$

Аналогично можно выразить количество движения в отсеке a

$$КД(a) = \beta_1 \rho q V_1 dt. \quad (8)$$

Если закон распределения скоростей по глубине потока одинаковый для сечений 1 и 2, то при слабоизменяющейся величине $\beta = \beta_1 = \beta_2$ изменение количества движения окажется равным

$$\Delta(mu) = \rho \beta q dt (V_2 - V_1). \quad (9)$$

Для определения сил, действующих на массу жидкости между сечениями 1–2, необходимо определить продольный размер отсека, который примем равным dx (поперечный размер принимается равным 1 м).

Вес отсека

$$G = \frac{1}{2} \rho g (h_1 + h_2) dx.$$

При $h_1 = +h$ $h_2 = h_1 + \frac{dh}{dx} dx = h + dh$, тогда выражение для G запишется в виде

$$G = \rho g h dx + \frac{1}{2} \rho g \frac{dh}{dx} dx \cdot dx. \quad (10)$$

Очевидно, что второе слагаемое $\frac{1}{2} \rho g \cdot dh \cdot dx$ является величиной высшего порядка малости и может быть опущено. При этом проекция силы G на ось x окажется равной

$$F_G = \rho g h i_\theta dx, \quad (11)$$

где уклон дна $i_\theta = \sin \theta$.

При плавноизменяющемся движении распределение давления в потоке считается гидростатическим. Тогда силу давления, действующую на отсек слева (при $h_1 = h$) запишем как

$$P_1 = \frac{1}{2} \rho g h^2, \quad (12)$$

а силу давления справа

$$P_2 = \frac{1}{2} \rho g \left(h + \frac{dh}{dx} dx \right)^2. \quad (13)$$

Так как при раскрытии скобок выражения (13) третье слагаемое оказывается малым и силы P_1 и P_2 направлены в противоположные стороны, тогда сумма их проекций на ось x окажется равной

$$F_p = P_1 - P_2 = -\rho g h \frac{dh}{dx} dx. \quad (14)$$

Кроме этих сил по нижней границе потока будет действовать сила трения, проекцию которой на ось x запишем в виде

$$F_T = -\tau_{0н} \cdot dx, \quad (15)$$

где $\tau_{0н}$ — напряжение трения по дну при неравномерном движении.

Заметим, что изменение силы трения вдоль оси x в пределах dx дает величину высшего порядка малости, которая может не учитываться.

$$F_T = -\tau_{0н} dx + \frac{1}{2} \frac{d\tau_{0н}}{dx} \cdot dx \cdot dx,$$

где $\tau_{0н}$ — напряжение трения по дну в сечении 1.

Рассмотрим вопрос о том, возникает ли в этом случае сила инерции. На первый взгляд кажется, что не возникает, поскольку движение установившееся, но при этом не следует забывать, что при нахождении силы инерции, действующей в жидкости,

необходимо учитывать полное ускорение, а не только его локальную составляющую, которая в данном случае, действительно, равна нулю. Конвекционная составляющая ускорения вдоль оси x равна

$$u_x \frac{du_x}{dx} = V \frac{dV}{dx}. \quad (16)$$

Поскольку не вся масса в отсеке (1–2) ускоряется одинаково, так же как при нахождении изменения количества движения, будем считать, что в отсеке b изменений не происходит, а ускоряется только масса отсека a , как бы перемещаясь в положение c . При одинаковой массе жидкости в отсеках a и c , равной $\rho q dt$, проекция силы инерции, возникающей при ускорении этой массы вдоль оси x , равна

$$\rho \beta q dt \cdot V \cdot \frac{dV}{dx}. \quad (17)$$

Выражая скорость через удельный расход $q = Vh$, который не изменяется вдоль x , выражение (17) можно записать в виде

$$\rho \beta q dt \frac{q}{h} \frac{d}{dx} \left(\frac{q}{h} \right) = -\rho \beta q^3 dt \frac{1}{h^3} \cdot \frac{dh}{dx}. \quad (18)$$

Запишем изменение количества движения и баланс сил в проекции на ось x . Заметим, что при ускорении потока вдоль оси x глубина его уменьшается ($\frac{dh}{dx} < 0$) и согласно (17) выражение для силы инерции приобретает положительный знак. Однако, поскольку сила инерции препятствует ускорению, в баланс сил она должна войти с противоположным знаком. Таким образом, с учетом выражений (9), (11), (14), (15) и (18) и принимая $\beta = 1$, получаем

$$gh_{i\partial} - gh \frac{dh}{dx} - \frac{\tau_{0H}}{\rho} + \frac{q^3}{h^3} \frac{dt}{dx} \cdot \frac{dh}{dx} = 0. \quad (19)$$

В последнем слагаемом уравнения (19) величина

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{V} = \frac{h}{q}. \quad (20)$$

С учетом этого уравнение (19) приобретает вид

$$-\frac{q^2}{h^2} \cdot \frac{dh}{dx} = gh_{i\partial} - gh \frac{dh}{dx} - \frac{\tau_{0H}}{\rho}. \quad (21)$$

Для случая равномерного движения ($dh/dx = 0$) уравнение (21) сводится к известному уравнению равномерного движения

$$\tau_0 = \rho g h_{i\partial}. \quad (22)$$

Рассмотрим уравнение (21) для случая ускоренного течения вдоль оси x (рис. 2). При этом $dh/dx < 0$, количество движения возрастает и левая часть уравнения положительна.

Увеличению количества движения при ускорении потока способствует продольная составляющая силы тяжести, входящая в правую часть уравнения (21) со знаком плюс, и сила гидростатического давления, связанная с различием глубин на границах рассматриваемого отсека. Поскольку при ускорении потока вдоль оси x сила $P_1 > P_2$, то разность этих сил направлена вдоль оси x и способствует увеличению количества движения, то есть второе слагаемое в правой части уравнения (21) является положительным. Это подтверждается, так как $dh/dx < 0$. Сила трения препятствует движению и должна входить в правую часть со знаком минус.

Таким образом, в качественном отношении уравнение (21) представляется верным, его можно записать в виде

$$\frac{\tau_{0H}}{\rho} = gh_{i\partial} - gh \frac{dh}{dx} + \frac{q^2}{h^2} \cdot \frac{dh}{dx}. \quad (23)$$

Из уравнения (23) следует вывод о том, что при неравномерном движении трение τ_0 соответствует трению при равномерном движении (22) только в единственном случае при определенной глубине h_c , когда два последних слагаемых в формуле (23) компенсируют друг друга

$$gh_c = \frac{q^2}{h_c^2}. \quad (24)$$

Из выражения (24) находим

$$h_c = h_{кр}. \quad (25)$$

Поскольку $\frac{q}{h_c} = V_c$, условие (24) можно записать в безразмерной форме в виде числа Фруда

$$Fr_c = \frac{V_c^2}{gh_c} = 1. \quad (26)$$

Как известно, выражения (25) и (26) совпадают с условиями, соответствующими критическому ре-

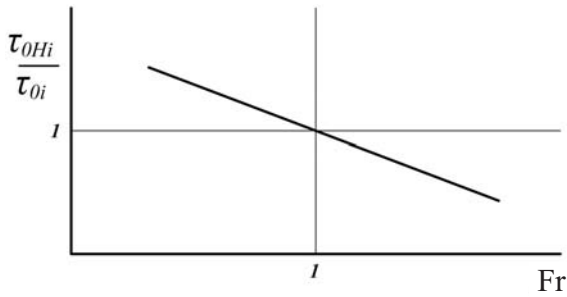


Рис. 4. Сопоставление касательных напряжений при неравномерном ускоряющемся течении ($dh/dx < 0$) и различных числах Фруда с напряжениями при равномерном движении

жиму течения, при котором глубина равномерного движения h_0 совпадает с критической глубиной $h_{кр}$. Только в том сечении, где кривая свободной поверхности пересекает линию критической глубины, касательные напряжения при неравномерном движении $\tau_{0н}$ совпадают с касательными напряжениями при равномерном движении τ_0 (при $h_0 = h_{кр}$). Если с касательным напряжением $\tau_{0н}$ в каждом сечении с глубиной h_i при неравномерном движении сопоставлять касательные напряжения τ_{0i} в равномерном потоке с глубиной $h_i = h_{0i}$ (рис. 3), то очевидно, что изменение трения при неравномерном движении по сравнению с трением при движении равномерном определяется не только характером изменения глубины, но и значением числа Фруда.

Так, из условия (24) очевидно, что при ускоренном течении ($dh/dx < 0$) трение τ_{0hi} будет больше по сравнению с трением при равномерном движении при $h_i = h_{0i}$, если отрицательное по знаку третье слагаемое (из-за $dh/dx < 0$) будет меньше по модулю второго слагаемого, положительного по знаку, то есть при $gh > V^2$, при $Fr = V^2/gh < 1$, когда поток спокойный (рис. 4). При $Fr > 1$ трение при ускоряющемся течении τ_{0hi} будет меньше, чем при равномерном течении τ_{0i} при $h_i = h_{0i}$.

Если движение замедляющееся вдоль x ($dh/dx > 0$), трение будет больше при неравномерном движении при

$$gh < \frac{q^2}{h^2},$$

то есть при $Fr = \frac{V^2}{gh} > 1$.

При $Fr < 1$ (при замедляющемся вдоль оси x спокойном течении) трение τ_{0hi} будет меньше, чем τ_{0i} при равномерном течении при $h_i = h_{0i}$ (рис. 5).

Результаты, полученные на основе выполненного анализа, показывают, что ответ на вопрос, как соотносится величина трения при ускоряющемся и замедляющемся течении, не может быть однознач-

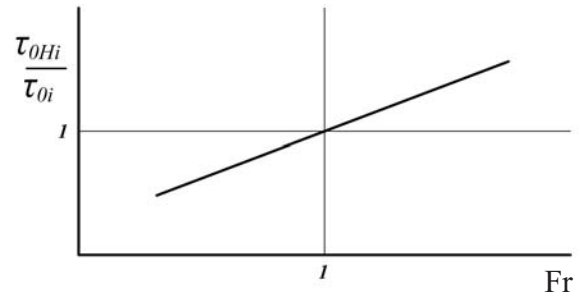


Рис. 5. Сопоставление касательных напряжений при неравномерном замедляющемся течении ($dh/dx > 0$) и различных числах Фруда с напряжениями при равномерном движении

ным. При спокойном режиме течения ($Fr < 1$), как ясно из сопоставления рис. 3 и 4, трение в ускоряющемся потоке больше, чем трение в замедляющемся потоке (если сопоставляются потоки с одинаковой глубиной и одинаковым (по модулю) значением dh/dx).

При бурном режиме течения ($Fr = V^2/gh > 1$) трение в замедленном потоке будет больше трения в потоке ускоряющемся (рис. 4 и 5) при тех же условиях сравнения, то есть при $h_{0i} = h_i$.

Таким образом, предположения о возможной зависимости гидравлического сопротивления открытых потоков от числа Фруда [4] получили аналитическое подтверждение, однако только для неравномерных потоков.

Установленный неоднозначный характер зависимости трения от dh/dx при плавноизменяющемся неравномерном движении, связанный с влиянием числа Фруда, что ранее не учитывалось [5], открывает возможности дальнейшего уточнения расчета неравномерных потоков.

Рассмотрим вопрос о соотношении коэффициентов гидравлического сопротивления для равномерного и неравномерного движения при $h_i = h_{0i}$.

Определяя коэффициент гидравлического сопротивления, как это принято для равномерного движения, в виде

$$\lambda_p = \frac{8\tau_0}{\rho V^2}, \quad (27)$$

сопоставим значение λ_p с местным коэффициентом гидравлического сопротивления для неравномерного движения λ_n при условии $h_i = h_{0i}$:

$$\lambda_n = \frac{8\tau_{0н}}{\rho V^2}. \quad (28)$$

При этом из уравнения (23), после несложных преобразований, находим соотношение между ко-

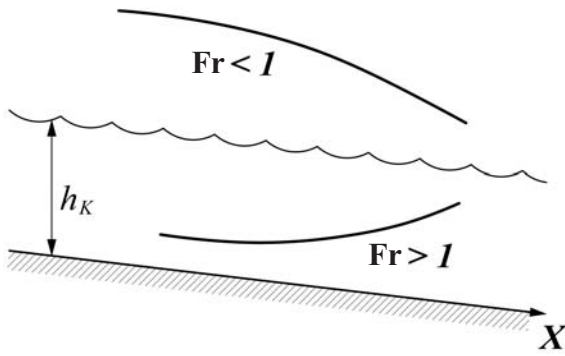


Рис. 6. Формы кривых свободной поверхности в предположении $\lambda_n/\lambda_p > 1$ и различных числах Фруда

эффицентами сопротивления неравномерного λ_n и равномерного λ_p потоков при $h_i = h_{0i}$:

$$\frac{\lambda_n}{\lambda_p} = 1 + \frac{1}{i_\partial} [\text{Fr} - 1] \frac{dh}{dx}. \quad (29)$$

Рассматривая частный случай замедленного неравномерного движения $dh/dx = i_\partial$ (горизонтальная линия свободной поверхности), из формулы (29) находим

$$\frac{\lambda_n}{\lambda_p} = \text{Fr} = \frac{q^2}{gh^3}. \quad (30)$$

Полученное выражение показывает, что коэффициент сопротивления неравномерного замедленного потока сильно уменьшается с ростом глубины h , в то время как коэффициент $\lambda_p = \frac{8g}{C_p^2}$ (C — коэффициент Шези, определяемый, например, по Маннингу как $C_p = \frac{1}{n} h^{1/6}$, где n — шероховатость русла) зависит от глубины значительно слабее:

$$\lambda_p = \frac{8gn^2}{h^{1/3}}. \quad (31)$$

При этом

$$\lambda_n = \frac{8n^2 q^2}{h^{3,33}} = \frac{8}{C_p^2} \text{Fr}. \quad (32)$$

Заметим, что число Фруда здесь величина переменная, изменение которой связано с изменением h при неравномерном движении. Таким образом, к использованию формул сопротивления равномерных потоков при расчете потоков неравномерных следует подходить с крайней осторожностью во избежание серьезных погрешностей в расчетах.

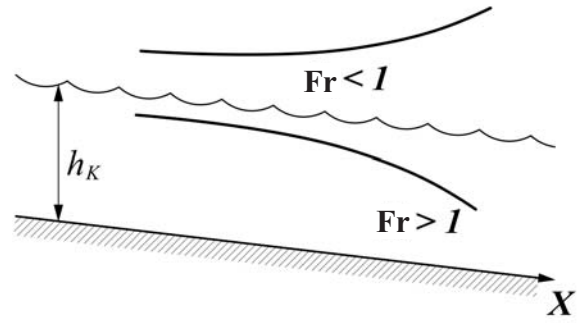


Рис. 7. Формы кривых свободной поверхности в предположении $\lambda_n/\lambda_p < 1$ для бурных и спокойных потоков

С помощью полученного выражения (29) можно найти некоторые ограничения для характеристик потока при неравномерном движении (при $i_\partial > 0$), используя очевидное условие $\lambda_n/\lambda_p > 0$. Обозначая $1/i_\partial \cdot dh/dx = L$ (число Ляпина), это условие с использованием (29) запишем в виде

$$1 + L [\text{Fr} - 1] > 0, \quad (33)$$

откуда

$$L > \frac{1}{1 - \text{Fr}}. \quad (34)$$

Если рассматривается замедляющееся движение ($dh/dx > 0$), то параметр $L > 0$, что обеспечивается только при числах $\text{Fr} < 0$, то есть при спокойном течении возможно выполнение очевидного необходимого условия $\lambda_n/\lambda_p > 0$.

Если рассматривать ускоряющееся движение ($dh/dx < 0$), параметр $L < 0$, что обеспечивается только при $\text{Fr} > 1$, то есть только при сверхкритических (бурных) режимах течения обеспечивается выполнение необходимого условия $\lambda_n/\lambda_p > 0$.

Таким образом, анализ, выполненный без каких-либо априорных гипотез относительно коэффициента гидравлического сопротивления при неравномерном движении, кроме того, что он положителен по знаку, приводит к выводу о том, что замедляющееся движение с кривой подпора возможно только при спокойных режимах течения, а ускоряющееся движение возможно только при сверхкритических (бурных) режимах течения, что не согласуется с результатами анализа, обычно выполняемого в предположении применимости формулы Шези для неравномерного движения.

Поскольку соотношение коэффициентов сопротивления при неравномерном и равномерном течении неизвестно и, как это следует из зависимости (29), сложным образом связано с характеристиками потока, проанализируем эту взаимосвязь более детально.

Рассматривая течение при $i_\delta > 0$, предположим, что $\lambda_n/\lambda_p > 1$, то есть мы вводим ограничение, дополнительное к рассмотренному выше очевидному условию $\lambda_n/\lambda_p > 0$.

При этом из выражения (29) следует, что

$$1 + L [Fr - 1] > 1 \text{ или } L [Fr - 1] > 0. \quad (35)$$

Очевидно, что знак последнего выражения зависит как от знака L , так и от значения числа Fr .

Если предположить возможность реализации замедляющегося течения ($dh/dx > 0$), то при $i_\delta > 0$ величина L будет положительной и неравенство (35) будет выполняться только при $Fr > 1$ (то есть выполнение условия $\lambda_n/\lambda_p > 1$ возможно в этом случае только при сверхкритических (бурных) режимах).

Если предположить возможность реализации ускоряющегося течения ($dh/dx < 0$), то при $i_\delta > 0$ величина L будет отрицательной и выполнение неравенства (35) будет возможно только при $Fr < 1$ (то есть выполнение условия $\lambda_n/\lambda_p > 1$ возможно в этом случае только при спокойном режиме течения) (рис. 6).

Результаты выполненного анализа в предположении $\lambda_n/\lambda_p > 1$ при $i_\delta > 0$ противоречат результатам, полученным выше, из очевидного условия $\lambda_n/\lambda_p > 0$, и по этой причине не могут быть приняты.

Предполагая, что $\lambda_n/\lambda_p < 1$, рассмотрим возможность реализации замедляющегося течения ($dh/dx > 0$) при $i_\delta > 0$. При этом из выражения (29) следует, что

$$1 + L [Fr - 1] < 1 \text{ или } L [Fr - 1] < 0. \quad (36)$$

Так как $i_\delta > 0$, то при ($dh/dx > 0$) знак L положительный и неравенство (36) будет выполняться при условии

$$Fr - 1 < 0,$$

то есть выполнение условия $\lambda_n/\lambda_p < 1$ возможно в этом случае только при $Fr < 1$ для спокойных потоков.

Если предположить возможность реализации ускоряющегося течения ($dh/dx < 0$) при $\lambda_n/\lambda_p < 1$, то при этом $L < 0$ и неравенство (36) будет выполняться при условии $Fr - 1 > 0$, то есть выполнение условия $\lambda_n/\lambda_p < 1$ возможно в этом случае только

при $Fr > 1$ для сверхкритических (бурных) режимов (рис. 7).

Таким образом, с обязательным условием $\lambda_n/\lambda_p > 0$ согласуется лишь одно из дополнительных условий $\lambda_n/\lambda_p < 1$ для рассмотренных случаев неравномерного течения при $i_\delta > 0$.

Выводы

Выполненный на основе динамического подхода анализ неравномерного установившегося движения показал, что напряжение трения при неравномерном течении может быть больше или меньше трения при равномерном течении в зависимости от знака dh/dx и числа Фруда, если сопоставляется равномерный поток с глубиной, равной местной глубине неравномерного потока.

Установлено, что коэффициент сопротивления для частного случая замедленного неравномерного движения с горизонтальной линией свободной поверхности обнаруживает существенно различающуюся степень зависимости коэффициента сопротивления от глубины по сравнению с равномерным движением, что указывает на необходимость корректировки применяемых формул сопротивления во избежание серьезных погрешностей в расчетах неравномерного движения.

Установлено, что обязательному условию $\lambda_n/\lambda_p > 0$ отвечает лишь одно из дополнительных условий ($\lambda_n/\lambda_p < 1$) для рассмотренных случаев неравномерного течения при $i_\delta > 0$.

При положительном уклоне дна и при $\lambda_n/\lambda_p < 1$ замедляющееся течение реализуется только при числах Фруда меньше 1, а ускоряющееся течение — только при числах Фруда больше 1.

Полученные на основе динамического анализа данные о формах неравномерного движения и коэффициентах сопротивления ввиду их важности требуют экспериментальной проверки.

Список литературы

1. Киселев П. Г. Гидравлика. Основы механики жидкости. М.: Энергия, 1980.
2. Бахметев Б. А. Гидравлика открытых русел. М.: Гострансиздат, 1934.
3. Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. Киселева П. Г. М.: Энергия, 1972.
4. Альтигуль А. Д. Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1982.
5. Ляпин В. Ю. Гидравлическое сопротивление неравномерных плавноизменяющихся и равномерных потоков в открытых руслах. М.: МГСУ, 2004.

Способ выбора оптимальных диаметров самотечных водоотводящих сетей

Ветров Е. П., инженер, Сергеев А. И.,

кандидат техн. наук (Иркутский государственный технический университет)

При проектировании систем водоотведения населенных пунктов необходимо производить гидравлический расчет самотечных водоотводящих сетей с целью определения характеристик сети (диаметр, уклон, скорость, наполнение и др.). Расчет самотечных водоотводящих сетей в большинстве случаев выполняется по таблицам [3, 4, 8], в которых указана зависимость между расходом сточных вод q , гидравлическим уклоном i , скоростью течения сточных вод v и наполнением h/D . Конечной же целью гидравлического расчета сети водоотведения является определение диаметра и уклона трубы, от которых и будут зависеть капитальные затраты на ее устройство и эксплуатацию. Выбор диаметра самотечных водоотводящих сетей будет зависеть от количества поступающих в сеть стоков. Для определения диапазона изменения расхода сточных вод при заданном диаметре потребуется определить минимальные и максимальные параметры характеризующие его.

Согласно [6] в табл. 1 представлены данные наибольших расчетных наполнений в зависимости от диаметра сети.

По мнению многих авторов, необходимость установления максимальных расчетных наполнений обусловлена созданием запаса в сетях на случай максимального расхода, а также возможностью возникновения подпора уровня сточных вод на поворотах.

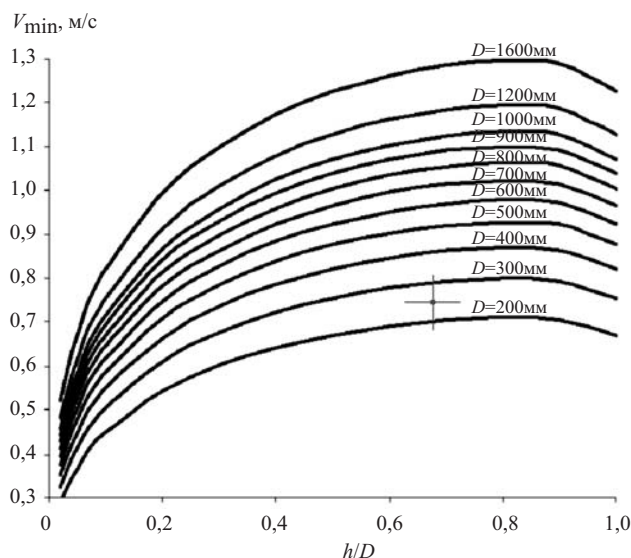


Рис. 1. График зависимости минимальной скорости v_{\min} от наполнения h/D и диаметра труб D

Для создания условий эффективного функционирования сетей водоотведения им придают определенные уклоны, обеспечивающие движение сточных вод с самоочищающимися скоростями. Для расчета минимальной незаиливающей скорости был предложен ряд зависимостей. В данной работе воспользуемся зависимостью Н. Ф. Федорова, положенной в основу скоростей, рекомендуемых СНиП [6]:

$$v_{\min} = A\sqrt[n]{R}, \quad (1)$$

где $A = 1,57$;

$$n = 3,5 + R/2, \quad (2)$$

где R — гидравлический радиус, м.

Зависимость минимальной расчетной скорости от диаметра и наполнения представлена на рис. 1.

Минимальные уклоны водоотводящей сети вычисляются по формулам Дарси или Шези:

$$i_{\min} = \frac{l}{4R} \cdot \frac{v_{\min}^2}{2g}, \quad (3)$$

где λ — коэффициент сопротивления трению по длине; g — ускорение свободного падения, м/с^2 ; v_{\min} — минимальная скорость, м/с .

Максимальный уклон находят по формуле (3) с подстановкой значения максимальной скорости.

Для приближенных расчетов можно воспользоваться предложенной Яковлевым С. В. формулой

$$i_{\min} = \frac{1}{D}, \quad (4)$$

где D — диаметр трубопровода, мм.

Таким образом, все параметры, используемые в гидравлическом расчете водоотводящих сетей, за исключением наполнения h/D имеют свои минимальные и максимальные значения. В свою очередь наибольшее расчетное наполнение самотечных водоотводящих труб регламентируется СНиП [6], о минимальном же наполнении в нормативных документах информации нет. Фактически данная величина зависит от скорости потока, т.е. для того, чтобы дать рекомендации о минимальном наполнении, следует изучить изменение минимальной скорости

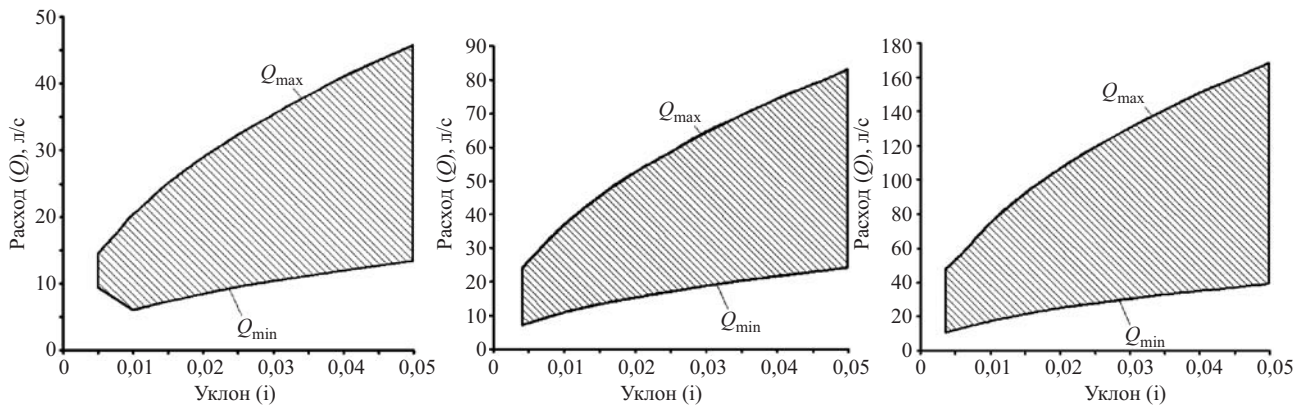


Рис. 2. Графики изменения расхода при различных уклонах $Q = f(i)$:

a — $D = 200$ мм; *b* — $D = 250$ мм; *в* — $D = 300$ мм

от степени наполнения труб. На рис. 1 приведены кривые изменения скоростей движения потока в трубах круглого сечения в зависимости от степени их наполнения и диаметра. С повышением степени наполнения увеличивается гидравлический радиус и скорость движения потока [1]. Максимального значения гидравлический радиус достигает при $h/D = 0,813$, затем начинает снижаться. Соответственно и скорость имеет максимальное значение при $h/D = 0,813$. Из этой закономерности следует, что наполнение более $h/D = 0,813$ не обосновано в связи с тем, что скорость в этом случае будет не повышаться, а снижаться. Рекомендации же [6], представленные в табл. 1, обусловлены тем, что при поступлении сточных вод в верхнюю часть трубы происходят большие мгновенные колебания расходов, которые не учитываются коэффициентом неравномерности, в связи с этим предусматривают некоторый запас и принимают расчетное наполнение меньше $h/D = 0,813$.

Воспользуемся этими же положениями при определении минимального наполнения. Максимальные значения гидравлический радиус принимает при наполнении от 0,5 до 1,0. При наполнении $h/D < 0,5$ гидравлический радиус, а следовательно, и скорость потока начинают снижаться. Плавное снижение скорости наблюдается при наполнении $0,3 < h/D < 0,5$, при $0,1 < h/D < 0,3$ снижение скорости более заметно, при $h/D < 0,1$ скорость начинает резко падать и в конце концов сводится к 0. Руководствуясь проведенными исследованиями можно сделать вывод, что наполнение труб $h/D < 0,3$ принимать не рекомендуется, а наполнение $h/D < 0,1$ нецелесообразно. Так, в таблицах [4, 8] расчет выполнен при наполнении $h/D = 0,05$ и $h/D = 0,1$ соответственно, а в таблицах [1] при $h/D < 0,3$ расчет не производился.

Далее определим минимальные и максимальные расходы сточных вод независимо от рекомендуемого минимального наполнения для ряда диа-

метров при заданных уклонах сети. Данный расчет представлен в табл. 2.

Определяем минимальный расход Q_{\min} при заданном уклоне и диаметре путем расчета расхода $Q_{h/D}^1$ при каждом значении $h/D = 0,01 \dots 1$. Затем для каждого полученного расхода $Q_{h/D}$ вычисляем скорость v . После чего, учитывая рекомендации о минимальном наполнении труб, путем перебора значений скорости v , начиная с $h/D = 0,01$ находим скорость, которая соответствует или больше минимальной скорости $v \geq v_{\min}$. Максимальные расходы Q_{\max} определяются сравнительно легко путем расчета расхода при максимальном наполнении.

Как говорилось выше, расчет сетей водоотведения следует производить при $0,3 < h/D < h/D_{\max}$. Это подтверждается и при расчете минимального расхода. Соблюдение минимальной незаиливающей скорости при больших диаметрах и уклонах наблюдается и при незначительных наполнениях. Согласно данным, полученным в результате расчета (табл. 2), при диаметре 600 мм и уклоне 0,007 минимальная скорость ($v = 0,59i/n$) соблюдается при наполнении $h/D = 0,08$, которому соответствует расход $6,22i/n$. Таким образом, проанализировав значения наполнений и расходов при различных диаметрах и уклонах, можно сделать вывод, что при увеличении диаметра и уклона снижаются наполнения и расход, т.е. h/D и $Q \rightarrow 0$.

В табл. 3 представлен расчет минимальных и максимальных расходов при минимальном рекомендуемом наполнении $h/D = 0,3$. Диапазон изменения расходов сточных вод в трубах при заданных уклонах характеризует гибкость поперечных сечений трубопроводов с учетом рекомендуемых на-

Таблица 1

Диаметр, мм	150 – 200	300 – 400	450 – 900	> 1000
h/D	0,6	0,7	0,75	0,8

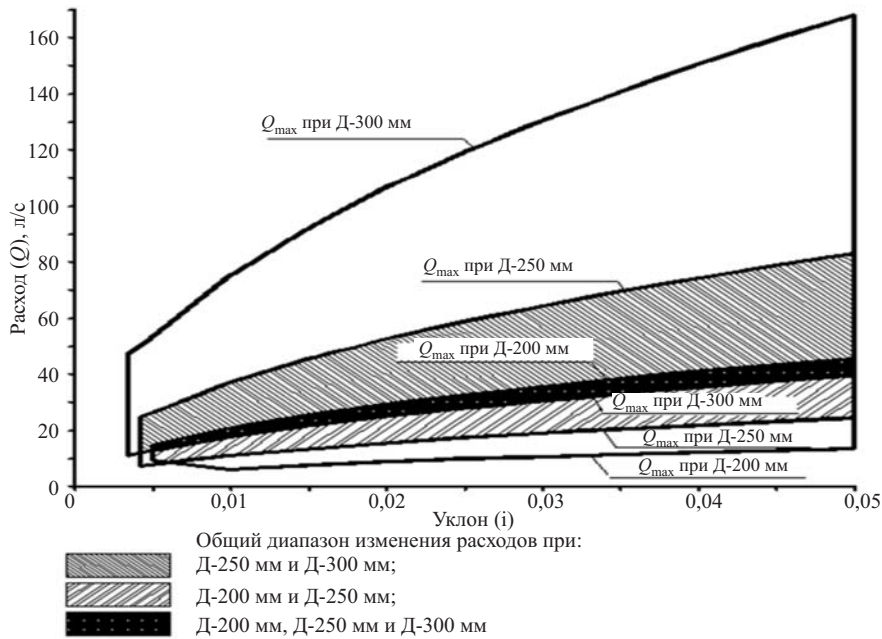


Рис. 3. Общий график изменения расходов при $D = 200, 250, 300$ мм

полнений. Аналитические исследования гибкости поперечного сечения труб представлены в табл. 3.

На рис. 2, а, б, в представлена графическая зависимость изменения максимальных и минимальных расходов при диаметрах 200, 250, 300 мм.

Изменение скорости описывается уравнением

$$Q = wv, \quad (5)$$

где w — площадь живого сечения потока в трубе, m^2 ; v — скорость движения жидкости, m/c

$$v = C\sqrt{Ri}, \quad (6)$$

где C — коэффициент, зависящий от гидравлического радиуса и шероховатости смоченной поверхности; i — гидравлический уклон

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad (7)$$

где R — гидравлический радиус, м.

Определяя площадь живого сечения потока в трубе и гидравлический радиус при минимальном и максимальном наполнении и подставляя их в формулу (5), соответственно получаем минимальный и максимальный расходы.

На первый взгляд, используя данные табл. 3 и графики на рис. 2, которые могут быть построены

Т а б л и ц а 2

Зависимость $Q_{\min} = f(D, i, h/D)$ и $Q_{\max} = f(D, i, h/D)$ при $0 < h/D < h/D_{\max}$

Диаметр, мм	$i = 0,005$						$i = 0,007$						$i = 0,009$					
	min			max			min			max			min			max		
	h/D	v_{\min}	Q_{\min}	h/D	v	Q_{\max}	h/D	v_{\min}	Q_{\min}	h/D	v	Q_{\max}	h/D	v_{\min}	Q_{\min}	h/D	v	Q_{\max}
200	0,46	0,66	9,3	0,6	0,73	14,47	0,26	0,58	3,77	0,6	0,87	17,13	0,18	0,53	2,04	0,6	0,99	19,42
300	0,28	0,67	10,88	0,7	1,01	53,18	0,17	0,59	4,73	0,7	1,19	62,2	0,12	0,54	2,61	0,7	1,35	71,35
400	0,20	0,67	11,98	0,7	1,22	114,53	0,13	0,61	5,85	0,7	1,44	135,51	0,09	0,55	3,07	0,7	1,64	153,65
500	0,16	0,68	13,77	0,75	1,43	226,16	0,10	0,60	6,13	0,75	1,69	267,60	0,07	0,54	3,27	0,75	1,92	303,43
600	0,13	0,67	14,57	0,75	1,62	367,77	0,08	0,59	6,22	0,75	1,91	435,15	0,06	0,55	3,83	0,75	2,17	493,41

для любого диаметра, зная расход сточных вод, можно легко определить необходимый диаметр и уклон водоотводящей сети. Однако в большинстве случаев пропуск одного и того же расхода с соблюдением всех нормативных рекомендаций будет возможен при различных диаметрах и уклонах сети (рис. 3). Это связано с гибкостью поперечного сечения трубопровода, которое в данном случае зависит от диапазона изменения наполнения h/D и уклона сети. Анализируя данные табл. 2, 3, можно также увидеть, что гибкость сечения труб зависит от их диаметра и уклона. С увеличением диаметра и уклона сети увеличивается и ее гибкость.

На рис. 3 представлен общий график изменения расходов при диаметре 200, 250 и 300 мм. На нем видны области, в которых водоотводящая сеть может работать с рекомендуемыми параметрами при различных диаметрах и уклонах сети.

Таким образом, встает вопрос о выборе оптимального диаметра водоотводящей сети при том условии, что сеть будет работать с рекомендуемыми параметрами.

При выборе диаметра для замены труб следует соблюдать правила, принятые для самотечных сетей:

$$D_{i-1} \leq D_i \leq D_{i+1}; \quad (8)$$

$$v_{i-1} \leq v_i \leq v_{i+1}, \quad (9)$$

где D_i и v_i — диаметр и скорость движения стоков на участке сети, для которого требуется подобрать диаметр; D_{i-1} и v_{i-1} , D_{i+1} и v_{i+1} — диаметр и скорость на предыдущем и последующем участках самотечной сети.

При известных значениях скоростей на предыдущем и последующем участках сети при определении диапазона возможного изменения диаметра трубы следует руководствоваться формулами (5) и (6). Последовательность действий по определению оптимального диаметра трубы следующая:

1. Преобразуя формулу (6) и соблюдая правило (9), определяем минимальное и максимальное значения гидравлического радиуса R^* :

$$R_{\min} = 4 \sqrt[4]{\left(\frac{v_{i-1}^2}{5102,2i}\right)^3}; \quad (10)$$

$$R_{\max} = 4 \sqrt[4]{\left(\frac{v_{i+1}^2}{5102,2i}\right)^3}. \quad (11)$$

* При преобразовании формулы (6) коэффициент C определялся по формуле (7), где $n = 0,014$; $y = 1/6$ [4].

В первом приближении уклон i следует принимать равным существующему уклону либо уклону местности. Если уклон местности меньше минимального, то принимаем минимальный уклон трубы.

2. Определяем минимальное и максимальное значения диаметров, при которых будет соблюдаться правило (9):

$$D_{*min} = \frac{R_{\min}}{R^*(H/D_{max})}; \quad (12)$$

$$D_{*max} = \frac{R_{\max}}{R^*(H/D_{min})}, \quad (13)$$

где R^* — доля от D гидравлического радиуса при минимальном и максимальном наполнениях.

3. Находим минимальное и максимальное значения расхода, при котором будет соблюдаться правило (9):

$$Q_{\min} = w^*_{\max} D_{*min}^2; \quad (14)$$

$$Q_{\max} = w^*_{\min} D_{*max}^2, \quad (15)$$

где $w^*_{\min, \max}$ — доля от D^2 площади живого сечения при минимальном и максимальном наполнениях соответственно.

Следует помнить, что гидравлический радиус возрастает и становится максимальным при наполнении $0,813D$, соответственно и скорость имеет максимальное значение при наполнении $0,813D$. Очевидно, что, подставляя значение w^*_{\max} в формулу (14) мы получим минимальный расход, при котором будет соблюдаться требуемая скорость, и соответственно, подставляя значение $w^*_{\min, x}$ в формулу (15) мы получим максимальный расход, при котором будет соблюдаться требуемая скорость.

4. Если расчетный расход сточных вод по реконструируемому участку не соответствует выражению $Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max}$, то его пропуск с соблюдением правила (9) и с заданным уклоном не возможен. В данном случае при выборе диаметра следует увеличивать уклон реконструируемого участка до тех пор, пока не будет соблюдено выражение $Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max}$, либо пренебречь правилом (9).

5. Путем увеличения D_{*min} находим значение минимального диаметра D_{\min} , расход сточных вод по которому при максимальном наполнении будет соответствовать расчетному расходу сточных вод на реконструируемом участке. Аналогичным образом путем уменьшения D_{*max} находим значение максимального диаметра D_{\max} , расход сточных вод по которому при минимальном наполнении бу-

Зависимость $Q_{\min} = f(D, i, h/D)$ и $Q_{\max} = f(D, i, h/D)$ при $0,3 < h/D < h/D_{\max}$

Диаметр, мм	$i = 0,003$						$i = 0,005$						$i = 0,007$					
	min			max			min			max			min			max		
	h/D	v_{\min}	Q_{\min}	h/D	v	Q_{\max}	h/D	v_{\min}	Q_{\min}	h/D	v	Q_{\max}	h/D	v_{\min}	Q_{\min}	h/D	v	Q_{\max}
200	–	–	–	–	–	–	0,46	0,66	9,33	0,6	0,74	14,47	0,30	0,63	4,99	0,6	0,87	17,13
300	–	–	–	–	–	–	0,30	0,70	12,44	0,7	1,01	53,18	0,30	0,83	14,72	0,7	1,19	62,92
400	0,30	0,65	20,75	0,7	0,94	88,71	0,30	0,84	26,79	0,7	1,22	114,53	0,30	1,00	31,70	0,7	1,44	135,51
500	0,30	0,76	37,62	0,75	1,11	175,19	0,30	0,98	48,57	0,75	1,43	226,16	0,30	1,16	57,47	0,75	1,69	267,60
600	0,30	0,86	61,18	0,75	1,25	284,87	0,30	1,11	78,98	0,75	1,62	367,77	0,30	1,31	93,45	0,75	1,91	435,15
800	0,30	1,04	131,76	0,75	1,52	613,51	0,30	1,34	170,10	0,75	1,93	727,20	0,30	1,59	201,26	0,75	2,32	937,15
1000	0,30	1,21	238,89	0,75	1,76	1112,36	0,30	1,56	308,41	0,75	2,27	1436,05	0,30	1,84	364,91	0,75	2,69	1699,16
1200	0,30	1,36	388,47	0,80	1,94	1998,97	0,30	1,76	501,51	0,80	2,58	2503,15	0,30	2,08	593,39	0,80	3,05	2961,76
Диаметр, мм	$i = 0,009$						$i = 0,011$						$i = 0,013$					
	min			max			min			max			min			max		
	h/D	v_{\min}	Q_{\min}	h/D	v	Q_{\max}	h/D	v_{\min}	Q_{\min}	h/D	v	Q_{\max}	h/D	v_{\min}	Q_{\min}	h/D	v	Q_{\max}
200	0,3	0,71	5,66	0,6	0,99	19,42	0,3	0,79	6,26	0,6	1,09	21,47	0,3	0,86	6,80	0,6	1,19	23,34
300	0,3	0,94	16,69	0,7	1,35	71,35	0,3	1,03	18,45	0,7	1,49	78,88	0,3	1,12	20,06	0,7	1,62	85,75
400	0,3	1,13	35,94	0,7	1,64	153,65	0,3	1,25	39,73	0,7	1,81	169,87	0,3	1,36	43,20	0,7	1,97	184,67
500	0,3	1,31	65,17	0,75	1,92	303,43	0,3	1,45	72,04	0,75	2,12	335,46	0,3	1,58	78,32	0,75	2,31	364,68
600	0,3	1,49	105,97	0,75	2,17	493,40	0,3	1,64	117,15	0,75	2,40	545,49	0,3	1,79	127,36	0,75	2,58	544,47
800	0,3	1,80	228,21	0,75	2,63	1062,63	0,3	1,99	252,30	0,75	2,91	1174,78	0,3	2,16	274,28	0,75	3,16	1277,12
1000	0,3	2,09	413,77	0,75	3,05	1926,67	0,3	2,31	457,44	0,75	3,37	2130,01	0,3	2,51	497,29	0,75	3,66	2315,57
1200	0,30	2,36	672,84	0,80	3,46	3358,32	0,30	2,61	743,86	0,80	3,83	3712,77	0,30	2,83	808,66	0,80	4,16	4636,20

дет соответствовать расчетному расходу сточных вод на реконструируемом участке.

6. Полученные минимальные и максимальные значения проверяем на соответствие правилу (8). В противном случае принимаем значения минимального и максимального диаметров на предыдущем и последующем участках соответственно.

7. Производим гидравлический расчет самотечной сети для каждого значения диаметра, попадающего в диапазон его возможного изменения с учетом изменения расхода во времени.

8. При условии, что все технические параметры системы обеспечивают необходимые условия ее работы и удовлетворяют всем нормативным требованиям, производим сравнение экономических параметров работы системы.

9. На основе проведенных многовариантных расчетов определяем наиболее оптимальный диаметр самотечной трубы.

Пример выбора оптимального диаметра самотечной водоотводящей сети, укладываемой взамен существующей трубы. На рис. 4 представлена схема одного из коллекторов самотечной водоотводящей сети г. Иркутска, один из участков которого требуется переложить в связи с возросшим расходом сточных вод, а также износом участка.

Гидравлический расчет показал, что увеличение нагрузки на участок 2 – 3 повлияло на параметры его работы. Как видно из рис. 4, наполнение на участке 2 – 3 значительно выше нормативного. Очевидно, что требуется замена данного участка с увеличением диаметра.

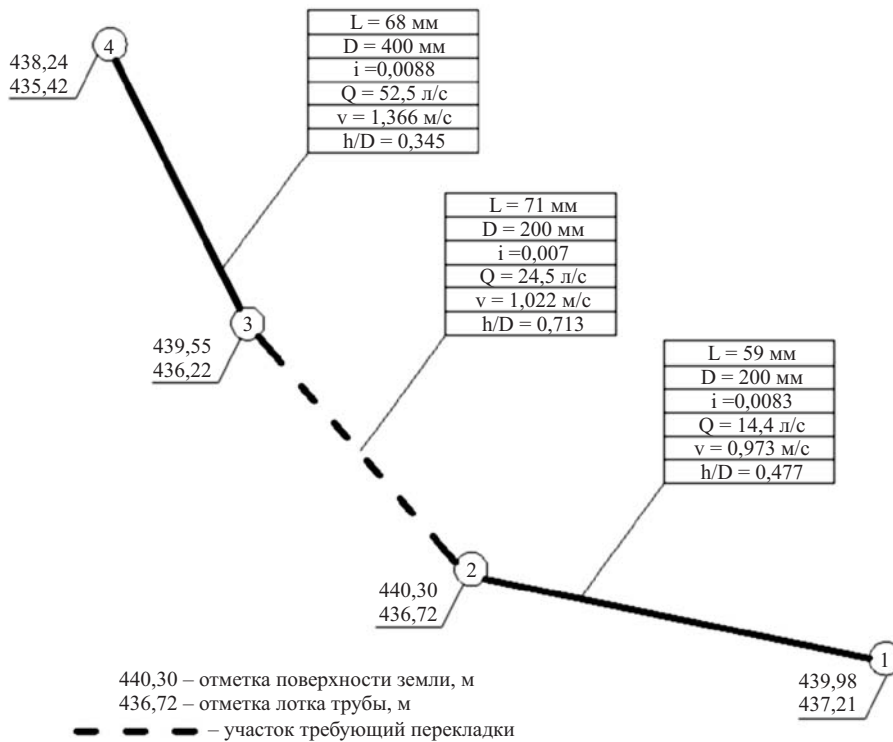


Рис. 4. Схема коллектора самотечной водоотводящей сети в г. Иркутске

Пользуясь рекомендациями, изложенными выше, определим оптимальный диаметр для перекладки данного участка.

1. Определяем минимальное и максимальное значения гидравлического радиуса:

$$R_{\min} = 0,06569 \text{ м};$$

$$R_{\max} = 0,10928 \text{ м}.$$

2. Определяем минимальное и максимальное значения диаметров, при которых будет соблюдаться правило (9):

$D_{\min}^* = 237 \text{ мм}$ (максимальное наполнение принято в соответствии с табл. 1);

$$D_{\max}^* = 639 \text{ мм}.$$

3. Находим минимальное и максимальное значения расхода, при котором будет соблюдаться правило (9):

$$Q_{\min} = 27,6 \text{ л/с};$$

$$Q_{\max} = 80,9 \text{ л/с}.$$

4. Проверяем соответствие выражения $27,6 \leq 40,0 \leq 80,9$.

5. При расчетном расходе 40,0 л/с и максимальном наполнении $h/D = 0,6$ $D_{\min} = 275 \text{ мм}$. При расчетном расходе 40,0 л/с и минимальном наполнении $h/D = 0,6$ $D_{\max} = 437 \text{ мм}$.

6. $D_{\min} = 275 \text{ мм}$ соответствует, а значение $D_{\max} = 437 \text{ мм}$ не соответствует правилу (8). Следовательно, принимаем $D_{\max} = D_{i-1} = 400 \text{ мм}$. Диапазон изменения диаметра 275 – 400 мм.

7. Для каждого возможного диаметра, попадающего в данный диапазон, производим гидравлический расчет с учетом того, что расчетный расход на данном участке в течение времени увеличится до 50 л/с.

Результаты гидравлического расчета для различных вариантов представлены в табл. 4.

8. Производим технико-экономическое сравнение вариантов при диапазоне изменения диаметров 300 – 400 мм.

9. Принимаем диаметр водоотводящей самотечной сети равным 300 мм.

Следует отметить, что при необходимости провести гидравлические и экономические расчеты

Т а б л и ц а 4

Диаметр, мм	$Q = 40 \text{ л/с}$		при $Q = 50 \text{ л/с}$	
	h/D	$v, i/n$	h/D	$v, i/n$
275	0,60	1,07	0,71	1,13
300	0,52	1,08	0,60	1,14
325	0,46	1,08	0,53	1,15
350	0,42	1,09	0,47	1,15
375	0,38	1,08	0,42	1,14
400	0,34	1,07	0,38	1,13

для различных материалов труб самотечных водоотводящих сетей.

Выводы

1. Применение данного способа при разработке схем систем водоотведения позволит более качественно и профессионально подойти к соблюдению нормативных рекомендаций по проектированию и строительству самотечных водоотводящих сетей.

2. Приведенный алгоритм выбора оптимального диаметра реконструируемого или нового участка самотечной водоотводящей сети позволяет выбрать наиболее выгодный с технической и экономической точки зрения диаметр, с учетом изменения параметров работы системы во времени.

3. Данный способ позволяет решить проблему изменения диаметра и оставить параметры работы системы водоотведения в пределах нормативных рекомендаций.

Список литературы

1. *Дикаревский В. С.* К расчету сетей водоотведения // Вода и экология. 2000. № 1.

2. *Козлова И. А., Козлов А. А.* Пропускная способность безнапорных трубопроводов круглого сечения. ИГЭУ. 2003.
3. *Константинов Ю. М., Василенко А. А., Сапунин А. А., Батченко Б. Ф.* Гидравлический расчет сетей водоотведения: Расчетные таблицы. Киев: Будівельник, 1987.
4. *Лукиных А. А., Лукиных Н. А.* Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н. Н. Павловского. — 4-е изд., доп. М.: Стройиздат, 1974.
5. *Отставнов А. А., Устюгов В. А., Хренов К. Е., Харькин В. А.* Применение формулы (14) СНиП 2.04.03 – 85 для гидравлических расчетов канализационных трубопроводов из полимерных труб // Сантехника. 2008. № 8.
6. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения.
7. СН 478-80. Инструкция по проектированию и монтажу сетей водоснабжения и канализации из пластмассовых труб. М.: ГОССТРОЙ СССР.
8. *Федоров Н. Ф., Волков Л. Е.* Гидравлический расчет канализационных сетей: Расчетные табл. — 4-е изд. Л.: Стройиздат, 1968.
9. *Харькин В. А.* Гидравлические особенности канализационных сетей с участками из полимерных труб, уложенных бестраншейно взамен ветхих трубопроводов из традиционных труб // Сантехника. 2003. № 4.

Сдано в набор 23.11.2009. Подписано в печать 20.01.2010. Формат 60×84 1/8.

Печать офсетная. Печ. л. 7,0. Цена свободная

Оригинал-макет выполнен в издательстве “Фолиум”
127238, Москва, Дмитровское ш. 58, тел/факс (495) 482-5590, 482-5544

Internet: <http://www.folium.ru>, **E-mail:** info@folium.ru

Отпечатано в типографии издательства “Фолиум”



А.Ф. Дьяков (главный редактор)

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ, том 1-ый

2005 год. Изд-во МЭИ, 316 с., формат 70x108/16

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ, том 2-ой

2008 год. Изд-во МЭИ, 429 с., формат 70x108/16

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ, том 3-ий

2009 год. Изд-во МЭИ, 288 с., формат 70x108/16

„Электротехническая энциклопедия“ представляет собой справочное издание в 4-х томах, предназначенное для инженерно-технических работников промышленных предприятий и организаций, чья практическая деятельность связана с электроэнергетикой, электротехникой и применением изделий электротехнической промышленности, преподавателей, студентов, а также для широкого круга читателей, интересующихся электротехникой. Статьи в энциклопедии охватывают основные направления теоретической и практической электротехники: теоретическую электротехнику; электроэнергетику; электромеханику; электропривод; электрические аппараты; электротехнологию; электротехнические системы транспорта и космической техники; светотехнику; электротехнические материалы и кабели; силовую и информационную электронику; электроизмерительную технику.

„Электротехническая энциклопедия“ подготовлена видными специалистами в различных областях электротехники с целью отразить мировой уровень развития электротехники начала XXI века.

Уважаемые читатели!

Для оформления подписки на предлагаемые тома энциклопедии непосредственно в издательстве ЗАО НТФ "Энергопрогресс" Вам необходимо заполнить этот бланк-заказ и направить его в издательство. Вам выставят счёт, после оплаты которого мы вышлем Вам необходимые тома энциклопедии.

Направляется по адресу:
109044, г. Москва, Воронцовский пер., д. 2, стр. 1
ЗАО НТФ "Энергопрогресс" Корпорации "ЕЭЭК".
Тел. (495) 911-2696
E-mail: ani.55@mail.ru
контактное лицо: Алябьева Наталья Ивановна

БЛАНК-ЗАКАЗ

Просим направить издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ,

том 1-ый _____ (указать кол-во экземпляров) цена одного экз. 1000 руб.00коп.

том 2-ой _____ (указать кол-во экземпляров) цена одного экз. 1200 руб.00коп

том 3-ий _____ (указать кол-во экземпляров) цена одного экз. 1100 руб.00 коп.

(в том числе НДС. Почтовые расходы не включены)

Название предприятия	
Юридический адрес	
ИНН/КПП	
Тел/Факс	
Контактное лицо	
E-mail	

по адресу:

(почтовый адрес с индексом, по которому направлять издание)

Подпись руководителя предприятия (организации) _____

Подпись главного бухгалтера _____

*Уважаемые коллеги, дорогие читатели, авторы и друзья
журнала «Гидротехническое строительство»!*

Поздравляем Вас с Новым 2010 годом!

*Желаем всем доброго здоровья, счастья и творческих успехов
в благородном деле развития энергетики на благо России.*

*Пусть наступающий год станет для Вас годом новых
свершений, ярких побед и исполнения желаний!*

Редакционная коллегия:

Лапин Г. Г. (гл. редактор), Абубакиров Ш. И., Александров А. Е., Альхименко А. И.,
Аргал Э. С., Беллендир Е. Н., Бронштейн В. И., Воскресенский С. М., Золотов Л. А.,
Каганов Г. М., Кириллов В. М., Красильников М. Ф., Ляпин В. Ю., Марчук А. Н.,
Машина Л. Ф., Новоженин В. Д., Осипов А. Д., Парабучев И. А., Радченко В. Г.,
Родионов В. Б., Семенов В. М., Семенов И. В., Серков В. С., Хазиахметов Р. М.,
Шайтанов В. Я., Шангин В. С., Юркевич Б. Н.

Адрес редакции:

Москва, Волоколамское шоссе, д. 2, к. 241

Почтовый адрес редакции:

109044, г. Москва, Воронцовский переулок, дом 2, стр. 1.

ЗАО НТФ «Энергопрогресс»

Тел./факс: (495) 741-49-81

E-mail: gts1930@yandex.ru

Internet: <http://www.energy-journals.ru>