

Научно-технический и производственный сборник

# БЭС

Безопасность  
энергетических  
сооружений

Научно-исследовательский институт

**НИИЭС**

энергетических сооружений

Вып. 16

2007

Открытое акционерное общество  
«Федеральная гидрогенерирующая компания»  
(ОАО «ГидроОГК»)

---

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

# **БЕЗОПАСНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ СБОРНИК

Выпуск 16

Москва  
2007

УДК 621.311

Председатель редакционного совета: к.т.н. С.О. Бритвин  
Научный редактор: к.т.н. И.В. Семенов  
Выпускающий редактор А.Г. Мелихова

**Безопасность энергетических сооружений. //Научно-технический и производственный сборник. Вып. 16. ОАО «НИИЭС». М.: 2007. 232 с.**

Настоящий сборник продолжает информировать специалистов о современном уровне решения проблем безопасности гидросооружений, водохранилищ и рек по следующим направлениям:

мониторинг и безопасность сооружений;  
гидрологическая безопасность водохранилищ и рек;  
экологическая безопасность;  
строительные конструкции, материалы, технологии.

Один из важнейших разделов настоящего сборника посвящен вопросам гидрологической безопасности энергетических сооружений, где предложены методики расчетов течений в бьефах ГЭС, а также результаты компьютерного и физического моделирования различных ситуаций на конкретных объектах.

Экологическая безопасность гидроузлов и гидросооружений освещается в статьях по оценке влияния ГЭС на природную среду, решению проблем улучшения экологического состояния водохранилищ и рек.

ОАО «НИИЭС», 125362, Москва, а/я 393,  
Телефон: (495) 493 51 32, (495) 497-21-51  
E-mail: melihova@niies.ru

Строительный проезд, д. 7а  
Факс: (495) 363 56 51

ISBN 978-5-902144-08-3

© ОАО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений», 2007

## **I. МОНИТОРИНГ И БЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ**

### **ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ОСНОВНЫХ СООРУЖЕНИЙ ЗГАЭС И ИХ ОСНОВАНИЙ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА В ПЕРИОД ПОСТОЯННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

*Блинов И.Ф., инженер, ОАО «НИИЭС»*

Первая крупная в РФ Загорская ГАЭС установленной мощностью 1200 т · кВт. была введена во временную эксплуатацию в декабре 1987 г. Исследования конструкций, гидравлики, строительных материалов проводились практически параллельно с проектированием сооружений. При проектировании был изучен и использован мировой опыт строительства ГАЭС. К началу строительства ЗГАЭС в странах мирового сообщества уже было построено более 150 ГАЭС. (США, Германия, Франция, Италия, Норвегия, Испания и др).

Подпорные сооружения, создающие верхние и нижние бассейны ГАЭС, представлены различными типами плотин. Преимущественно это каменно — набросные с ядром или экраном или каменно — земляные плотины и дамбы. Широкое применение получили асфальтобетонные покрытия откосов плотин и днищ бассейнов. Эти покрытия различной конструкции: однослойные с дренажом, двухслойные и трехслойные асфальтобетонные покрытия с дренажом.

Водоприемники ГАЭС имеют самые разнообразные конструктивные решения. Напорные трубопроводы, соединяющие верхний бассейн и здание ГАЭС, в большинстве своем конструктивно выполнены в виде туннелей диаметром от 1,95 до 11,5 м. Конструкция облицовки туннелей различна в зависимости от геологии и напора. Большинство водоводов на всем протяжении или на отдельных участках имеют металлическую облицовку различной толщины. Лишь некоторые ГАЭС имеют водоводы, проложенные по

тон (США) подводят по шести стальным трубопроводам длиной каждый 396 м. Диаметр трубопроводов изменяется от 8,7 м у водоприемника до 7,3 м у здания ГАЭС. Все трубопроводы находятся под слоем грунта обратной засыпки. Верхний участок стального трубопровода расположен в теле ограждающей дамбы под слоем грунта толщиной 30 м. Металлическая облицовка трубопровода рассчитана на внутреннее гидравлическое давление, а вес грунта воспринимает железобетонная оболочка. Средний участок трубопровода находится под засыпкой, нагрузку которой воспринимают ребра жесткости расположенные через 1,5 м. В верхней и нижней частях трубопровода предусмотрены компенсационные сочленения, позволяющие без потери целостности воспринимать перемещения  $\pm 10$  см в горизонтальной и  $\pm 5$  см в вертикальной плоскостях [1].

На основе изучения мирового опыта проектирования и строительства, а также с учетом геологических, климатических и других особенностей створа были запроектированы сооружения ЗГАЭС, которые почти двадцать лет успешно эксплуатируются.

В состав сооружений ЗГАЭС входят:

дамба верхнего бассейна из суглинков максимальной высотой до 35 м, длиной 8900 м с заложением верхового откоса 1 : 3,25, низового — 1 : 2,5 (дамба первой очереди), — верхового — 1 : 7, низового — 1 : 3 (дамба второй очереди);

водоприемник реверсивного типа с верховыми подпорными стенами первого и второго ярусов и низовыми подпорными стенами. Высота водоприемника 48 м, ширина по основанию вдоль потока 69,3 м, длина 102,7 м. Конструктивно водоприемник запроектирован неразрезным. С целью снижения температурных напряжений стены его выше отметки пола машзала разрезаны вилочными швами;

шесть ниток напорных трубопроводов из сборных железобетонных элементов из 17 секций каждая длиной 40 м, двух компенсаторных секций. Диаметр трубопроводов 7,5 м, толщиной стенок 0,4 м. Каждая секция опирается на 12 свай диаметром 1,0 м и глубиной 10 — 20 м;

здание ГАЭС высотой 50,0 м, шириной по основанию вдоль потока 72,6 м и длиной 145,0 м. Здание без температурно-осадочных швов, с замыкающим блоком;

низовая плотина намывная с донным водовыпуском, максимальной высотой 23 м, длиной по гребню 1 км, с заложением верхнего откоса 1 : 3,5 и 1 : 12 и низового — 1 : 2,5 и 1 : 7;

верховая плотина насыпная, с поверхностным водосливом, высотой 10 м, длиной по по гребню около 200 м.

Инженерно-геологические условия строительства и эксплуатации сооружений Загорской ГАЭС оцениваются как особо сложные вследствие сочетания неблагоприятных факторов:

резко расчлененного древне погребенного рельефа и, в частности, наличия переуглубленной долины р. Куньи, врезанной на 100 м ниже современного русла;

присутствия в основании склона высоко дисперсных глинистых пород (зеленых глин) с низкими показателями сопротивления сдвигу, проявляющих свойства ползучести;

наличия нескольких водоносных горизонтов подземных вод; широкого развития древних смещений гравитационного ледникового образования.

В основании водоприемника и подпорных стенок I яруса залегают моренные суглинки, ниже которых залегают прослойки мягкопластичных «зеленых глин», а затем песка «сеномановского горизонта», подстилаемого «паромоновскими глинами». В основании здания ГАЭС лежат разнозернистые глинистые пески с резкими включениями гравия и частыми глинистыми прослойками. Сложные гидрогеологические условия района расположения сооружений ЗГАЭС были учтены при проектировании.

При разработке сооружений ГАЭС был принят ряд новых решений:

фундаментные плиты водоприемника и здания станции без разрезки температурно-осадочными швами;

бесфильтровые плиты крепления откосов дамб верхнего бассейна с анкировкой плит на откосе;

плоские дренажи под фундаментальными плитами подпорных стен из пористого бетона, площадные дренажи дамбы верхнего бассейна и подпорных стен большой протяженности;

сталежелезобетонные сборно-монолитные напорные трубопроводы внутренним диаметром 7.5 м на свайном основании;

отсутствие горизонтального противофильтрационного покрытия ложа верхнего бассейна;

отсутствие температурно-осадочных швов в здании водоприемника и станции.

В процессе возведения сооружений ГАЭС возникли четыре оползневых проявления, частично инцинированных нарушениями проекта и правил производства земляных работ. Из них два правобережных и левобережный «Северный» удалось ликви-

ровать путем выполнения мероприятий (разборка оползающих грунтов, уплотнение нависающих откосов с пригрузкой удерживающих частей склона, создание дренирующих и водоотводящих систем). Значительно более трудной оказалась задача стабилизации и обеспечения устойчивости левобережного оползня «Южный». Институт Гидропроект был разработан комплекс противооползневых мероприятий, который включал:

изменение компоновки правобережного примыкания дамбы верхнего бассейна к водоприемнику, позволившее сместить дамбу вверх по склону в зону с повышенными показателями прочности основания; устройство в средней части склона призмы; отсыпку над упорной призмой по склону до стыковки с ограждающей дамбой верхнего бассейна; контрбанкета высотой до 10 м; дренирование всей толщи моренных суглинков с помощью 69 скважин вертикального дренажа диаметром 1020 мм и глубиной порядка 20 м. (дренажная завеса).

Взаимовязанные наблюдения, выполненное в процессе первого наполнения верхнего бассейна (декабрь 1987 г.), позволили выявить ряд отклонений в работе сооружений ГАЭС от проектных предположений. Были отмечены значительные протечки в межсекционных швах трубопровода 1. Выявлены протечки воды в примыканиях подпорных стен к левобережному и правобережному устоям водоприемника. Расход воды, фильтрующейся через шов между левобережным устоем и левобережной подпорной стенкой, составил 0,6 – 0,8 л/сек. через шов в правобережном примыкании 1 – 3 л/сек. При подъеме воды до отм. 256,0 м. начали фильтровать швы между водоприемником, правыми и левыми подпорными стенками второго яруса. Отмечен подъем пьезометрических уровней в песочно-галечниковых линзах под правобережной дамбой. Были зафиксированы превышающие проектные значения давления под понуром водоприемника. На основании результатов мониторинга было принято решение об опорожнении верхнего бассейна и выполнении работ (восстановление шпонки между понуром и фундаментной плитой водоприемника, усиление конструкции защитных кожухов на межсекционных швах трубопровода и др). После выполнения ремонтных работ в июле 1988 г. было произведено вторичное заполнение верхнего бассейна.

Новизна проектных решений и сложные гидрологические условия потребовали разработки системы контроля за безопасностью оснований сооружений Загорской ГАЭС в период их строительства и эксплуатации.

Натурные наблюдения и исследования на ЗГАЭС имеют особенности по сравнению с наблюдениями на ГАЭС. В задачи наблюдений, кроме обеспечения безопасной эксплуатации, входит проверка эффективности принятых решений по новым вопросам проектирования и их возведения. Плотины и дамбы из грунтовых материалов находятся под действием часто и быстро меняющегося в значительных пределах напора воды. Естественно, крепления верховых откосов, противофильтрационные и дренажные устройства работают в более тяжелых условиях, чем на плотинах ГАЭС. Кроме того, в основании сооружений залегают слабые грунты. Положение усугубляется большим (более 100 м) перепадом высот оснований сооружений. Для обеспечения безопасности эксплуатации сооружений ГАЭС и их основания были оснащены дистанционной и геодезической контрольно-измерительной аппаратурой, а также аппаратурой для фильтрационных наблюдений. Первоначальный проект размещения КИА в процессе возведения сооружений корректировался из-за непредвиденных обстоятельств по отдельным сооружениям (падение верховых подпорных стен водоприемника с прилегающими к ним участками дамбы верхнего бассейна, осадки отдельных секций напорных трубопроводов, значительно превышающие проектные величины напряжения в арматуре опорных консолей компенсаторных секций превышающие напряжения текучести, оползневые процессы склона «Южный»), потребовалась существенная корректировка проекта размещения КИА. В разработке проекта размещения КИА и программ наблюдений и исследований, кроме автора, принимали участие от ОАО «НИИЭС»: к.т.н. Царев А.И., к.т.н. Ронжин И.С., Каныгин Л.Е., Шехтер Е.М., Гальперина Л.П., от Института Гидропроект: Березинский С.А., к.т.н. Карлсон А.А., к.т.н. Юдкевич А.М.

Существенное развитие сети КИА на сооружениях Загорской ГАЭС обусловлено следующими причинами:

- сложные и недостаточно изученные при изысканиях инженерно-геологические условия строительной площадки;
- недостаточный опыт проектирования и возведения подобных сооружений в нашей стране;
- недостатки качества строительных работ и авторского надзора, приводящие к выходу из строя или уничтожению установленной КИА.



Всего на сооружениях ГАЭС установлено около 2100 единиц КИА. Программой наблюдений было предусмотрено осуществление контроля за:

осадками сооружений с помощью поверхностных марок, рабочих и фундаментальных реперов;

горизонтальными смещениями водоприемника, здания станции, склона напорных трубопроводов, склона «Южный» с помощью визирных марок, сдвигомеров СГС;

относительными вертикальными перемещениями (осадками) фундаментных плит водоприемника, здания станции и ниток трубопроводов с помощью гидростатических систем (ПУЖС);

контактными напряжениями по подошвам фундаментальных плит здания станции, водоприемника с помощью измерителей контактных напряжений (ИКН);

напряжениями в арматуре фундаментных плит здания станции, водоприемника, подпорных стен, сталежелезобетонных секций трубопроводов с помощью преобразователей силы (ПСАС);

раскрытием строительных швов в фундаментных плитах водоприемника, здания станции, подпорных стен с помощью преобразователей линейных перемещений (ПЛПС);

параметрами фильтрационного режима (пьезометрические уровни, противодавление, фильтрационные расходы и др.) с помощью преобразователей давления (ПДС), пьезометров, расходомеров.

На ГАЭС была создана информационно-диагностическая система оперативного контроля за состоянием сооружений, предусматривающая проведение взаимоувязанных регулярных наблюдений, обработку и анализ полученных данных, оценку состояния сооружений, выдачу рекомендаций и принятия мер по обеспечению надежности сооружений.

Были разработаны критерии безопасности для диагностических показателей состояния сооружений.

Наблюдения и исследования на сооружениях ЗГАЭС в период строительства и эксплуатации позволяли выявлять аномалии в работе сооружений и своевременно проводить ремонтно-восстановительные работы.

В осуществлении мониторинга гидросооружений ГАЭС, кроме автора, принимали участие: к.т.н. Ронжин И.С., к.т.н. Царев А.И., Каныгин Л.Е., д.т.н. Иващенко И.Н., Гальперина Л.П., к.т.н. Лобач А.А., к.т.н. Дидович М.Я., Суриков Е.А., Мирзак Ю.Е., Мирзак Е.М., д.т.н. Белостоцкий А.М., Галактионов В.Г., Садовская Н.С. (ОАО НИИЭС), Магрук В.И., к.т.н., Черненко В.Н., Яновский А.П., Хуторянская Г.Н., Осадчая Е.Л., Климентьев В.С., Трубило Е.Н. (ЗГАЭС).

Ниже приводятся основные результаты мониторинга гидро-сооружений ЗГАЭС за девятнадцатилетний период эксплуатации.

*По дамбе верхнего бассейна*

Опыт эксплуатации верхнего бассейна позволяет оценить состояние ограждающих дамб и их оснований. Конструкция безфильтрового крепления верхнего откоса дамбы первой очереди, выполненная из железобетонных плит толщиной 20 см. с анкерными плитами, подвержена трещинообразованию и постоянному разрушению от температурных воздействий и льда. Они работают как дрена, снимая противодавление под плитами крепления. Поэтому, в плитах крепления аналогичных сооружений ГАЭС, рекомендуется предусматривать дренажные отверстия.

В связи с перерывом во времени возведения дамбы верхнего бассейна I и II очереди, величины измеренных осадок неравномерны по длине дамбы. Различные по величине и характеру изменения их во времени по длине дамбы свидетельствуют о неравномерном уплотнении дамбы и различии свойств грунтов основания. Максимальная величина осадки основания дамбы верхнего бассейна в примыкании к водоприемнику с начала наблюдений составляет 284,4 мм и практически равна осадке водоприемника.

Фильтрационный режим в дамбе первой очереди верхнего бассейна в целом стабилизировался и, в основном, зависит от режима работы ГАЭС. Исключение составляет положение пьезометрических уровней в горизонтальном дренаже дамбы первой очереди на ПК 78 + 00,88 + 00,1 + 00, где они превышают кровлю горизонтального дренажа. На участке дамбы между ПК 74 ПК 80 + 00 наблюдается выклинивание воды на отм. 263,5 м. Для выявления причин намокания откоса в пределах указанных границ на низовом откосе и гребня установлены дополнительные пьезометры, по которым проводятся учащенные наблюдения. При бурении скважин под пьезометры с отбором проб грунта установлено, что одной из причин намокания низового откоса является наличие на отм. 263,5 – 264,0 м. прислойки грунта с повышенным коэффициентом фильтрации. Полной информации о фильтрационном режиме в теле и основании дамбы второй очереди пока из-за небольшого периода наблюдений нет.

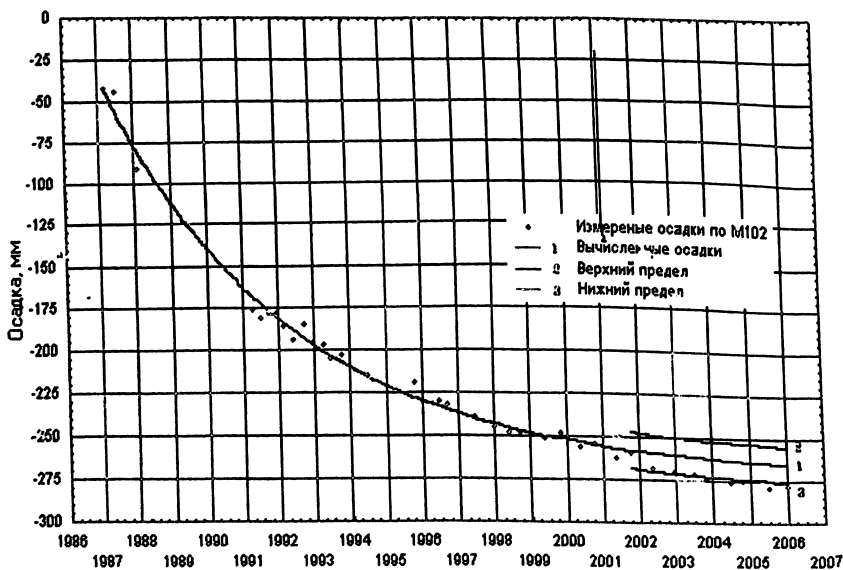
*По водоприемнику с подпорными стенками*

Результаты натуральных и поверочных расчетов показывают, что в режиме нормальной эксплуатации состояние водоприемника отвечает проекту. Перемещения водоприемника не пре-

вышают проектных величин (осадки) или приближаются к ним (горизонтальные перемещения) (рис. 1,2). К аномалиям в работе водоприемника, снижающим надежность сооружения относятся:

трещины в понуре и фундаментной плите в зоне мокрой: потерны водоприемника, появившиеся в результате неравномерных осадок левобережного устоя и центральной части водоприемника, через которые наблюдались выносы грунта в мокрую потерну. Не исключено, что эти процессы послужили одной из причин появления наклонных (косых) трещин в напорной стене левобережного устоя водоприемника. Для установления причин появления трещин в напорной стене устоя водоприемника необходима организация наблюдений за их раскрытием;

незатухающие осадки левобережных подпорных стен второго яруса с интенсивностью их до 14,4 мм/год, что может быть связано с суффозинными процессами в левобережном примыкании (рис. 3).



$$y = -271.0 + 369.0 \cdot \exp(0,195 \cdot T) \pm 10,5, \text{ где } T - \text{время, годы}$$

Рис. 1. Осадки фундаментной плиты водоприемника

Повышенные (выше проектных) значения измеренных пьезометрических уровней в основании и в обратных засыпках подпорных стен первого яруса при сработках верхнего бассейна не обеспечивают, по данным расчетов, их устойчивость при аварийной сработке верхнего бассейна.



**По напорным трубопроводам с компенсаторными секциями**

Напряженное состояние секций трубопроводов по данным натурных наблюдений отвечает проекту. Тем не менее, многолетними натурными наблюдениями выявлены отклонения в работе отдельных конструктивных элементов от проекта.

Значительно превышающие проектные значения (30 мм) осадки секций 5 – 6 трубопровода 1 (150мм) (рис. 4). Осадки секций были вызваны нарушениями структуры грунтов основания свай от динамических нагрузок при монтаже сборных элементов секций трубопровода и нарушениями сцепления свай с моренным грунтом этой зоны. По рекомендации ОАО НИИЭС, «Институт Гидропроект» разработал, а Дирекция ЗГАЭС осуществила усиление фундаментов секций трубопровода в зоне шва 5 – 6.

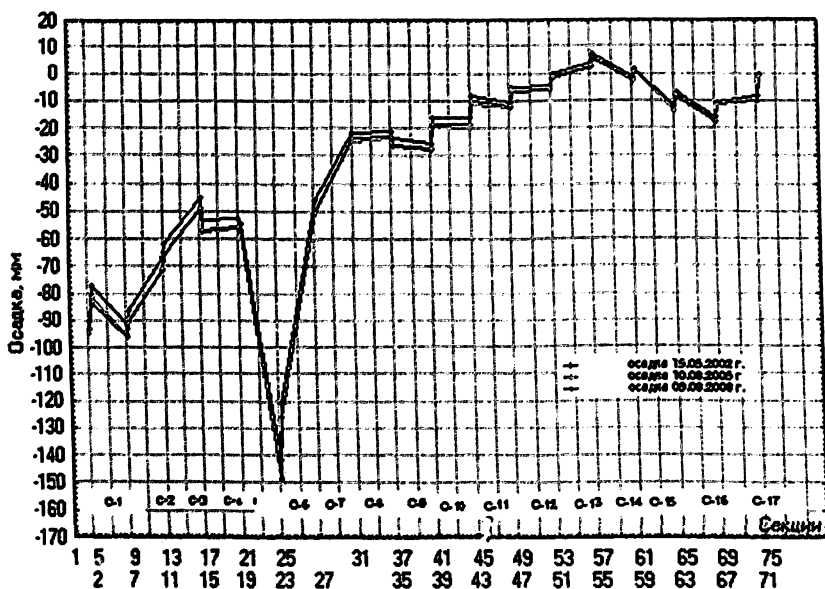


Рис. 4. Осадки секций трубопровода №1 с 1984 г. № марок

Отмечены нарушения герметичности сварных швов и дефектов в металлической облицовке внутренней поверхности напорных трубопроводов с выходом воды через трещины на наружную поверхность. В зимний период наблюдалось нарушение защитного слоя по низу отдельных секций трубопровода. Необходимо устранить протечки в сварных швах и дефекты в металлической облицовке и выполнить защиту наружной бетонной поверхности трубопроводов, как это было предусмотрено проектом.

Наблюдалось нарушение крепления склона трубопровода из-за недостаточно надежного отвода поверхностных вод и отсутствия дренажей.

Не допустимо (более 1 мм) раскрытие наклонных трещин, значение напряжений в крайних от торцов секций стержнях наклонной арматуры консолей компенсаторных секции КС-18 достигли предела текучести. Рекомендуется устройство дополнительных опор по низу компенсаторных секций КС-18-1 КС-18-4.

Превышение критериальных значений отклонений от вертикали положения подвижных опор компенсаторных секций КС-01, КС-02.

#### *По зданию ГАЭС*

Результаты натурных наблюдений на здании ГАЭС свидетельствуют, что значения показателей напряженно-деформированного состояния (осадки, горизонтальные перемещения, контактные напряжения, напряжения в арматуре, раскрытие межблочных швов) и показателей фильтрационного режима (пьезометрические уровни в основании, градиенты напора) не превышают проектных значений.

Наблюдается лишь наклон здания в направлении левого берега из-за очередности возведения блоков станции без превышения проектной величины осадки.

#### *По низовой плотине*

Из-за нарушений технологии возведения низовой плотины с ядром, после поднятия отметки уровня воды нижнего бассейна до 162,5 м., на низовом откосе на высоких отметках было отмечено высачивание воды. По проекту реконструкции плотины в 2001 году был выполнен комбинированный дренаж на низовом откосе в пределах отметок 156,0 – 158,0 м, откос уположен до заложения 1 : 5 отсыпкой песчано-гравийной смеси. Кроме того, на участке с ПК – 11 по ПК – 11+50 была заложена локальная нитка комбинированного дренажа из каменной наброски с отм. 145,0 по 148,0 м.

Выпуски из скважин вертикального дренажа были выведены в отдельные смотровые колодцы. После реконструкции низовой плотины, положение пьезометрических уровней не превышало критериальных значений. Исключение составили пьезометрические уровни по пьезометрам, Н-22, 23, 52 и 57, установленным на ПК 10 12, где с 2002г. наблюдается повышение пьезометрических уровней с превышением их критериальных значений. Причина подъема пьезометрических уровней пока не

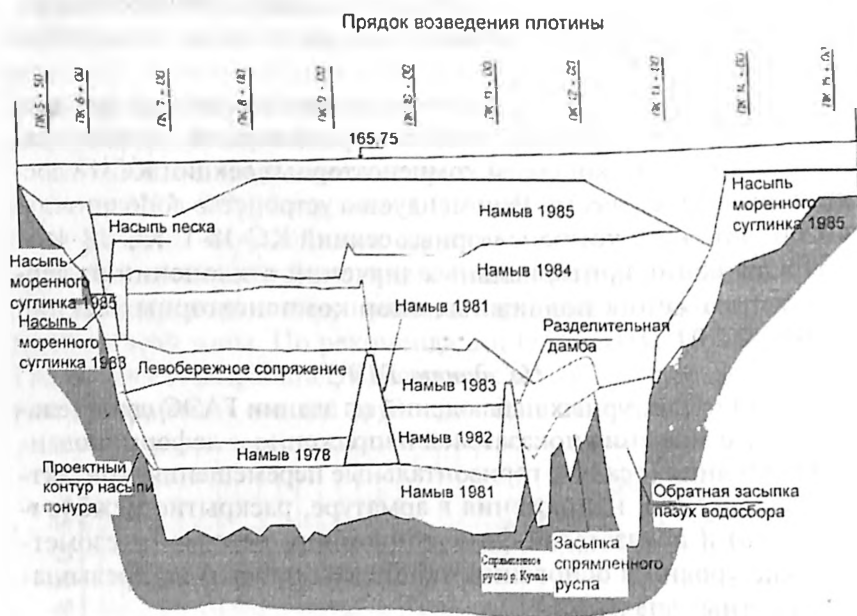


Рис. 5. Низовая плотина. Продольный разрез

установлена. На рис. 5 приведен порядок возведения низовой плотины. Нарушения, допущенные в ходе возведения плотины, могли оказать негативное влияние на положение пьезометрических уровней в теле плотины. Отрицательное влияние на устойчивость низового откоса может быть оказано из-за любого незапланированного повышения отметки воды в нижнем бассейне без специальных мероприятий по снижению пьезометрических уровней в теле плотины.

#### По склону «Южный»

Наблюдаются затухающие горизонтальные смещения склона. За период эксплуатации максимальные значения горизонтальных смещений склона достигли 19,0 мм в районе трубопровода в направлении нижнего бьефа.

Изменение конструкции способа водоотвода из скважин вертикального дренажа (демонтаж эжекторной установки, осуществлявшей принудительную откачку вод из скважин вертикального дренажа, углубление скважин до сеноманского водоносного горизонта для самотечного слива воды из моренной толщи) значительно не повлияло на дренирование морены. По данным из-

мерений фильтрационные расходы составляют правой ветви за-  
весы 0,05 – 0,06 л/с, левой ветви 0,15 – 0,16 л/с. Недостаточно  
эффективна работа вертикального дренажа.

### **Выводы**

1. Особенности проекта, возведения и эксплуатации гидро-  
сооружений Загорской ГАЭС (сложные инженерно-геологиче-  
ские условия, большие перепады высот в расположении со-  
оружений, новизна конструктивных решений) определили  
схему размещения контрольно-измерительной аппаратуры с  
учетом этих особенностей.

2. Почти двадцатилетний опыт эксплуатации гидросооруже-  
ний Загорскоц ГАЭС показал, что установленная по проекту  
контрольно-измерительная аппаратура позволяет осуществить  
требуемый нормативными документами контроль за состояни-  
ем сооружений. Накопленный опыт выполнения мониторинга  
и использование новой контрольно-измерительной аппарату-  
ры на сооружениях первой в Российской Федерации ГАЭС мо-  
жет быть использован при проектировании Загорской ГАЭС-  
II и других гидроаккумулирующих электростанций.

3. Напряженно-деформированное состояние и фильтраци-  
онный режим сооружений и их оснований отвечает проектным  
предположениям, за исключением аномалий в работе сооруже-  
ний, отмеченных выше.

4. Анализ значений качественных и количественных диагнос-  
тических показателей состояния сооружений свидетельствует о  
том, что уровень безопасности сооружений находится в пределах  
от нормального до предельно допустимого.



## **АППАРАТ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СОСТОЯНИЕМ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

*Лобач А.А., кандидат техн. наук, ОАО «НИИЭС»*

Трудно себе представить современную практику диагностирования состояния гидротехнических сооружений без использования методов математической статистики, позволяющих анализировать степень влияния различных факторов на поведение конструкций, создавать прогнозные регрессионные модели и назначать критерии оценки состояния сооружений в соответствии с требованиями закона «О безопасности гидротехнических сооружений» [1, 2]. Совершенствованию аппарата математико-статистических исследований результатов наблюдений за показателями работы сооружений служит настоящая работа.

Аппарат регрессионного анализа используется при создании прогнозной модели, которая используется как в качестве фильтра, отсеивающего из наблюдаемых случаев эксплуатации те, которые отклоняются от нормальных, так и инструментом анализа аномального поведения сооружений.

Аппарат регрессионного анализа позволяет методами математической статистики определить форму (уравнение регрессии) и оценить тесноту корреляционной связи измеренного показателя и внешних воздействий. Статистическая модель работы сооружения представляет собой систему регрессионных уравнений, связывающих между собой характеристики реакции сооружения на внешние воздействия, показатели состояния сооружений, с характеристиками внешних воздействий. Эти зависимости ретроспективно отражают все наблюдавшиеся случаи эксплуатации, которые считаются нормальными и с высокой достоверностью позволяют прогнозировать нормальное поведение сооружения, т. е. предсказывать, какие величины показателей его работы должны быть зафиксированы измерениями при данном сочетании внешних воздействий.

Аппарат регрессионного анализа состоит из трех основных частей, которые служат:

- подбору состава переменных уравнения регрессии, формированию регрессионной матрицы;
- вычислению параметров регрессии;
- представлению результатов вычислений.

Специфика состава регрессионных зависимостей, алгоритмов регрессионного анализа применительно к мониторингу состоя-

ния гидротехнических сооружений заключается в том, что основными факторами, влияющими на статическую работу сооружения, как правило, являются гидростатическое давление воды, температурные воздействия и время.

В качестве факторных показателей, призванных учитывать влияние гидростатического давления воды, в регрессионных зависимостях могут использоваться следующие:

абсолютное или относительное значение гидростатического напора, значение его во второй или третьей степени, наблюдаемые в момент измерения контролируемого показателя;

значения гидростатического напора, наблюдаемые в минувшие периоды времени (с временным лагом), которые отражают запаздывание реакции сооружения на изменение давления гидростатики;

значения гидростатического напора в разные, как правило, сезонные, периоды изменения гидростатического давления: при его росте, снижении, постоянстве. Этими факторными показателями учитывается различная реакция сооружения на гидростатическое давление на разных ветвях его изменения.

Факторными показателями температурных воздействий предпочтительно назначать либо значения температуры, измеряемые в сооружении, либо в случае отсутствия данных измерений значения тригонометрических функций. В случае обнаружения признаков нелинейной работы конструкции используются факторные показатели в виде, например, произведения факторных показателей гидростатики и температуры, отражающие изменение реакции сооружения на гидростатическую нагрузку при разных температурных состояниях.

Временной фактор, связанный, например, с процессами консолидации грунтов основания [3], «последствиями» изменений нагрузки и пр. В качестве факторных показателей используются значения, вычисляемые с помощью временных функций различной формы, таких как логарифмическая, экспоненциальная, степенная и др.

Параметры регрессии рассчитываются для линейных уравнений в предположении стохастического характера и нормальности распределения наблюдаемых случаев эксплуатации. Коэффициенты уравнений регрессии вычисляются методом наименьших квадратов.

Учитывая предназначение уравнений регрессии для прогнозирования, к составу факторных показателей (предикторов) этих уравнений, к характеристикам сходимости между измеренными и вычисленными значениями (коэффициенту множественной

корреляции, критерию Фишера, стандартному отклонению и др.) предъявляются особые требования, которыми руководствуются при создании статистической модели. Одним из основных требований к составу предикторов уравнений регрессии является обеспечение такой величины стандартного отклонения, которая согласовывалась бы с погрешностями измерений и позволяла прогнозировать нормальное состояние сооружений, исключая риск, как первого рода — недооценка опасности, так и второго рода — переоценка опасности контролируемой ситуации [4]. Выполнение этого требования достигается включением в состав уравнений регрессии только значимых предикторов, ошибка коэффициентов регрессии которых меньше, как минимум половины величины самих коэффициентов.

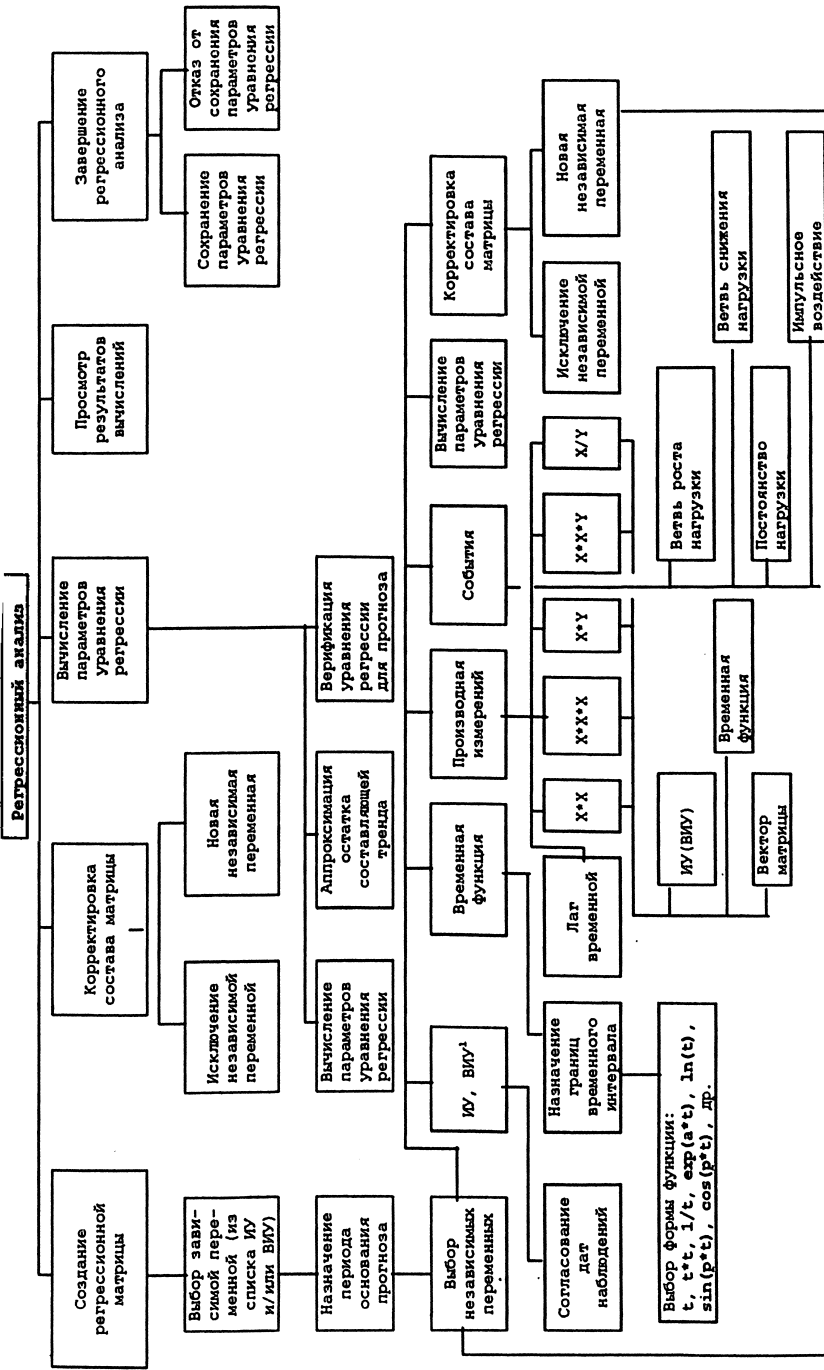
Результаты регрессионного анализа представляются в табличной и графической форме. Принято приводить таблицу коэффициентов регрессии, ошибок их вычисления, частных коэффициентов корреляции, множественного коэффициента корреляции, приведенных коэффициентов регрессии, характеризующих вклад в уравнение регрессии каждого из предикторов.

Графическое представление результатов регрессионного анализа, как правило, состоит во временных графиках измеренных, вычисленных значений анализируемого показателя и значений составляющих уравнения регрессии, среди которых наиболее информативным является график изменения во времени составляющей неучтенных воздействий, т. е. остатка.

Аппарат регрессионного анализа был реализован в DOS-овской редакции в среде СУБД «Paradox4.5» [5]. Функциональная схема этой реализации иллюстрируется на рис. 1. Реализованные алгоритмы отработывались при создании регрессионной модели поведения массивно-контрфорсной плотины Андиганского водохранилища [6], использовались при анализе и диагностировании сооружений ГЭС Табка (Сирия), при создании системы контроля работы сооружений Юмагузинского гидроузла.

Ниже, в качестве примеров использования аппарата регрессионного анализа, приведены прогнозные модели выборочных показателей состояния упомянутых сооружений (рис. 2, 3, 4). Прогноз горизонтальных перемещений гребня секции 24 плотины Андиганского водохранилища, относительно якоря обратного отвеса, производился с помощью регрессионной зависимости:

$$y = 10,63 + 18,6 * h^3 - 2,33 * T_1 + 4,58 * T_2 - 10,1 * h * T_2 + 4,41 * h * \tilde{\sin}(\tilde{t}) + \varepsilon. \quad (1)$$



1 ИУ – показания измерительного устройства; ВИУ – показания виртуального измерительного устройства (вычисленные значения)

Рис. 1.

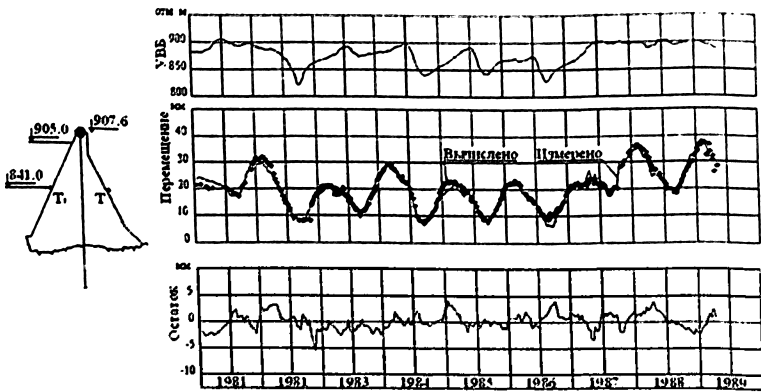


Рис. 2. Аппроксимация регрессионной зависимостью горизонтальных смещений вдоль потока гребня секции 24 Андижанской плотины относительно якоря обратного отвеса

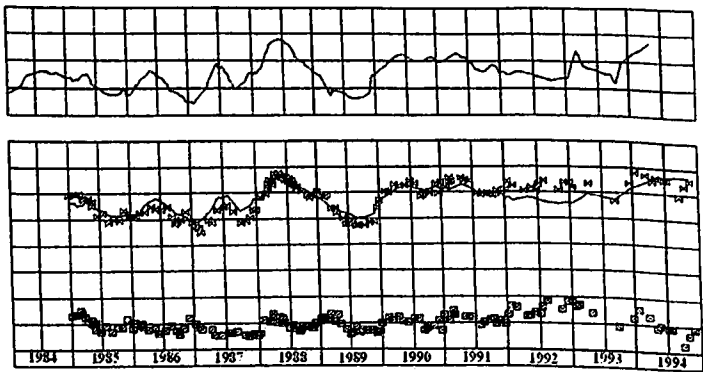


Рис. 3. Аппроксимация регрессионной зависимостью расхода фильтрации через тело и основание левобережного участка плотины ГЭС Табка

Прогнозная модель расхода фильтрации через тело и основание левобережного участка плотины ГЭС Табка описывалась зависимостью (2):

$$y = 125.2 + 149.2 * h + 63.76 * h^{-1} * \ln(t_{92}) + \varepsilon \quad (2)$$

Пьезометрический уровень в основании плотины Юмагузинского водохранилища по показаниям пьезометра ПН-1-4 прогнозировался с помощью регрессионной зависимости (3):

$$y = 216.8 + 6.31 * h + 3.719 * \text{lag}_{287} + \varepsilon \quad (3)$$

где  $y$  — прогнозируемое значение,  $h$  — нормированное значение уровня верхнего бьефа;  $T_1, T_2$  — нормированное значение

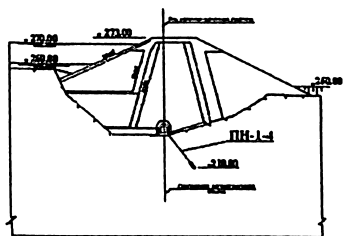
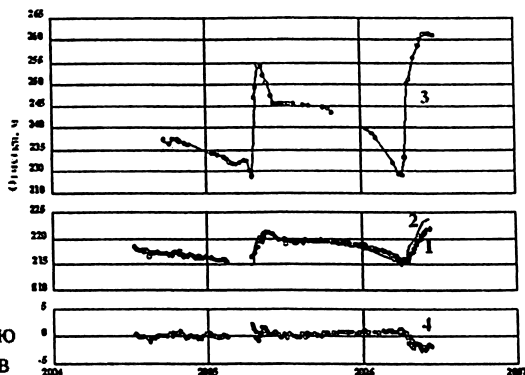


Рис. 4. Аппроксимация регрессионной зависимостью пьезометрического уровня в основании плотины Юмагузинского водохранилища



1 - измерено, 2 - вычислено, 3 - УВБ, 4 - остаток

температуры, измерявшейся соответственно у верховой и низовой граней плотины;  $h^-$  — нормированное значение уровня воды в водохранилище при постоянном (изменение в пределах 15% диапазона) УВБ в течение не менее четверти года;  $t$  — время в месяцах, исчисляемое от начала периода постоянства УВБ;  $lag_{287}$  — факторный показатель, отражающий лаг запаздывания влияния уровня верхнего бьефа, представляющий собой нормированное значение УВБ, наблюдавшееся за 28 суток до даты измерения и осредненное за 7 суток;  $\varepsilon$  — необъясненная часть, остаток, ошибка регрессии.

Параметры, характеризующие качество приведенных зависимостей, приведены в табл. 1.

Следует остановиться на степени достоверности прогноза при использовании приведенных зависимостей. Очевидно, что прогнозная модель пьезометрического уровня в Юмагузинской плотине имеет в основании прогноза недостаточно представительный ряд наблюдений, о чем свидетельствует тенденция увеличения остатка в конце указанного периода (см. рис. 4). Более достоверный прогноз требует наблюдения за состоянием плотины с большим набором случаев ее эксплуатации.

Представляется, что процедуры регрессионного анализа имеют актуальное значение для диагностики состояния гидротехнических сооружений. Однако автор испытывает определенные трудности в воспроизведении этих процедур в современных компьютерных системах, поскольку язык программирования, на котором был реализован представленный алгоритм регрессионного анализа, прекратил свое существование. Очевидна целесообразность включения в состав компьютерных систем аппарата,

Таблица 1

Параметры регрессионных зависимостей

Наименование показателя	Объем выборки	Множественный коэффициент корреляции	Критерий Фишера	Стандартное отклонение остатка
Горизонтальное перемещение Андиганской плотины	269	0,97	18,2	1,6
Расход фильтрации ГЭС Табка	268	0,93	7,2	10,9
Пьезометрический уровень в Юмагузинской плотине	97	0,98	2429	1,4

позволяющего, как формировать регрессионную матрицу для выполнения регрессионного анализа, так и вычислять прогнозные значения, пользуясь разработанными регрессионными зависимостями. Расчеты параметров регрессионной зависимости подготовленной матрицы целесообразно выполнять путем подключения вычислительного аппарата системы STATISTICA [7].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений»** /Собрание законодательства Российской Федерации. №30. 1997.
2. **Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений.** РД 153-34.2-21.342-00 /Департамент научно-технической политики и развития РАО «ЕЭС России». М. 2000
3. **Лобач А.А.** Построение и анализ регрессионной прогнозной модели осадок гидротехнических сооружений на нескальных основаниях. //«Безопасность энергетических сооружений». Научно-технический и производственный сборник. М.: ОАО «НИИЭС». Вып. 12. 2003.
4. **Monitoring of Dams and their Foundations. State of the Art.** International Commissionnon Large Dams, Bulletin N 68. Jakarta. Indonesia. 1986.
5. **Фрадкин Б.В., Бердичевский Г.Ю., Лобач А.А., Поляк Л.Е., Северов А.П., Радкевич Д.Б.** Компьютерная система информационного обеспечения безопасности гидросооружений БИНГ. /РосАПО, Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 930072 от 01.12.1993.
6. **Лобач А.А.** О методах диагностики состояния высокой массивно-контрфорсной плотины. //Сборник научных трудов Гидропроекта. Вып. 152. («Состояние, реконструкция и ремонт гидросооружений»). 1993.
7. **Боровиков В.П., Ивченко Г.И.** Прогнозирование в системе STATISTICA Windows. Основы теории и интенсивная практика на компьютере. 2-е изд., перераб. И доп. М.: «Финансы и статистика». 2006.

## ОПЫТ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДПОРНЫХ СТЕН

*Лобач А.А., кандидат техн. наук, ОАО «НИИЭС»*

В 2005 году ушел из жизни один из организаторов, основоположников отечественной школы натуральных исследований состояния энергетических сооружений кандидат технических наук Александр Иванович Царев. Его памяти посвящена настоящая публикация

Проектировщики, строители, исследователи довольно часто встречаются с проблематикой широко распространенных конструкций подпорных стен. Практика показывает, что далеко не во всех случаях эти встречи благополучны. Поэтому представляется целесообразным периодическое напоминание об опыте, накопленном в этой области за предыдущие годы.

НИСом Гидропроекта в 60 – 70-е годы прошлого века велись активные работы по изучению работы подпорных стен различного назначения. Исследования выполнялись, как в натуре с использованием соответствующих методов и средств измерения, так и в лабораториях НИСа с использованием математического, центробежного моделирования и пр. Большой вклад в проведение этих исследований внесли к.т.н. Щербина В.И., Гальперин И.Р., инж. Блинов И.Ф., Бурмистров М.А., Киладзе А.В., Котенков Ю.К., Лавров Б.А., Столяров Б.К., Фельдман А.И., Шехтер Е.М. и др. Пристальное внимание к поведению стен было связано с продолжением строительства гидроузлов на равнинных реках и со случаями ненормального поведения стен шлюзов канала им. Москвы, Воткинской ГЭС и др. Перечень стен, приведенный в табл. 1, показывает, что поведение около половины исследованных стен имело отклонение от нормального.

Исследования проводились в двух направлениях. Одно было посвящено совершенствованию методов и средств изучения, а второе, непосредственно, исследованию напряженно-деформированного состояния конструкций. Одним из существенных достижений первого направления следует считать усовершенствование методов и средств измерения параметров работы стен в натуральных условиях. Были проанализированы результаты измерения давления грунта, проведенные на ряде объектов с помощью грунтовых динамометров (ГД). На основе статистичес-



Таблица 1

Перечень подпорных стен

№ пп	Наименование стены <sup>1</sup>	Высота от верха фундаментной плиты, м	Толщина в сопряжении с фундаментной плитой, м	Толщина на по верху, м	Высота засыпки от верха фундаментной плиты, м	Грунт и способ засыпки	Год окончания строит.	Объемный вес грунта засыпки, т/м <sup>3</sup>
1	Шлозы №1, 2, 6 канала им. Москвы	15,5-19,8	5,0-6,0	1,	15,5-19,8	Смесь суглинков, супесей, песка, без уплотнения	1937	2,00
2	Устой водосброса Широковской ГЭС	34,5	5,0	1,3	34,5	Кладка камня	1948	
3	Шлоз Волжской ГЭС им. В.И.Ленина	22,8	6,5	1,	22,8	Песок, отсыпка, намыв	1957	1,70
4	Шлоз Волжской ГЭС им. ХХII съезда КПСС	20,5	6,0	1,1	20,5	Песок, отсыпка, намыв	1961	1,58
5	Шлоз Воткинской ГЭС	28,0	5,0	1,0	16,5	Песок, отсыпка, намыв	1963	1,80
6	Правая стена секции 4 шлоза Павловской ГЭС	38,0	16,0	2,5	25,0	Земляная плотина	1961	
7	Шлоз Саратовской ГЭС	21,2	4,0	1,1	21,2	Песок, отсыпка, намыв	1970	1,57
8	Шлоз Киевской ГЭС	17,6	5,0	1,8	17,6	Песок, отсыпка	1968	1,60
9	ЛН-3 Плявиньской ГЭС	14,6	3,9	1,0	10,0	Гравел.-песч. смесь, отсыпка	1967	1,98
10	М-1-2 Плявиньской ГЭС	34,0	25,0	25,0	Перем.	Гравел.-песч. смесь, отсыпка	1967	1,79
11	Шлоз Нижнекамской ГЭС	26,0	5,0	1,0	20,50	Песок, замыв и отсыпка с трамбованием	1980	
12	ЛВ-1, ЛВ-2 Загорской ГЭС	19,8	4,0	1,0	19,75	Суглинок, отсыпка с динамическим уплотнением	1980	

<sup>1</sup> Жирным шрифтом выделены стены, состояние которых потребовало принятия мер по усилению контроля за их работой и/или

кого анализа большого объема данных измерений дана оценка вариации измеренных значений и подтверждена их достоверность. Показано, что случайная погрешность измерения связана с размерами измерительной площади датчиков, соизмеримой с параметрами неоднородности грунта, и достигает  $\pm 40\%$  [6]. Рекомендовано использование для измерения нормальной и тангенциальной составляющих давления грунта опорных плит и тангенциальных устройств (ТУ), измерительная площадь которых на порядок больше площади мембранных ГД [5, 8]. Указанная рекомендация была максимально реализована при организации наблюдений за работой шлюза Нижнекамской ГЭС, на одной из стен которого смонтирована полоса ТУ на высоту засыпки. Для изучения напряженно-деформированного состояния шлюза Нижнекамской ГЭС в натуральных условиях использовались, также, обратные отвесы в стенах, гидростатический нивелир со струнными датчиками уровня жидкости в днище [2], эластичные датчики напряжений грунта в засыпке [4] и пр. Однако, система наблюдений за работой шлюза Нижнекамской ГЭС, к сожалению, еще не нашла своих исследователей.

*Результаты исследований второго направления.* Напряженно-деформированное состояние стен характеризуется периодическими сезонными перемещениями, размах которых составлял 23 мм для верха стены Волгоградского и 40 мм для Воткинского шлюзов. Указанные перемещения вызваны изменениями температурного состояния стен, проиллюстрированного на рис. 1. Представленные показатели температурного режима стены указывают, в частности, на промораживание тыловой грани стены на глубину до 10 м, что, в некоторой степени, лимитирует применение в качестве засыпки глинистых грунтов, особенно при переменном уровне грунтовых вод. Замораживание такого грунта может приводить к увеличению активного давления зимой. Кроме того, установлено, что коэффициент бокового давления суглинистого грунта в водонасыщенном состоянии может достигать 0,86, в то время, как максимальный коэффициент бокового давления песчаного грунта не превышает 0,42 [14]. Указанный аспект послужил обоснованием замены суглинистого грунта засыпки стен шлюзов канала им. Москвы на песчаный [12], а также упоминания в п. 2.3 СНиП [1].

Исследованиями, наряду с периодическими сезонными изменениями, отмечен рост нормального давления грунта на стены в процессе возведения и первых лет эксплуатации [14], свя-

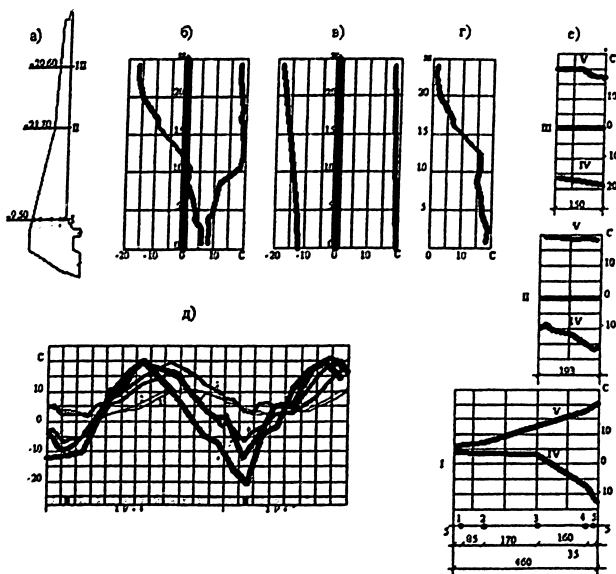
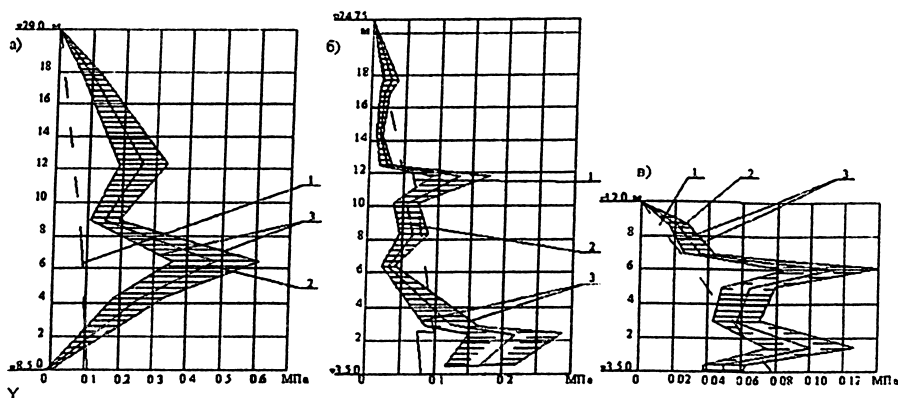


Рис. 1. Температура бетона стены шлюза Воткинской ГЭС а) створы термометров I, II, III; б), в) температура тыловой, лицевой грани в 1965 г.; IV, V – минимум (зима), максимум (лето); г) максимальные перепады по толщине стены; д) температура в точках 1-5 створа I; 6 – температура наружного воздуха; е) экстремальная температура по створам

занные, в частности, с процессом доуплотнения грунта засыпки при летнем температурном навале стены на грунт. Однако следует признать, что из-за непродолжительности сроков проведения исследований не установлены закономерности роста давления в долгосрочной эксплуатации.

Нормальное давление грунта на стены, по данным измерений (рис. 2) имело пилообразный характер распределения по высоте, что связано не только с вышеупомянутой погрешностью измерения, но и с этапами отсыпки грунта. Именно учет поэтапности возведения стен и засыпки в расчетных исследованиях, т. е. воздействий строительного периода, позволял получать близкое совпадение результатов расчета с данными натурных измерений [11], хотя, СНиПом [1] подпорные стены, в основном, рассматриваются как мгновенно возведенные сооружения.

Кроме поэтапности возведения стен, к результатам строительных воздействий следует отнести нарушения монолитности стенок по межблочным швам, зафиксированные почти на всех стенах где на пересечении со швами были смонтированы преобразователи силы арматурные (рис. 3). Как показали расчетные исследо-



**Рис. 2.** Нормальное давление грунта на подпорные стенки  
 а) стенку шлюза Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС на 25.07.69;  
 б) на правую стенку шлюза Саратовской ГЭС на 15.07.70;  
 в) на стенку ЛН-3 Плявиньской ГЭС на 15.08.69; 1 — расчетное по СНиП, 2 — среднее измеренное; 3 — доверительный интервал при точности оценки 31% и надежности 0,8

вания, образование указанных трещин может являться результатом термонапряженного состояния бетонной кладки, а рост измеренных напряжений в рабочей арматуре тыловой грани — результатом роста нагрузки от давления грунта засыпки [7, 9]. Учет этих воздействий при расчетном обосновании конструкции, встречает определенные трудности. Стена представляет собой конструкцию, подвергшуюся трещинообразованию, воспринимающую суммарное воздействие активного и реактивного давления грунта (от температурного навала). Трудности расчета напряженно-деформированного состояния описанной конструкции связаны, в частности, с элементами нелинейности в работе стены, которые ставят под сомнение правомерность использования принципа независимости действия сил, лежащий в основе расчетного обоснования проектируемых сооружений.

Возвращаясь к перечню стен табл. 1, можно отметить, что проблемы в двух из пяти стенах с аномальным поведением (стены шлюза Воткинской ГЭС и стены Загорской ГАЭС) наблюдались именно в строительный период. Кроме того, две стены с аномальным поведением являются сопрягающими с плотинами из местных материалов, требования к грунту которых, очевидно, могут входить в противоречие с требованиями к грунту засыпки подпорных стен. Указанное противоречие не нашло отражения в нормах на проектирование подпорных стен. С этой точки зрения

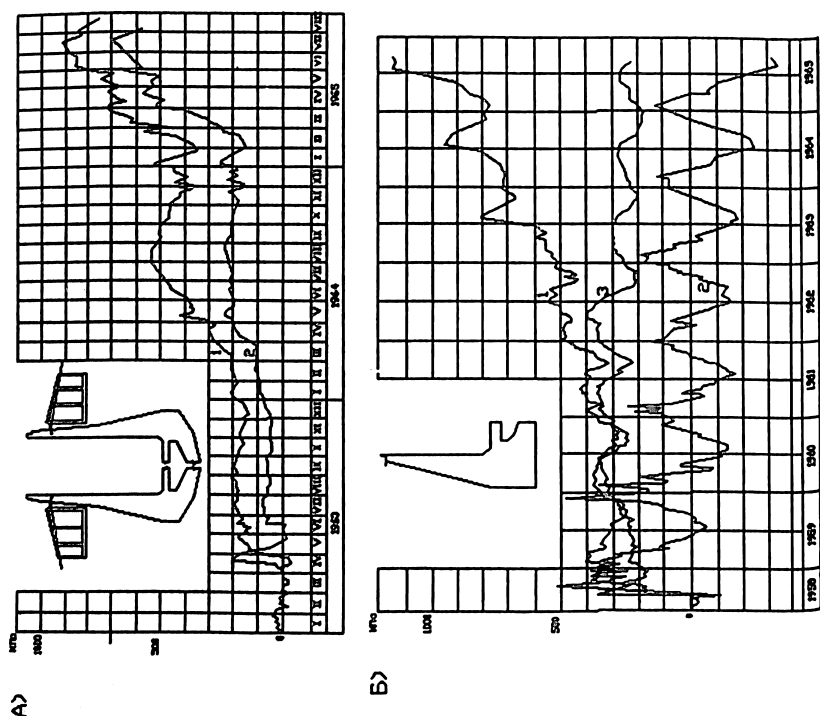


Рис. 3. Напряжения в арматуре стенок шлюза Воткинской и Волжской ГЭС: А) стенки Воткинской ГЭС: 1 — у тыловой грани левой стенки на отм. 10,2 м, 2 — то же у правой стенки на отм. 13,5 м; Б) стенка Волжской ГЭС: 1 — в блочном шве у тыловой грани на отм. 12,0 м, 2 — то же у лицевой грани, 3 — у тыловой грани на отм. 17,6 м

представляется поучительной история стены сопрягающего устоя водосброса Широковской ГЭС (рис. 4а). Каменно-набросная плотина здесь в примыкании к стене выполнена в виде сухой кладки крупногабаритного камня, опирающегося на ступени тыловой грани стены. Перемещения стены, наряду с периодическими сезонными изменениями, имели линейную необратимую составляющую роста с интенсивностью более 2 мм/год (рис. 4б). Очевидно, рассмотренный случай является предельно неблагоприятным в ряду подпорных стен. В абсолютном большинстве остальных случаев мы имеем дело в той или иной степени затухающими процессами роста перемещений (напряжений в арматуре, давления грунта и пр.). Представляется, что интенсивность роста (затухания роста) указанных показателей определяется жесткостью засыпки и стены. С этой точки зрения следует рассматривать и подпорные стены, примыкающие, например, к

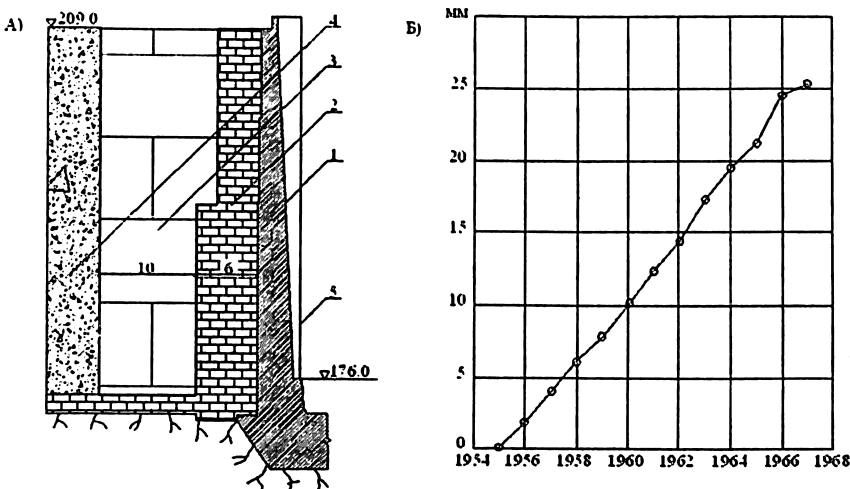


Рис. 4. Перемещение сопрягающего устоя водосброса Широковской ГЭС в сторону водобоя А) схема сопряжения плотины с водосбросом 1 – стена сопрягающего устоя; 2 – сухая кладка камня, 3 – кладка камня с подбором, 4 – каменная наброска, 5 – нить отвеса, Б) показания отвеса

призмам каменно-набросных плотин, уплотнение которых при отсыпке может создавать жесткости, приближающиеся к жесткости кладки камня. Однако, указанные проблемы пока недостаточно изучены из-за относительной непродолжительности проведенных исследований.

### Выводы

Исследования напряженно-деформированного состояния подпорных стен, проводившиеся НИСом Гидропроекта в 60-70-е годы прошлого века под руководством и при участии к. т. н. А. И. Царева, доказали целесообразность использования для измерения давления грунта в натуральных условиях опорных плит и тангенциальных устройств вместо используемых ранее мембранных грунтовых динамометров.

Результаты исследований напряженно-деформированного состояния и статистика случаев аномального поведения подпорных стен заставляют обратить пристальное внимание при их проектировании и строительстве:

на воздействия строительного периода, включающие последовательность возведения, технологию отсыпки грунта, наличие несплошностей в стене;

на особенности работы стен сопряжения бетонных сооружений с плотинами из местных материалов.

Долговечность подпорных стен находится в зависимости от характеристик жесткости стены и грунта засыпки. Закономерности этой зависимости требуют проведения долговременных наблюдений и исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 2.06.07-87. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. М. 1989
2. Лавров Б.А., Лобач А.А., Фельдман А.И. Датчик уровня жидкости. Авт. Свид. 561865
3. Фельдман А.И., Лобач А.А. Деформации сопрягающего устоя водосброса и примыкающей кладки камня плотины Широковской ГЭС. Аннотации законченных в 1968 г. научно-исследовательских работ по гидротехнике. Л.: Энергия. 1969
4. Хейфиц В.З., Петрашень И.Р. Эластичный датчик напряжений грунта. Научные исследования по гидротехнике в 1971 г. Л.: Энергия. Ч. 1. 1972
5. Царев А.И. Способ измерения осредненных напряжений в контакте сооружения с нескальным грунтом. — «Бюллетень изобретений», 22, 1960
6. Царев А. И., Фельдман А. И. Надежность струнных мембранных датчиков для измерения давления грунта на сооружения в натуральных условиях. //Гидротехническое строительство. 4. 1965
7. Царев А.И., Фельдман А.И. Давление песчаных засыпок на стенки доковых конструкций камер шлюзов. //Гидротехническое строительство. №9. 19658. Царев А. И. Измерение касательных напряжений в контакте сооружения с нескальным грунтом. — Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 29, Л.: Энергия, 1966
9. Царев А.И., Фельдман А.И., Лавров Б.А. Обобщение результатов натуральных измерений давления грунта на стенки камер шлюзов и подпорные стенки гидроузлов. Научные исследования по гидротехнике в 1971 г. Л.: Энергия. Ч. 1. 1972
10. Царев А.И., Лавров Б.А. Вопросы методики измерения давления песчаных засыпок на сооружения. //Труды координационных совещаний по гидротехнике. Л.: Энергия. № 91. 1974.
11. Царев А.И., Лавров Б.А. Разработка рекомендаций по расчету давления грунта на подпорные сооружения гидроузлов. Научные исследования по гидротехнике в 1974 г. Л.: Энергия. 1975.
12. Шайкин Ю.П., Фельдман А.И. Состояние стенок камеры шлюза 2 канала им. Москвы по материалам натуральных наблюдений. Аннотации законченных в 1966 г. научно-исследовательских работ по гидротехнике. Л.: Энергия. 1967.
13. Щербина В.И. Давление грунта на стенки камер шлюзов в период строительства. //Гидротехническое строительство. №2. 1973.
14. Щербина В.И. Исследование процессов формирования давления грунта на стенки камер шлюзов докового типа в период строительства и эксплуатации. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: «ВОДГЕО». 1974.

## II. СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНОЛОГИИ

### ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕСИ СУГЛИНКОВ С ГРАВИЙНО-ГАЛЕЧНИКОВЫМ ГРУНТОМ ДЛЯ ЯДРА ПЛОТИНЫ ТЕРИ

*Борткевич С.В., кандидат тех. наук (ОАО «НИИЭС»),  
Скибин А.Н., инженер (Филиал ОАО «Инженерный Центр ЕЭС» –  
«Институт Гидропроект»)*

В сейсмически активном районе Индии (Нижние Гималаи) на р. Бхагирати завершается строительство гидроузла Тери — одного из наиболее крупных гидроузлов в мире. Водоохранилище создается каменно-земляной плотиной высотой  $H = 260$  м с боковыми призмами из гравийно-галечного грунта и камня (пригрузка откосов) и с противофильтрационным наклонным ядром из глинистого материала. Среднее заложение верхового откоса плотины составляет 1 : 2,5, а низового 1 : 2. Толщина ядра равна 0,3  $H$  в средней зоне и 0,5  $H$  по контакту с основанием.

Для обеспечения безопасности сооружения проектом было принято, по аналогии с высотной плотиной Нурекской ГЭС (Республика Таджикистан), возводить ядро из скелетно-глинистого грунта, гранулометрический состав которого приведен в табл. 1.

*Таблица 1*

*Гранулометрический состав грунта ядра плотины*

Зона ядра плотины	Наименование границы	Процентное содержание фракций диаметром, мм					
		<0,002	<0,075	<0,425	<4,75	<20	< $\frac{200}{75}$
Основное тело	верхняя	10	50	60	70	85	100
	нижняя	5	20	30	40	60	100
Контакт с бортами ущелья	верхняя	20	70	80	90	100	-
	нижняя	10	40	50	60	80	100

**Примечание.** В таблице дробью указана максимальная крупность фракций грунта, допускаемого к укладке в основное тело ядра (числитель) и в зону его контакта с бортами ущелья (знаменатель)



В связи с тем, что месторождений грунта требуемого гранулометрического состава в районе строительства не оказалось, было принято решение о смешивании суглинков с гравийно-галечниковым грунтом, естественные залежи которых находились в непосредственной близости от створа плотины в месторождении Коти. Граничные кривые гранулометрического состава суглинков и гравийно-галечникового грунта после отделения из него фракций крупнее 200 мм показаны на рис. 1.

Предварительными расчетами было установлено, что грунт для основного тела ядра плотины можно получить путем смешивания суглинков с гравийно-галечниковым грунтом в весовом соотношении  $0,5 : 1 + 1 : 1$ , а для зоны контакта с бортами ущелья — в соотношении  $2 : 1$ .

Перед началом строительства плотины был выполнен комплекс исследований, включающий изучение возможности приготовления грунтовых смесей для ядра плотины в производственных условиях (полевые исследования), а также изучение фильтрационно-суффозионных, деформационных и прочностных свойств этих смесей (лабораторные исследования).

Полевые исследования выполнялись на месте строительства плотины индийской стороной под научно-методическим руководством российских специалистов, а лабораторные исследования — российской стороной в Научно-исследовательском институте энергетических сооружений (ОАО «НИИЭС»).

При полевых исследованиях [1] были устроены промежуточные склады 1 и 2, в которых создавались смеси суглинков с гравийно-галечниковым грунтом для основного тела ядра и для его контактной зоны, а также возведены опытные насыпи 1 и 2 для указанных зон, в которых отрабатывался способ укладки и уплотнения грунтовых смесей. Толщина слоев отсыпки суглинков в складе 1 составляла 0,45 м, в складе 2 — 0,90 м, соответственно толщина слоев гравийно-галечникового грунта  $0,50 \text{ м} \div 0,60 \text{ м}$  и  $0,30 \text{ м} \div 0,50 \text{ м}$ . Слои суглинков и гравийно-галечникового грунта в складах чередовались, высота каждого склада составляла 4 м, размеры в плане 50 м x 50 м.

В процессе отсыпки промежуточных складов, как для основной зоны ядра, так и для контактной, производилась корректировка толщины и влажности отсыпаемых слоев в зависимости от состава и влажности поступающих из месторождения грунтов, для чего на всех звеньях технологической цепи полевых исследований был организован геотехнический контроль.

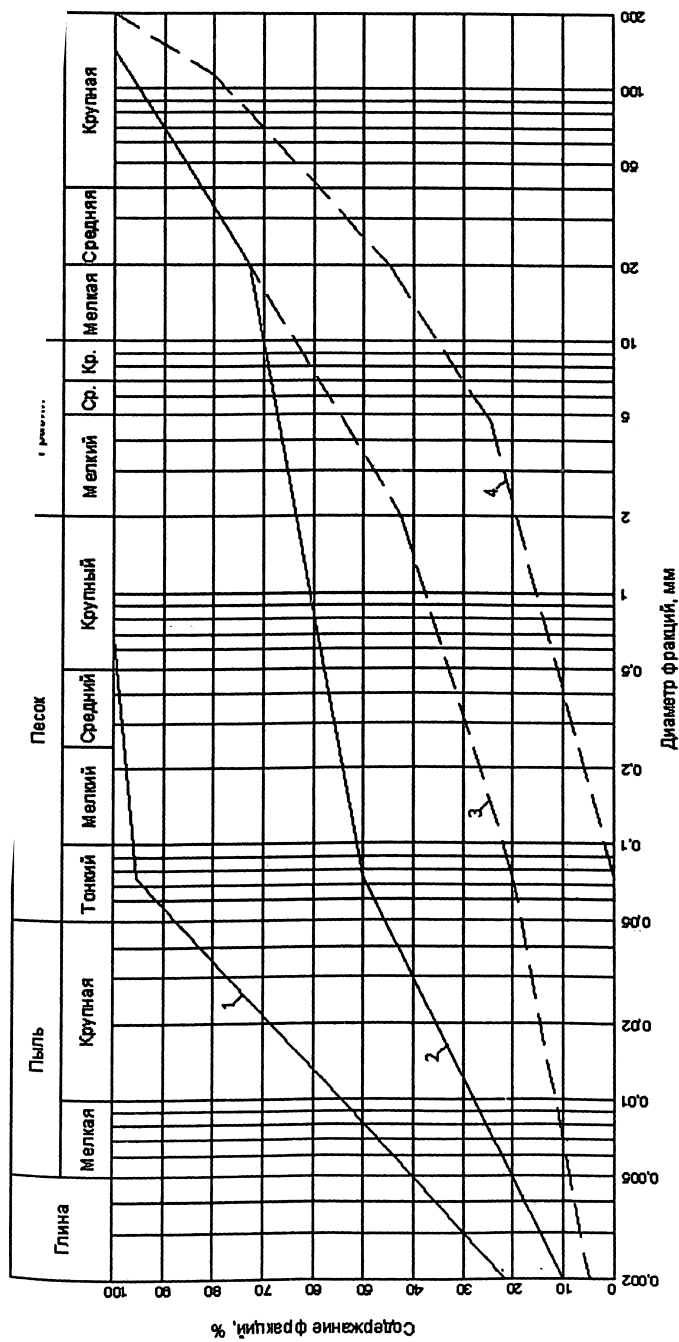


Рис.1. Граничные кривые granulометрического состава суспензия и гравийно-галечникового грунта после отделения из него фракции крупнее 200 мм: 1,2 — суспензия; 3,4 — гравийно-галечный грунт

Опыт строительства плотины Нурекской ГЭС показал, что наилучшее сочетание фильтрационных, деформационных и прочностных характеристик скелетно-глинистого грунта требуемого проектом гранулометрического состава достигается при твердой консистенции мелкозема для основной зоны ядра и при полутвердой - тугопластичной консистенции для контактной зоны. Поэтому влажность мелкозема (фракций менее 4,75 мм) в складе 1 поддерживалась на уровне от 0,10 до 0,15, а в складе 2 — от 0,16 до 0,19, предполагая, что уплотнением грунтовой смеси в насыпи 1 до плотности сухого мелкозема = 1,85 т/м<sup>3</sup> и в насыпи 2 до плотности сухого мелкозема = 1,80 т/м<sup>3</sup>, будет обеспечено условие сохранения указанной консистенции мелкозема при полном водонасыщении [2].

Грунтовая смесь основной зоны ядра (максимальная крупность фракций < 200 мм) укладывалась в опытную насыпь 1, а контактной зоны (максимальная крупность фракций < 75 мм) — в насыпь 2. Принципиальных различий в проведении работ на обеих насыпях не было, поэтому их описание дается совместно.

Разработка склада производилась единым забоем на всю высоту экскаватором с ковшом 3,5 м<sup>3</sup> и погрузчиком с ковшом 7 м<sup>3</sup>. Грунт в забое перемешивался этими механизмами и загружался в автосамосвалы с кузовом емкостью 25 м<sup>3</sup>. Полученная таким образом грунтовая смесь выгружалась из автосамосвалов на картах отсыпки и разравнивалась бульдозером. После разравнивания, не допуская изменения влажности грунта, производилось его уплотнение с помощью самоходного виброкатка с передним гладким вальцом W1802Д фирмы «VIBROMAX» общей массой 16200 кг (масса передней катковой части 10800 кг, удельное линейное давление 50,2 кН/м, частота колебаний 1600 мин<sup>-1</sup>, амплитуда 2 мм, возмущающая сила 280 кН).

Размеры насыпей в плане 60 x 22 м. На насыпи 1 было уложено (в порядке возведения) 4 слоя по 0,40 м, пятый слой — 0,50 м, шестой — 0,60 м, седьмой — 0,50 м и последний восьмой слой имел толщину 0,60 м. Такой порядок возведения был обусловлен поиском оптимальных параметров уплотнения в конкретных условиях (толщина слоев, количество ходов катка, влажность грунта). На насыпи 2 первые 3 слоя имели мощность 0,40 м, четвертый слой — 0,50 м, и последний пятый слой 0,55 м.

Перед отсыпкой очередного слоя поверхность предыдущего разрыхлялась траками бульдозера при его движении по карте. После этого производилось увлажнение взрыхленной поверхности с помощью поливочной машины. При вышеуказанных размерах карт обычно требовалась примерно одна емкость машины (7,5 т). При выпадении дождя обе эти операции по подготовке поверхности отменялись.

В процессе послойного уплотнения грунтовых смесей был отработан оптимальный режим работы катка. Первый проход катка по свежотсыпанному слою проводился при выключенном вибраторе со скоростью не более 3 км/час. Все последующие проходы выполнялись с включенным вибратором в положении «Stage — 1» (т.е. высокая возмущающая сила, низкая частота, большая амплитуда), с той же скоростью. Последний проход проводился со скоростью не более 2 км/час. Все проходы катка с включенным вибратором выполнялись только вперед. В противном случае, возникало несоответствие между направлением кругового движения вальца и направлением движения самого катка, что приводило к развитию растягивающих напряжений на уплотняемой поверхности и, как следствие, появлению на ней многочисленных трещин с раскрытием до 10 — 15 мм. Проходы катка с выключенным вибратором можно было делать в любом направлении. Движение катка по карте выполнялось как по спирали, так и «змейкой» при этом каток не приближался к свободному краю ближе, чем на 0,5 м (во избежание его опрокидывания). Перед отсыпкой смежной карты края уплотненного слоя срезались. Время, необходимое для уплотнения одного слоя размером в плане 60 м x 20 м одним проходом катка при скорости 3 км/час, составляло 20 — 25 мин. Таким образом, общая производительность катка составляла примерно 3500 м<sup>2</sup>/час уплотняемой поверхности за один проход или (при слое толщиной 0,40 м и необходимым числе проходов 8) в объемном выражении — примерно 200 кубометров грунта в час.

Время, потребное на отсыпку слоя размером в плане 60 м x 20 м при толщине 0,4 м с помощью вышеуказанных механизмов, при расстоянии от забоя на складе до карты 50 ÷ 100 м, составляло примерно 4 часа. Время, необходимое для разравнивания грунта на карте одним бульдозером, 1,5 — 2 часа. Подготовка поверхности предыдущего слоя перед отсыпкой последующего (рыхление, увлажнение) занимала, примерно, 1,0 ÷ 1,5 часа.

Эти величины положены в основу для расчета необходимого количества механизмов на плотине, количества карт и интенсивности ведения работ.

Результаты геотехнического контроля на опытных насыпях 1 и 2 представлены в табл. 2. Гранулометрические составы грунтовых смесей, полученные на опытных насыпях, в таблице не приводятся, поскольку все они точно укладывались в соответствующие границы, установленные проектом.

По результатам контроля качества укладки грунтов сформулированы основные требования к влажности, плотности и техноло-

Результаты геотехнического контроля за укладкой опытных насыпей 1 и 2

суглинков с грави́но-галечниковым грунтом на (средние значения по слоям)

1	2	3	4	5	6	7	Дунки		
							8	9	10
Номер слоя в порядке возведения насыпи	Толщина слоя, м	Количество проходов катка по следу	Влажность мелкозёма перед укаткой, д. ед.	Содержание мелкозёма (<4,75мм) в грунте, %	Оптимальная влажность, мелкозёма, д. ед.	Максимальная плотность сухого мелкозёма, т/м <sup>3</sup>	Плотность сухого грунта, т/м <sup>3</sup>	Влажность мелкозёма, д. ед.	Плотность сухого мелкозёма, т/м <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,40	8	0,09	58	0,14	1,91	-	-	-
2	0,40	8	0,10	61	0,14	1,87	2,19	0,12	1,86
3	0,40	8	0,11	57	0,14	1,89	2,18	0,11	1,85
4	0,40	8	0,12	54	0,14	1,88	2,27	0,11	1,97
5	0,50	8	0,10	65	0,14	1,88	2,28	0,10	2,02
6	0,60	8	0,11	52	0,14	1,88	2,23	0,09	1,93
7	0,50	6	0,10	66	0,14	1,90	2,21	0,10	1,93
8	0,60	6	0,14	63	0,13	1,90	2,17	0,12	1,85
Среднее значение по насыпи			0,11	59,5	0,14	1,89	2,22	0,11	1,92
<b>О п ы т н а я</b>									
1	0,40	8	0,14	63	0,13	1,87	2,24	0,12	1,93
2	0,40	8	0,11	70	0,14	1,88	2,25	0,11	1,96
3	0,40	8	0,13	68	0,14	1,86	2,22	0,12	1,92
4	0,50	6	0,11	80	0,14	1,86	2,20	0,11	1,95
5	0,55	6	0,16	77	0,15	1,84	2,16	0,12	1,88
Среднее значение по насыпи			0,13	72	0,14	1,86	2,21	0,12	1,93

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Степень уплотнения мелкозёма, D	Влажность мелкозёма, д. ед.	Плотность сухого мелкозёма, т/м <sup>3</sup>	Степень уплотнения мелкозёма, D	W <sub>L</sub> , д. ед.	W <sub>p</sub> , д. ед.	I <sub>p</sub> , д. ед.	Обеспеченность степени уплотнения мелкозёма D = 0,97, %	Плотность сухого мелкозёма при вероятности α = 0,95	Плотность сухого мелкозёма при вероятности α = 0,99
-	0,08	1,83	0,96	0,25	0,16	0,09	-	-	-
0,99	0,08	1,91	1,02	0,28	0,19	0,09	87,1	1,90	1,89
0,98	0,11	1,89	1,00	0,28	0,18	0,10	82,8	1,89	1,87
1,05	0,10	1,94	1,03	0,28	0,18	0,10	100,0	1,93	1,92
1,07	0,11	1,91	1,02	0,27	0,18	0,09	95,8	1,90	1,90
1,03	0,10	1,94	1,03	0,28	0,19	0,09	97,9	1,93	1,93
1,01	0,10	1,94	1,02	0,28	0,18	0,10	97,6	1,93	1,93
0,97	0,12	1,92	1,01	0,27	0,18	0,09	-	-	-
1,01	0,10	1,91	1,01	0,27	0,18	0,09	-	1,91	1,90
<b>н а с ы п ь 1</b>									
<b>н а с ы п ь 2</b>									
1,03	0,13	1,87	1,00	0,28	0,17	0,11	100	1,86	1,85
1,05	0,10	1,98	1,05	0,28	0,18	0,10	87,2	1,96	1,85
1,03	0,12	1,92	1,03	0,29	0,18	0,11	93,7	1,85	1,85
1,05	0,12	1,95	1,05	0,29	0,19	0,10	93,7	1,86	1,86
1,02	0,12	1,88	1,02	0,29	0,19	0,10	-	-	-
1,04	0,12	1,92	1,03	0,28	0,18	0,10	-	1,88	1,85

гии уплотнения смеси суглинка с гравийно-галечниковым грунтом в основное тело ядра плотины смесь необходимо укладывать при твердой консистенции мелкозема с влажностью  $0,10 \div 0,15$ . Требуемая плотность сухого мелкозема, после уплотнения, должна быть  $\rho_d \geq 1,90 \text{ т/м}^3$  при минимально допустимых значениях в отдельных пробах  $\rho_d^{\min} \geq 1,85 \text{ т/м}^3$ , что соответствует плотности сухой грунтовой смеси в целом  $2,00 - 2,30 \text{ т/м}^3$ , в зависимости от содержания и вида крупного заполнителя;

в контактную зону ядра смесь следует укладывать при полутвердой и тугопластичной консистенции мелкозема с влажностью  $0,16 \div 0,19$ . Требуемая плотность сухого мелкозема, после укатки грунта, должна быть  $\rho_d \geq 1,85 \text{ т/м}^3$  при минимально допустимых значениях в отдельных пробах  $\rho_d^{\min} \geq 1,80 \text{ т/м}^3$ , что соответствует плотности грунтовой смеси в целом  $1,90 - 2,10 \text{ т/м}^3$ .

для получения требуемых параметров плотности, укатку грунтовой смеси следует производить слоями  $0,40 \text{ м}$  в рыхлом теле за проходов по следу тяжелого вибрационного катка, с удельным линейным давлением более  $50 \text{ кН/м}$  при вышеописанном режиме работы. Как известно из практики строительства, для исследуемых грунтов полезно применение таких катков с кулачками «пэдфут».

Для проведения фильтрационных исследований в теле насыпей 1 и 2 было устроено по два шурфа глубиной  $1,3 \text{ м} - 1,5 \text{ м}$ . Каждый шурф располагался над полиэтиленовой пленкой размером в плане  $8 \times 8 \text{ м}$ , заложенной при возведении насыпей. Необходимо отметить, что проходка шурфов выполнялась медленными темпами, спустя семь месяцев после возведения насыпей, что привело к потере влажности грунтового массива, высыханию его с поверхности и образованию трещин усадки. В качестве примера, на рис. 2 приведено геологическое описание одного из шурфов.

Несмотря на выявленные дефекты, было принято решение проводить фильтрационные опыты и рассматривать их результаты как экстремальные. Для этого стенки шурфов были закреплены деревянной опалубкой и фильтровой обсыпкой. По периметру шурфов на расстоянии  $0,5 \text{ м}$  от стенок и далее, с шагом  $1 \text{ м}$ , установлены трубчатые пьезометры, всего по 3 штуки с каждой стороны.

В шурфы была залита вода и уровень ее поддерживался до момента условной стабилизации расходов и депрессионной поверхности в пьезометрах.

Согласно программе исследований, для стабилизации фильтрационного режима предполагалось выдержать шурфы, заполнен

индекс

0.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

1.1

1.2

1.3

**Безопасность энергетических сооружений**

**Шурф № 1/2**  
**Опытная насыпь № 2**  
 Глубина – 1,35 м; Сечение 1,5 x 1,5 м<sup>2</sup>  
 Способ проходки вручную (ломом, лопатой)

№ слоя	Глубина	Мощность	Разрез	Описание грунтов
1	0,35	0,35		Суглинок средний, коричневый с гравием и галькой 30-35 %. Обломки состоят из филлитов, глинистых сланцев, реже кварцитов плохой и средней окатанности, лещадной формы. Грунт плотный, твердой консистенции.
2	0,82	0,17		Суглинок тяжелый, темнокоричневый плотный, полутвердой консистенции с галькой и гравием 25-30%. Размер обломков 15-30 мм до 70 мм, мощность слоя изменяется от 0,1 до 0,21 м.
3	0,90	0,38		Суглинок аналогичный слою 1. Мощность слоя изменяется от 0,32 м до 0,45 м.
4	1,02	0,19		Суглинок аналогичный слою 2. Мощность слоя изменяется от 0,12 м до 0,25 м.
5	1,35	0,25		Суглинок аналогичный слою 1. Консистенция твердая и полутвердая.
<p>Суглинки залегают горизонтальными слоями разной мощности, контакты между слоями извилистые, плотные. В суглинках наблюдаются трещины двух типов: клиновидные - в интервале 0,0-0,8 м и в интервале 0,5-1,35 м извилистые, приурочены к контакту с обломками.</p>				

**Рис. 2. Геологическое описание шурфа №1/2**

ные водой 2 — 3 месяца и только после этого начинать измерения расходов и уровней воды для расчетов коэффициента фильтрации тела насыпи. Однако, в связи со значительным отставанием от намеченного графика проведения полевых исследований, замеры расходов и уровней воды для расчета коэффициента фильтрации пришлось выполнять через месяц после заливки шурфов.

Расходы воды на испарение не замерялись и в расчетах не учитывались. Как известно, все принятые условности и допущения идут в запас при критической оценке водопроницаемости грунта.

Следует отметить, что на момент контрольных замеров во всех шурфах уровни воды установились только в пьезометрах первого ряда, расположенных на расстоянии 0,5 м от стенок шурфов. Поэтому, определение коэффициента фильтрации тела насыпей для каждого шурфа выполняли только по одному расчетному сечению, представляющему из себя цилиндрическую поверхность, расположенную между стенками шурфа и первым рядом пьезометров. Расчетная схема и формулы приведены на рис. 3.

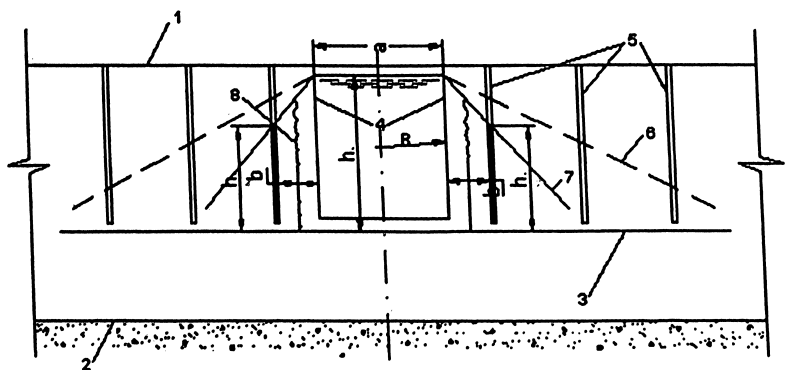


Рис. 3. Расчетная схема для определения коэффициента фильтрации  $K_{\phi}$  тела насыпей вдоль слоев укатки:

- 1 — поверхность насыпи; 2 — гравийно-галечниковое основание;
- 3 — полиэтиленовая пленка; 4 — стенки наливного шурфа;
- 5 — пьезометры; 6 — ожидаемая поверхность депрессии при стабилизированном режиме фильтрации; 7 — фактическая поверхность депрессии условно стабилизированного фильтрационного потока в момент определения  $K_{\phi}$ ; 8 — расчетная площадь фильтрации  $\omega$

В зависимости от размеров шурфов и уровней воды в пьезометрах, площадь фильтрации в расчетных сечениях составляла от 6,78 м<sup>2</sup> до 10,52 м<sup>2</sup>, расход воды от 44 до 85 л/сут, градиенты напора от 1,2 до 1,35. Расчеты коэффициентов фильтрации тела насыпей по экспериментальным данным приведены в табл.



Таблица 3

Расчет коэффициентов фильтрации тела насыпей 1 и 2 по экспериментальным данным

№ насыпи	№ шурфа	Расход воды, Q, л/сут.	Средний градиент напора, I	Расчетная площадь фильтрации, $\omega$ , м <sup>2</sup>	Коэффициент фильтрации $K_{\phi} = \frac{Q}{\omega \times I}$ , см/с
1	1/1	85	1.35	9,32	$7,8 \times 10^{-6}$
	2/1	71	1.30	10,52	$6,0 \times 10^{-6}$
2	1/2	44	1.28	6,78	$5,9 \times 10^{-6}$
	2/2	56	1.20	6,91	$7,8 \times 10^{-6}$

Как видно из таблицы, коэффициент фильтрации насыпей в расчетных сечениях равен  $A \times 10^{-6}$  см/с, где A — любое число от 1 до 10.

В пьезометрах второго и третьего ряда, находящихся соответственно на расстоянии 1,5 и 2,5 м от стенок шурфов, вода на момент окончания работ не появилась, что говорит о значительно меньшей водопроницаемости той части изучаемого грунтового массива, которая находится глубже 0,5 м от его дневной поверхности и, следовательно, не затронута трещинами усадки.

Учитывая все это, был сделан вывод о том, что исследуемые грунтовые смеси в теле насыпей имеют достаточно низкую водопроницаемость и, вполне, могут быть использованы для создания противофильтрационного ядра плотины.

Углубленное изучение фильтрационно-суффозионной прочности смеси суглинков с гравийно-галечниковым грунтом было выполнено [3] в лабораторных условиях на больших образцах диаметром 0,3 м.

При этом, для создания модельных смесей фракции крупностью более 40 мм заменялись на фракции 20 — 40 мм, фильтр по торцам образца выполнялся фракциями 0,1 — 20 мм.

Смеси испытывались на высоконапорной установке, позволяющей создавать сжимающие напряжения в образце до 6,0 МПа и градиенты напора до 100.

Начальная плотность сухого грунта для смеси, содержащей 40% мелкозема, составляла 2,20 т/м<sup>3</sup>, а для смеси, содержащей 70% мелкозема — 2,02 т/м<sup>3</sup>.

Испытаниями установлено, что водопроницаемость материала ядра плотины зависит от процентного содержания мелкозема, начальной плотности грунтовой смеси и величины сжимающих напряжений в ней.

С увеличением сжимающих напряжений в грунтовых смесях, имеющих различное содержание мелкозема, их коэффициент филь-

трации уменьшается, как показано на рис.4, что можно объяснить повышением плотности смесей. Во всех опытах при достижении максимальных величин сжимающих напряжений произошло уплотнение испытываемых образцов смеси, плотность сухого грунта достигла значений 2,38 – 2,43 т/м<sup>3</sup>.

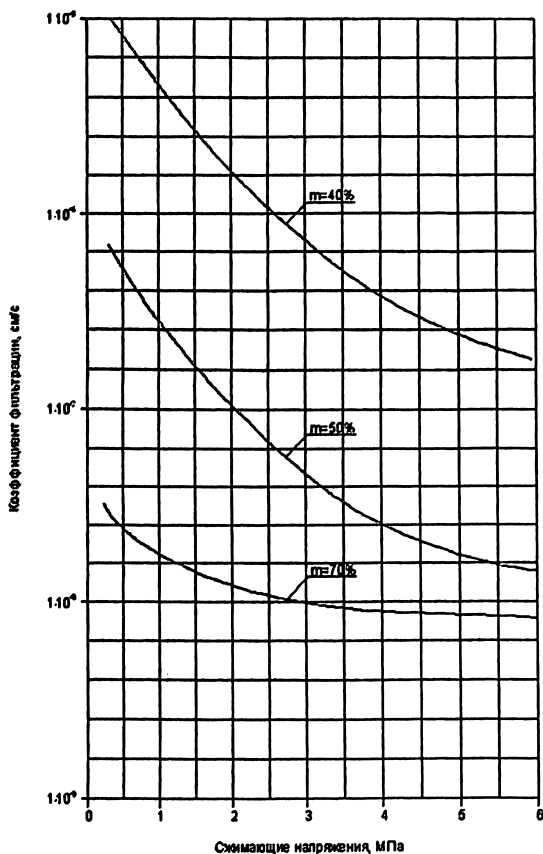


Рис.4. Графики зависимости коэффициента фильтрации смеси суглинка с гравийно-галечниковым грунтом от сжимающих напряжений в испытываемом образце:

$m$  — содержание мелкозема (фракции мельче 4,75 мм) в смеси

Смеси суглинка с гравийно-галечниковым грунтом, характеризующиеся гранулометрическим составом, соответствующим проекту, во всех режимах испытаний фильтрационно-устойчивы и отвечают нормативным требованиям, предъявляемым к материалу противofильтрационных устройств.

Деформативно-прочностные характеристики смеси определялись [4] на приборах трехосного сжатия, предназначенных для испытания образцов диаметром 60 мм и высотой 120 мм. В связи с этим, максимальный размер частиц в образцах составлял 10 мм. Учитывая то, что средние гранулометрические составы смесей, рекомендованных проектом к укладке в основное тело ядра и его контактную зону содержат соответственно около 60% и около 80% мелкозема, были испытаны две грунтовые смеси. Эти смеси содержали 60 и 80% мелкозема с добавлением до 100% фракции крупностью  $4,75 \div 10$  мм. Такая замена была обоснована экспериментальной работой [5] и приводила к незначительному (до  $1^0$ ) уменьшению угла внутреннего трения, что идет в запас прочности. Деформативные характеристики грунта натурального гранулометрического состава и модельных смесей различаются не более, чем на  $5 \div 7\%$ .

Программа исследования грунтовых смесей включала проведение опытов по консолидированно-дренированной схеме трехосного сжатия при следующих значениях всестороннего обжатия: 0,05; 0,1; 0,3; 0,5; 0,8 и 1,2 МПа. Модельная смесь основного тела ядра, содержащая 60% мелкозема, испытывалась при начальных значениях влажности 0,08 и плотности сухого грунта  $2,07 \text{ т/м}^3$ , а модельная смесь контактной зоны — при начальных значениях влажности 0,15 и плотности сухого грунта  $1,89 \text{ т/м}^3$ .

В результате трехосных испытаний установлено, что огибающие предельных напряжений, отражающие связь между интенсивностью касательных напряжений  $\sigma_1^*$  и средним эффективным напряжением  $\sigma$ , аппроксимируются линейными функциями:

$$\text{для основного тела ядра } \sigma_1^* = 0,15 = 0,754 \sigma \text{ МПа,}$$

$$\text{для контактной зоны } \sigma_1^* = 0,075 = 0,662 \sigma \text{ МПа.}$$

При построении огибающих функций  $\sigma_1^*$  ( $\sigma$ ), в качестве предельных значений напряжений, принимались напряжения последних ступеней нагружения, при которых деформации еще стабилизировались. Определенные по этим напряжениям параметры прочности также имеют некоторый запас.

Нормативные значения прочностных характеристик, пересчитанные в параметры прочности Мора-Кулона, составили:

для основного тела ядра:

$$\text{tg } \varphi = 0,63; \varphi = 32,2^0; C = 0,126 \text{ МПа;}$$

для контактной зоны:

$$\text{tg } \varphi = 0,545; \varphi = 28,6^0; C = 0,066 \text{ МПа.}$$

Зависимости модуля сдвига  $G$  и модуля объемной деформации  $K$  от среднего эффективного напряжения  $\sigma$  и интенсивности деформаций сдвига  $e$ , аппроксимируются выражениями:

для основного тела ядра:

$$G = \frac{0,15 = 0,754 \sigma}{0,0056 + 0,98 e}, \quad \text{МПа, } K = 24 + 12 \sigma \text{ МПа}$$

для контактной зоны:

$$G = \frac{0,075 = 0,662 \sigma}{0,0122 + 0,91 e}, \quad \text{МПа, } K = 6,8 + 8,5 \sigma \text{ МПа.}$$

В результате выполненного комплекса полевых и лабораторных исследований установлены:

возможность и целесообразность приготовления смесей суфлинков с гравийно-галечниковым грунтом для ядра плотины;

технология укладки грунтовых смесей в тело плотины;

контрольные параметры плотности и влажности смесей, приемлемых для возведения сооружения;

фильтрационно-суффозионные и деформативно-прочностные характеристики смесей, использованные для расчетов фильтрационного режима и напряженно-деформированного состояния плотины, а также устойчивости ее откосов.

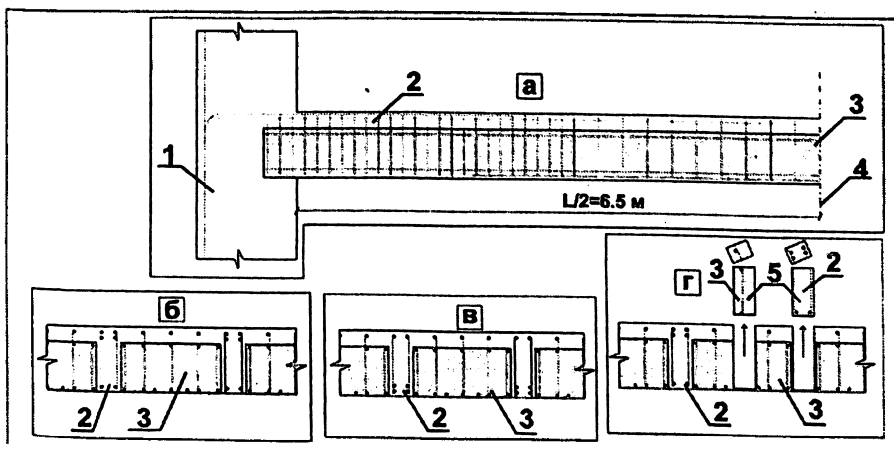
#### ЛИТЕРАТУРА

1. Отчет «Научно-методическое руководство полевыми исследованиями технологии укладки грунтов в плотину г/у Тери (Индия). НИС Гидропроекта. 1990.
2. Борткевич С. В. Основные требования к качеству скелетно-глинистых ядер каменно-земляных плотин. // Гидротехническое строительство. 8. 1973.
3. Отчет «Исследование фильтрационно-суффозионных свойств материалов грунтовой плотины ГЭС Тери (Индия)». НИС Гидропроекта. 1990.
4. Отчет «Экспериментальное определение расчетных деформативно-прочностных характеристик крупнообломочных и глинистых материалов плотины г/у Тери при статических и динамических воздействиях». НИС Гидропроекта. 1990.
5. Воронцов Э. И., Чумичев Б. Д. Моделирование зернового состава крупнообломочных грунтов при исследованиях прочностных и деформативных свойств. Экспресс-информация «Энергетика и электрификация», серия: Сооружение ГЭС, вып. 7, 11. 1985.

# ИССЛЕДОВАНИЕ МАССИВНЫХ СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Николаев Д.В., инженер (ОАО «НИИЭС»)

Массивные железобетонные перекрытия возводятся в два этапа: нижняя часть обычно выполняется в сборном, а верхняя в — монолитном варианте. Так, железобетонные перекрытия некоторых боксов АЭС выполнены сборно-монолитными. В нижней части уложены сборные железобетонные (рис 1а,б,в). Пространство между балками и верхняя часть перекрытия монолитные. Перекрытие жестко защемлено в стены. При этом нижняя и верхняя части перекрытия оказываются разделенными продольным строительным швом. Переменные температурные и статические, вибрационные нагрузки от технологических процессов на электрических станциях в процессе эксплуатации, приводят к снижению прочности строительного шва и, как следствие, перераспределению внешней нагрузки между верхней и нижней частями перекрытия и снижению его общей несущей способности. Исследования влияния подобных швов на работу конструкции практически не проводилось.



1 — железобетонная стена; 2 — монолитный железобетон; 3 — сборный железобетон; 4 — ось симметрии; 5 — выбуренные керны

Рис. 1. Конструкция перекрытия; а — продольный разрез; б — поперечный разрез в опорной части; в — поперечный разрез в пролтной части; г — места разрушения кернов

На ряде блоков АЭС в рассматриваемых конструкциях при выбуривании кернов было установлено полное нарушение сцепления слоев между собой. Керны, выбуренные из обследуемых перекрытий, распадались на две части на уровне контакта сборного и монолитного бетона (рис. 1г). При визуальном обследовании перекрытия на верхней грани в опорной зоне не было обнаружено трещин. При наблюдении за напряжениями в продольной рабочей арматуре опорных зон четырех перекрытий, были зарегистрированы напряжения близкие к нулю, а по показаниям некоторых армодинамометров удалось зафиксировать резкое падение напряжений. Как следствие резкого уменьшения напряжений в продольной арматуре опорных зон, явилось увеличение напряжений в продольной арматуре пролетных зон (рис. 2).

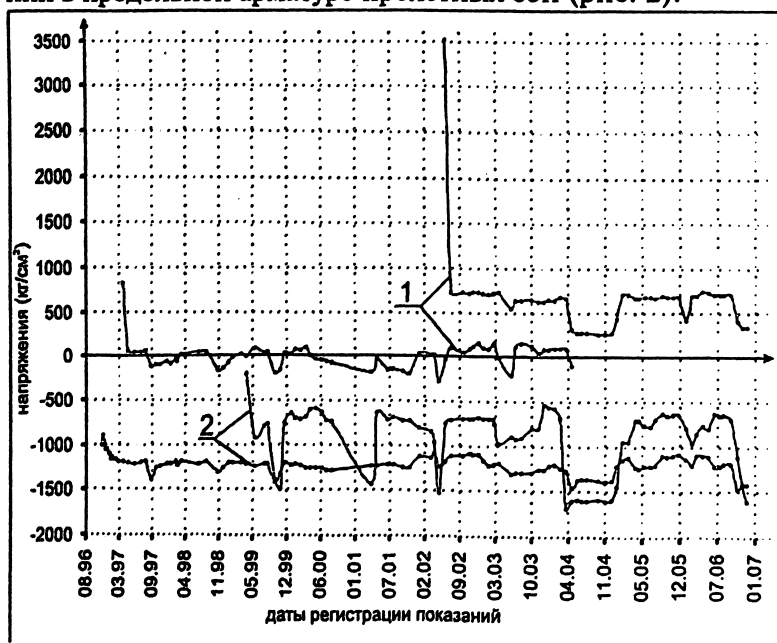


Рис. 2. Изменения напряжений в перекрытии бокса АЭС

1 — показания армодинамометров растянутой арматуры опорных зон; 2 — показания армодинамометров сжатой арматуры пролетных зон; временные снижения напряжений (скачки) объясняются снятием температурной нагрузки во время планово-предупредительного ремонта

Для детального изучения работы конструкции перекрытия были изготовлены и испытаны 5 его моделей. Масштаб первых двух моделей 1/10, остальных трех 1/4 натуральной величины. Для имитации отсутствия сцепления между слоями была уложена полиэтиленовая пленка.

Испытания показали, что способность сопротивляться действию изгибающего момента двухслойных моделей с нарушенным сцеплением ниже, чем монолитных моделей на  $15\% \div 30\%$ . Важным результатом, полученным при испытании моделей, явился «нетипичный» характер трещинообразования, отличающийся от обычного представления трещинообразования в монолитных конструкциях: в опорной зоне не наблюдалось наклонных магистральных трещин. Трещина разрушения формировалась над опорой с вертикальным простираем. Максимальное раскрытие трещин фиксировалось не на верхней максимально растянутой для монолитной конструкции грани, а внутри сечения — на верхней грани нижнего слоя. В верхнем слое с продольной рабочей арматурой образовалась микротрещина ( $< 0,05$  мм) по всей высоте монолитного слоя конструкции (рис 3а). «Нетипичный» характер трещинообразования объясняется несовместной работой слоев сборного и монолитного бетона, недостаточным количеством продольной растянутой арматуры верхней грани сборного элемента, а также тем, что значительная часть нагрузки воспринимается сборным элементом, имеющим более высокие деформационные характеристики, чем монолитный слой, что объясняет отсутствие магистральной трещины в опорной зоне перекрытия натурной конструкции.

При зафиксированном экспериментально характере трещинообразования, способность сопротивляться действию поперечных сил конструкции в опорном сечении значительно занижена, из-за практически отсутствующей сжатой зоны бетона и исключения из работы поперечной арматуры (рис.3б). Поэтому перерезывающее усилие воспринимается только продольной рабочей арматурой работающей на срез («нагельный» эффект продольной арматуры), что не регламентируется нормативными документами.

В исследованных перекрытиях из-за значительной температуры нагрева конструкции и высокого уровня напряжений в бетоне, находящемся под арматурными стержнями продольной арматуры, происходит снижение прочности бетона с течением времени, что приводит к снижению несущей способности перекрытия. Закон изменения несущей способности перекрытия во времени от восприятия поперечной силы можно определить зная закон изменения прочности бетона и величину «нагельного» эффекта продольной арматуры. Для определения последнего была применена теория деформирования железобетона с трещинами [1] адаптированная специалистами ОАО «НИИЭС» для арматуры больших диаметров [2]. Предлагаемая методика позволяет учитывать в расчетах «нагельный» эффект продольной арматуры в зависимости от

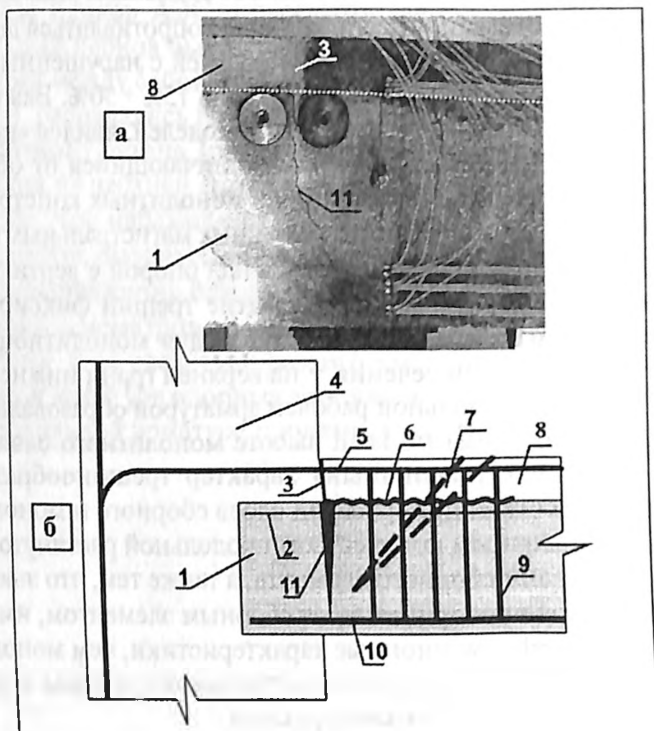


Рис. 3. а — экспериментально выявленный характер трещинообразования; б — схема работы опорной зоны перекрытия: 1 — сборный железобетон; 2 — конструктивная арматура верх сборного элемента; 3 — микротрещина ( $<0.05\text{мм}$ ); 4 — железобетонная стена; 5 — растянутая продольная рабочая арматура; 6 — трещина расслоения; 7 — наклонная трещина по СНиП; 8 — монолитный железобетон; 9 — поперечная арматура 10 — сжатая продольная рабочая арматура; 11 — трещина разрушения

диаметра арматуры, класса бетона и угла пересечения трещины арматурой. Прогноз изменения прочностных характеристик бетона во времени был выполнен путем аппроксимации значений, полученных по результатам оценки технического состояния перекрытий боксов АЭС после проведения системных обследований.

Одним из способов увеличения ресурса является снятие части нагрузки с перекрытия с помощью металлических балок усиления, соединенных с анкерами, заделанными в усиливаемое перекрытие.

На рис. 4 представлен графический способ определения ресурса перекрытия. Значение ресурса определяется точкой на оси абсцисс, соответствующей пересечению зависимостей действующей нагрузки (до и после усиления) и несущей способности. Проведенные испытания моделей перекрытий с системой усиления,



также расчеты показали, что необходимая несущая способность конструкции обеспечивается на срок не менее 15 лет сверх проектного срока эксплуатации.



Рис. 4. Ресурс перекрытия:

1 — несущая способность перекрытия; 2 — действующая нагрузка; 3 — срок службы без конструкций усиления; 4 — срок службы с конструкцией усиления

В ходе исследований к.т.н. Петрашенем И.Р. и автором была разработана инженерная методика расчета конструкций со швом, параллельным продольной оси изгибаемых элементов и нормальным к плоскости изгиба.

1. Каждый слой рассматривается отдельно с учетом сил взаимодействия между ними. Слои деформируются совместно и их прогибы, и кривизна описываются одним и тем же дифференциальным уравнением упругой линии:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{D} \quad (1)$$

т.е. правые части этого уравнения для каждого слоя равны друг другу:

$$\frac{M_1(x)}{D_1} = \frac{M_2(x)}{D_2} \quad (2)$$

где:  $M_1(x)$ ,  $M_2(x)$  — функции изгибающего момента соответственно для верхнего и нижнего слоя;  $D_1$ ,  $D_2$  — изгибные жесткости соответственно верхнего и нижнего слоя;  $\rho$  — радиус кривизны изгибаемого элемента;

Ось  $x$  проходит вдоль оси балки от ее левого конца (рис 5).

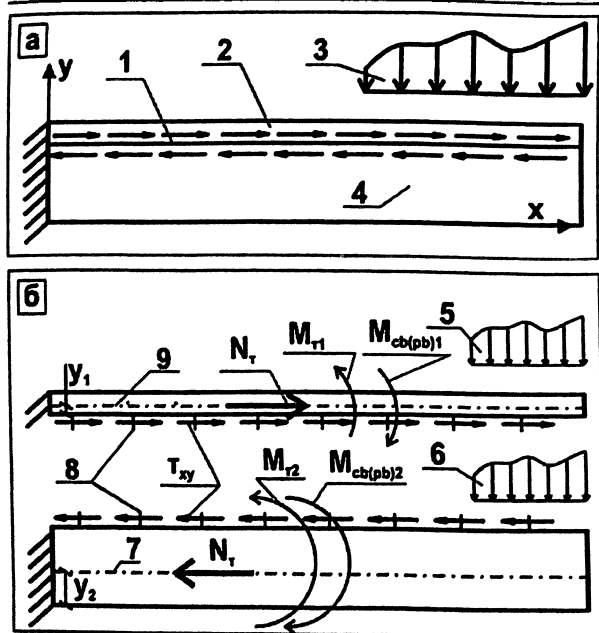


Рис. 5. Расчетная схема двухслойной балки

1— шов между слоями; 2— первый слой; 3— нагрузка на всю конструкцию; 4— второй слой; 5, 6— нагрузка на первый и второй слой соответственно; 7— касательные напряжения в шве; 7, 9— центральные оси второго и первого слоев соответственно; 8— стержни поперечной арматуры

2. Составляются уравнения для нахождения изгибающих моментов действующих на слои

Функция изгибающего момента для первого и второго слоя  $M_1$  и  $M_2$  может быть представлена в виде следующих выражений:

$$M_1(x) = M_{1c} + M_{pb1} + M_{cb1} \quad (3)$$

$$M_2(x) = M_{2c} + M_{pb2} + M_{cb2} \quad (4)$$

где:  $M_{11}$ ,  $M_{22}$  — моменты от касательных напряжений в строительном шве относительно центральных осей первого и второго слоев соответственно (в соответствии с формулой Журавского);  $M_{pb1}$ ,  $M_{pb2}$  — моменты чистого изгиба (могут отсутствовать) приходящиеся на первый и второй слой соответственно. В частном случае действующие опорные изгибающие моменты;  $M_{cb1}$  и  $M_{cb2}$  — моменты поперечного изгиба, приходящиеся на первый и второй слой соответственно;

3. Определяются моменты от касательных напряжений в строительном шве  $M_{1c}$  и  $M_{2c}$

Введем коэффициент ослабления прочности строительного шва  $k$

Определим:

$$k = \frac{\tau_{joi}}{\tau_{xy}}, \quad (5)$$

где:  $\tau_{joi}$  — максимальные касательные напряжения, которые может выдержать строительный шов; в том числе с учетом нагельного эффекта поперечной арматуры;  $\tau_{xy}$  — касательные напряжения на уровне строительного шва, вычисленные по формуле Журавского или методики, учитывающей трещинообразование [3, 4] как для монолитной балки:

$$\tau_{xy} = \frac{Q \cdot S_1}{J \cdot b}, \quad (6)$$

где:  $Q$  — поперечная сила;  $S_1$  — статический момент сечения верхней балки (без трещин) относительно нейтральной оси всей балки;  $J$  — момент инерции сечения всей балки без учета трещин;  $b$  — ширина балки.

Продольная сила, действующая вдоль строительного шва  $N_\tau$ , являющаяся интегральной суммой касательных напряжений, будет равна:

$$N_\tau = b \cdot \int_0^x k \cdot \tau_{xy} \cdot dx, \quad (7)$$

подставим в выражение (7) выражение (6), тогда:

$$N_\tau = b \cdot \int_0^x k \cdot \frac{Q \cdot S_1}{J \cdot b} dx, \quad (8)$$

$$Q = \frac{dM_{cb}}{dx} \quad (9)$$

подставив выражение (9) в выражение (8), сократив постоянные члены и, проинтегрировав, получим:

$$N_\tau = k \cdot \frac{S_1}{J} \cdot M_{cb}, \quad (10)$$

где  $M_{cb}$  — пролетный момент от внешней поперечной нагрузки.

Затем, определим моменты, действующие на слои от касательных усилий в шве  $M_{\tau 1}$ ,  $M_{\tau 2}$ : для этого усилие  $N_\tau$  умножим на расстояние до центральных осей балок:

$$M_{\tau 1} = N_\tau \cdot y_1; \quad M_{\tau 1} = k \cdot \frac{S_1}{J} \cdot M_{cb} \cdot y_1 \quad (11)$$

$$M_{\tau 2} = N_\tau \cdot y_2; \quad M_{\tau 2} = k \cdot \frac{S_1}{J} \cdot M_{cb} \cdot y_2 \quad (12)$$

$y_1, y_2$  — расстояние от строительного шва до нейтральной оси первого и второго слоя соответственно (рис 5). Следует отметить то, что касательные напряжения в шве вызывают продольный изгиб каждого слоя, при котором изгибающие моменты переменны относительно продольной оси слоя. При этом интегральная сумма касательных напряжений в поперечных сечениях балки равна нулю, что определено конечно-элементным анализом (рис 6, площади эпюры  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  равны). Таким образом, имеется такой случай изгиба балки, при котором моменты переменны относительно продольной оси балки, а поперечная сила отсутствует.

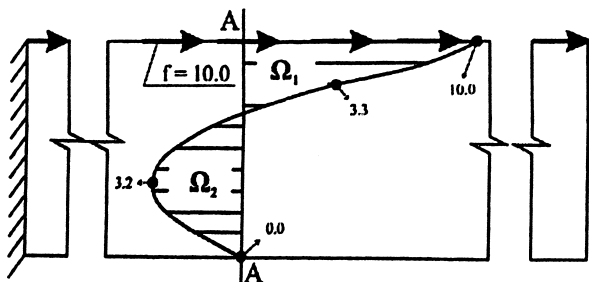


Рис. 6. Распределение касательных напряжений в сечении А-А балки при продольном изгибе от равномерно-распределенной нагрузки

4. Определяются моменты, вызывающие чистый изгиб и приходящиеся на первый и второй слой  $M_{pb1}$  и  $M_{pb2}$  соответственно

$$M_{pb1} = m_1 \cdot M_{pb} \quad (13)$$

$$M_{pb2} = m_2 \cdot M_{pb} \quad (14)$$

$m_1$  и  $m_2$  — доли момента  $M_{pb}$  приходящиеся на первый и второй слой соответственно.

Поскольку при чистом изгибе слои не взаимодействуют между собой. Из условия равенства перемещений вдоль оси у обоих слоев и всей балки получим:

$$\frac{M_{pb}}{D} = \frac{m_1 \cdot M_{pb}}{D_1} \quad (15)$$

$$\frac{M_{pb}}{D} = \frac{m_2 \cdot M_{pb}}{D_2} \quad (16)$$

Решая уравнения (15) и (16) относительно  $m_1$  и  $m_2$  соответственно получим:

$$m_1 = \frac{D_1}{D} \quad (17)$$

$$m_2 = \frac{D_2}{D} \quad (18)$$

5. Определяются моменты поперечного изгиба  $M_{cb1}$  и  $M_{cb2}$  от пролетной нагрузки, полученных, как разность полного момента действующего на слой и момента вызывающего чистый изгиб  $M_{pb}$  для первого и второго слоев соответственно

$$M_{cb2} = n \cdot M_{cb} \quad (19)$$

$$M_{cb1} = (1-n) \cdot M_{cb} \quad (20)$$

где:  $n$  — доля полного момента пролетной нагрузки полученная в результате интегрирования функции поперечных сил для первого слоя;  $1-n$  — доля полного момента пролетной нагрузки полученная в результате интегрирования функции поперечных сил для второго слоя.

6. Окончательные выражения для моментов, приходящихся на первый и второй слой

Подставив формулы (11), (12), (13), (14), (19), (20) в формулы (3), (4) получим:

$$M_1 = m_1 \cdot M_{pb} + n \cdot M_{cb} + \frac{k \cdot S_1 \cdot y_1}{J} \cdot M_{cb} \quad (21)$$

$$M_2 = m_2 \cdot M_{pb} + (1-n) \cdot M_{cb} + \frac{k \cdot S_1 \cdot y_2}{J} \cdot M_{cb} \quad (22)$$

Подставив выражения (21) и (22) в уравнение (2), получим:

$$\frac{m_1 \cdot M_{pb} + n \cdot M_{cb} + \frac{k \cdot S_1 \cdot y_1}{J} \cdot M_{cb}}{D_1} = \frac{m_2 \cdot M_{pb} + (1-n) \cdot M_{cb} + \frac{k \cdot S_1 \cdot y_2}{J} \cdot M_{cb}}{D_2} \quad (23)$$

$$M_{pb} \cdot \frac{m_1}{D_1} + M_{cb} \cdot \frac{n + \frac{k \cdot S_1 \cdot y_1}{J}}{D_1} = M_{pb} \cdot \frac{m_2}{D_2} + M_{cb} \cdot \frac{(1-n) + \frac{k \cdot S_1 \cdot y_2}{J}}{D_2} \quad (24)$$

Подставив в выражение (24) равенства (17) и (18), и, упростив рассматриваемое выражение, получим:

$$\frac{n - k \frac{S_1 \cdot y_1}{J}}{D_1} = \frac{1 - n - k \frac{S_1 \cdot y_2}{J}}{D_2} \quad (25)$$

Решив уравнение (25) относительно  $n$  получим:

$$n = \frac{k \cdot S_1 \cdot y_1 \cdot D_2 + J \cdot D_1 - D_1 \cdot k \cdot S_1 \cdot y_2}{J \cdot (D_2 + D_1)} = \frac{k \cdot \frac{S_1}{J} \cdot \left( y_1 \cdot \frac{D_2}{D_1} - y_2 \right) + 1}{1 + \frac{D_2}{D_1}} \quad (26)$$

Определив значения  $m_1$ ,  $m_2$  и  $n$ , предварительно оценив значения  $k$ , можно получить по уравнениям (3) и (4) изгибающие моменты для обеих балок и, используя их, определить соответствующие каждой балке напряженное состояние, соответственно произвести расчет арматуры и прогибы известными способами. При этом следует иметь ввиду, что касательные напряжения в строительном шве создают продольную силу  $N_s$  (см. формулу (7)), а момент  $M_{pb}$  — продольную силу  $N$  (см. далее формулу (27)).  $N$  и  $N_s$  действуют вдоль центральных осей каждой балки.

7. Уравнение для выражения моментов чистого изгиба  $M_{pb}$ .

$$M_{pb} = M_{pb} \cdot m_1 + M_{pb} \cdot m_2 + N \cdot (y_1 + y_2) \quad (27)$$

Подставив в выражение (27) равенства (17) и (18) получим:

$$M_{pb} = M_{pb} \cdot \frac{D_1}{D} + M_{pb} \cdot \frac{D_2}{D} + N \cdot (y_1 + y_2) \quad (28)$$

Выразив из выражения (28)  $N$  получим:

$$N = M_{pb} \cdot \frac{1 - \frac{D_1 + D_2}{D}}{y_1 + y_2} \quad (29)$$

Разработанная методика расчета удовлетворительно сходится с экспериментом (рис 7).

### Выводы.

Натурными и экспериментальными исследованиями конструкций на физических моделях, возведенных по аналогии с натурными сооружениями в два этапа, установлен особый характер трещинообразования, механизм их сопротивления и разрушения, отличающийся от цельномонолитных конструкций.

Разработаны методики расчетов двухслойных конструкций, позволяющие рассчитывать сборно-монолитную железобетонную конструкцию на действие изгибающего момента и поперечных сил.

Предложен один из способов определения остаточного ресурса рассматриваемой конструкции.

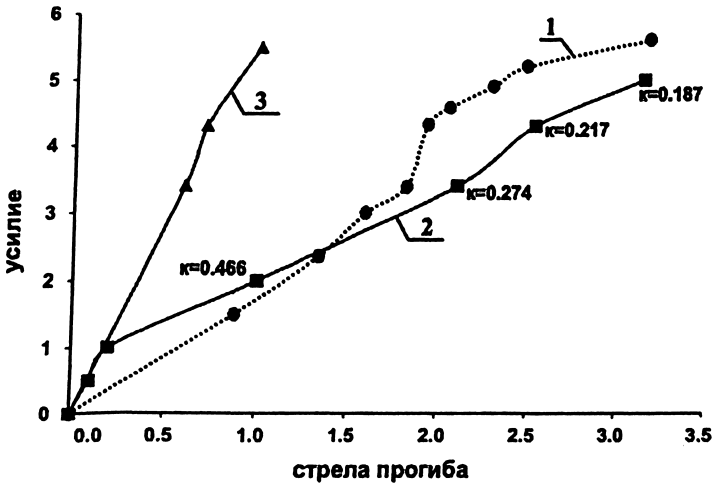


Рис. 7. Зависимости перемещений от усилия  
 1 — экспериментальная зависимость; 2, 3 — теоретические зависимости  
 с учетом двух слоев и без соответственно

### ЛИТЕРАТУРА

1. УДК 624.012.45.044 Карпенко Н.И. «Теория деформирования железобетона с трещинами. М.: Стройиздат. 1976.
2. Лисичкин С.Е. «Развитие теории и совершенствование методов расчета массивных железобетонных и напорных сталежелезобетонных конструкций гидротехнических сооружений». Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук.
3. УДК 624.041.6 (67.01.21) Совершенствование методов расчета прочности железобетонных конструкций гидротехнических сооружений со строительными швами. Обзорная информация /Николаев В.Б., Рубин О.Д. М. Информэнерго. 1986. (Сер. 2 Гидроэлектростанции, вып. I).
4. П-871-88 «Рекомендации по расчету массивных железобетонных конструкций гидротехнических сооружений на действие поперечных сил». М., Гидропроект им. С.Я. Жука МИНЭНЕРГО СССР. 1989.

## НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НОВОГО ОРТОГОНАЛЬНОГО ГИДРОАГРЕГАТА НА КИСЛОГУБСКОЙ ПЭС

*Усачев И.Н., кандидат техн. наук, Историк Б.Л. доктор. техн. наук,  
Шполянский Ю.Б., кандидат техн. наук (ОАО «НИИЭС»)*

8 февраля 2005 г. Председатель Правления РАО «ЕЭС России» Анатолий Чубайс и губернатор Мурманской области Юрий ЕВДОКИМОВ на Кислогубской приливной электростанции (ПЭС) дали старт опытной эксплуатации нового ортогонального гидроагрегата с диаметром рабочего колеса 2,5 м (ОГА-2,5) [1].

По итогам визита Анатолий Чубайс заявил, что «это не просто первая в России восстановленная приливная электростанция, а, по сути, первый в мире созданный нашими учеными ортогональный гидроагрегат, работающий на приливной станции» и отметил, что «еще предстоит опытно-промышленная эксплуатация станции, но те параметры, которые уже просматриваются, могут оказаться реальным масштабным прорывом не только на российском, а без преувеличения, на мировом уровне».

Анатолий Чубайс добавил, что «в России есть фантастические возможности для нового строительства нескольких приливных станций уникальной мощности [2]. И если технология, работающая на Кислогубской ПЭС, подтвердит предполагаемые параметры, то это означает, что Россия может пойти на уникальные масштабные решения».

А в марте 2007 г. на Кислогубской ПЭС в новом энергоблоке «Малая Мезенская ПЭС» был пущен опытный образец серийного ортогонального гидроагрегата с диаметром рабочего колеса 5 м (ОГА-5) для крупных ПЭС [3] (рис. 1.).

*Актуальность применения новых ортогональных машин.* Ортогональные гидроагрегаты по существу решают проблему широкомасштабного использования возобновляемой и экологически чистой энергии морских приливов в России для сооружения в Европейской части Мезенской ПЭС на Белом море мощностью до 8–19 ГВт и на Дальнем Востоке Тугурской ПЭС на Охотском море мощностью 8,0 ГВт, а также решают проблему воссоздания малых ГЭС на существующих низконапорных плотинах в средней полосе России. Перспективным представляется также использование ортогональных машин и в ветроэнергетике (опытная ортогональная ветроэнергетическая установка с системой аэродина-





Рис. 1. Кислогубская ПЭС (февраль 2007 г.)

мического торможения мощностью 10 кВт с 2004 г. работает на гидро-ветроэнергетическом комплексе «Сенеж» в Московской обл.).

**Основные преимущества ортогональных машин перед традиционными осевыми машинами.** В первую очередь, это — простота форм конструкции турбины: лопасти рабочего колеса прямолинейны, постоянны в сечении и их можно просто нарезать из заранее заказанного прокатного профиля, что позволяет вести изготовление турбинных колес в необходимых для крупных ПЭС количествах (несколько сот единиц в год) не на специализированных гидротурбинных заводах, а на заводах общего машиностроения. Кроме этого, турбинная камера и отсасывающие трубы прямоугольны и не имеют лекальных элементов.

Металлоемкость ортогональных машин, а следовательно и их стоимость, в несколько раз меньше по сравнению с традиционными идентичными осевыми машинами (например, вес ортогонального гидроагрегата Кислогубской ПЭС в 4,5 раза меньше веса традиционной для ПЭС французской капсульной машины).

Физический объем здания ПЭС с ортогональной машиной, по сравнению с объемом здания ПЭС с капсульной машиной, уменьшается более, чем вдвое (например, для Мезенской ПЭС протяженность здания по потоку с ортогональным гидроагрегатом 53 м, а с капсульным — 105 м).

За счет увеличения более чем вдвое пропускной способности ортогональной машины в холостом режиме, можно значительно уменьшить водопропускной фронт гидроузла (например, для Мезенской ПЭС увеличение числа гидроагрегатов на 20% позволяет

полностью отказаться от сооружения водопропускной плотины, которая по проекту равна по протяженности зданию ПЭС).

На ПЭС ортогональный гидроагрегат работает с неизменными характеристиками как при прямом, так и при обратном токе воды в отлив и в прилив, не меняя направления вращения рабочего колеса. Расчеты показывают, что на ПЭС с простыми и дешевыми ортогональными гидроагрегатами можно получить такую же выработку энергии, как при установке сложных и дорогостоящих горизонтальных осевых гидроагрегатов с поворотлопастными турбинами (при одинаковой установленной мощности).

**История применения ортогональной машины.** Ортогональная турбина является разновидностью известного ротора Дарье с прямыми лопастями, т.е. реактивной поперечноструйной турбиной, которая применяется в ветроэнергетике преимущественно на ветроагрегатах с вертикальной осью вращения и сравнительно редко на гидроустановках в свободнотекущей воде.

В дальнейшем речь пойдет об использовании этой турбины в нескольких иных условиях, а именно, на ПЭС и низконапорных ГЭС, с установкой ее в напорном турбинном тракте, т.е. также как и при использовании традиционных осевых турбин на этих объектах.

До настоящего времени ортогональные турбины на низконапорных ГЭС и на ПЭС не использовались, хотя их применение может дать существенный экономический выигрыш в указанных выше условиях при достижении ими максимального к.п.д. 0,6–0,7. Однако на такие величины максимальных к.п.д. для ортогональных турбин удалось выйти только в последние годы в результате исследовательских работ, начатых в «НИС Гидропроекта» в 1988г. и продолженных затем с 1992 г. в ОАО «НИИЭС».

В более ранних исследованиях ортогональных турбин, выполненных японскими и канадскими учеными в восьмидесятых годах, были получены значения максимального к.п.д. не выше 0,38, что явилось причиной снижения интереса к этим турбинам за рубежом и приостановки их исследований.

Финансирование проектно-конструкторских и научно-исследовательских работ по ортогональным турбинам в России осуществлялось за счет средств, отпущенных на проектирование Тугурской и Мезенской ПЭС, так как именно на ПЭС, достигается наибольший экономический эффект от их применения.

Так, для ТЭО Тугурской ПЭС, наряду с основным вариантом установки капсульных гидроагрегатов с поворотлопастной осевой турбиной с диаметром рабочего колеса  $D = 10$  м, в ОАО «НИИЭС» был разработан альтернативный вариант с вертикальными ортого-

нальными двухъярусными турбинами  $D = 5$  м. Для Мезенской ПЭС при разработке оптимального использования ПЭС в объединенной энергосистеме Европы, наряду с базовым вариантом с гидроагрегатами шахтного типа с горизонтальной поворотлопастной осевой турбиной  $D = 10$  м, был рассмотрен альтернативный вариант с горизонтальными ортогональными турбинами  $D = 10$  м. При максимальном к.п.д. ортогональных турбин 0,65 и выше преимущества альтернативных вариантов в этих проектах оказались очевидными.

Частично результаты исследований по ортогональным турбинам, проводившихся в НИС «Гидропроект» и ОАО «НИИЭС», были опубликованы в 1991 – 1993 гг. Наиболее поздние результаты этих исследований опубликованы в 1998 г. В результате выполненных работ максимальный к.п.д. ортогональных турбин удалось увеличить до 0,65 за счет новых решений по геометрии напорного турбинного тракта и за счет усовершенствования лопастной системы рабочего колеса турбины.

Безразмерные характеристики ортогональных турбин, при этом, были построены по результатам лабораторных испытаний моделей турбины диаметром 0,25 м, максимальный к.п.д. которых был получен равным 0,62, а для натурных ортогональных турбин диаметром 1 ÷ 5 м данные по к.п.д. были получены пересчетом с модели в соответствии с разработанной методикой (рис. 2.).

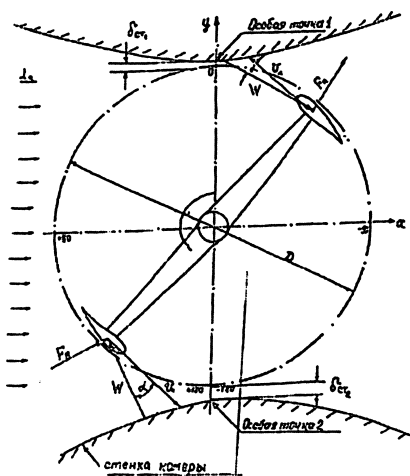


Рис. 2. Схема обтекания двухлопастного ортогонального ротора

Условные обозначения:

- $F_l$  - подъемная сила лопасти
- $V_l$  - скорость движения лопасти по траексе
- $W$  - результирующая скорость набегающего потока

Согласно этой методике по предварительной оценке максимальный к.п.д. турбин диаметром 5 м будет равен 0,70 и при этом годовая выработка электроэнергии, например, Мезенской ПЭС в базовом и альтернативном вариантах будет одинаковой, а капитальные затраты на строительство этой ПЭС в альтернативном варианте будут значительно меньше, чем базовом, причем стоимость основного гидросилового оборудования значительно уменьшится.

Для надежного обоснования приведенных прогнозных значений максимального к.п.д. натуральных ортогональных турбин большого диаметра необходимо было экспериментальное определение характеристик модельной турбины.

Для этого наиболее подходящим решением представлялось проведение натуральных испытаний ортогональной турбины на Кислогубской ПЭС, где условия испытаний при максимальном напоре до 3,5 м близки к рабочим напорам при эксплуатации на Тугурской и Мезенской ПЭС.

*Ортогональный гидроагрегат для Кислогубской ПЭС с диаметром рабочего колеса 2500 мм.* Учитывая значительные ожидаемые экономические выгоды от применения ортогональных машин на ПЭС и низконапорных ГЭС, Председатель Правления РАО «ЕЭС России» А.Б. Чубайс при ознакомлении в 2002г. в ОАО «НИИЭС» с работами по освоению приливной энергии предложил изготовить, установить в свободном донном водоводе Кислогубской ПЭС и испытать ортогональный гидроагрегат с диаметром рабочего колеса 2500 мм. Этот агрегат не только существенно дополняет модельный ряд натуральных ортогональных турбин, с малыми диаметрами 250 и 860 м. но и послужит прототипом будущих мощных гидроагрегатов для Мезенской и Тугурской ПЭС с проектным диаметром рабочего колеса 5000 мм.

Проектные проработки установки ортогонального гидроагрегата на Кислогубской ПЭС в свободном донном водоводе были проведены для горизонтальной турбины с диаметром рабочего колеса 2500 мм. При этом турбина соединяется с серийным синхронным генератором, работающим на сеть, с помощью серийного горизонтального цилиндрического мультипликатора. Для принятого максимально возможного в существующих условиях установки новой машины в донный водовод диаметра рабочего колеса обеспечивается близкая к оптимальной геометрическая форма проточного турбинного тракта, что является необходимым условием проведения испытаний.

Необходимо отметить, что выработка энергии на низконапорных ГЭС и ПЭС с ортогональными турбинами может быть допол-

нительно увеличена (на 5 – 10%) в случае, если вместо синхронных генераторов принять системы «генератор-преобразователь частоты», позволяющие регулировать частоту вращения генератора в широком диапазоне. Причем современная электронная и микропроцессорная техника позволяет полностью автоматизировать технологический процесс генерирования энергии, пуски и остановки, реверс, все уровни защиты при высокой эксплуатационной надежности системы (такие системы в настоящее время широко и успешно осваиваются в зарубежных странах такими известными фирмами, как Toshiba и Hitachi (Япония), создающими гидроагрегаты с регулируемой частотой вращения мощностью до 400 МВт, Badenwerk (Германия) — до 20 МВт и др.

Выбор Кислогубской ПЭС для решения поставленной задачи объясняется относительно низкими затратами на проведение экспериментальных работ за счет того, что на этой станции имеет место, сочетание ряда благоприятных условий:

наличие готового сооружения и пустого водовода с затвором, заранее, при строительстве, предназначавшегося в будущем для установки второго отечественного гидроагрегата для ПЭС;

возможность по уже существующей схеме выдать в энергосистему мощность экспериментального ортогонального агрегата;

возможность при работе турбины диаметром 2500 мм определение характеристик к.п.д. для промышленной ортогональной гидротурбины большого диаметра;

возможность естественным образом за счет приливов получать любой напор в диапазоне от 0 до 3500 мм. и снять характеристики ортогонального агрегата в широком спектре рабочих параметров, в том числе и для гидротурбины диаметром 5000мм.;

возможность проверить методику оптимизации режима работы ПЭС, оснащенного ортогональным гидроагрегатом в условиях реальной станции, включенной в действующую энергосистему;

возможность проводить испытания гидроагрегата в морской воде океанической солености, т.е. в условиях максимально приближенных к условиям проектируемых мощных ПЭС России;

наличие инфраструктуры для проведения экспериментов и исследований: экспериментальное оборудование и жилое помещение со всеми удобствами для исследовательского и эксплуатационного персонала;

возможность после завершения испытаний осуществить мониторинг экспериментальной установки в постоянной эксплуатации в автоматическом режиме с целью дальнейшей отработки отдельных узлов гидроагрегата и оценки его ожидаемого ресурса.

Гидроагрегат 2 для Кислогубской ПЭС с ортогональной турбиной диаметром 2500 мм изготавливался по договору ЗАО «Объединение «Ингеоком» и по техническому заданию ОАО «НИИ-ЭС» в Центре атомного судостроения РФ ФГУП «ПО Севмаш» в г. Северодвинске (Архангельская обл.) под руководством В.П. Пастухова, Ю.В. Кондрашова, М.А. Будниченко и В.В. Ларионова (рис. 3.). Изготовление колеса, турбинной камеры, отсасывающих труб и площадки размещения и обслуживания было осуществлено из черного металла листового проката толщиной от 16 до 22 мм.

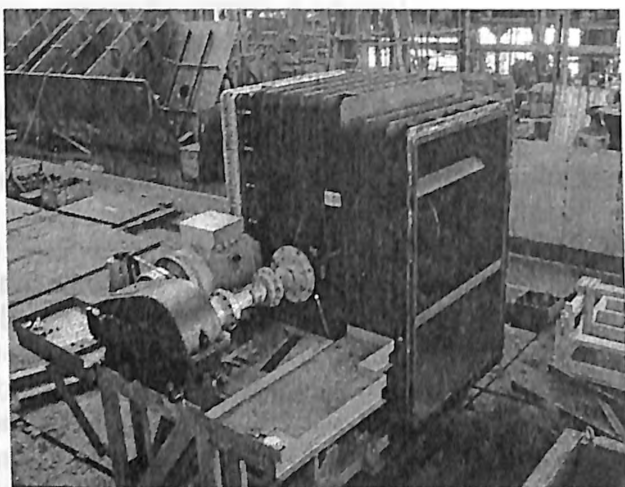


Рис. 3. Общий вид ортогонального гидроагрегата с рабочим колесом 2,5 м

В комплект гидроагрегата вошли стандартные покупные изделия: генератор, редуктор, клапаны, манометр, тормоз, подшипники, манжеты и пр.

Агрегатный блок был собран, испытан на заводе и в готовом виде вместе с элементами отсасывающих труб и опорных конструкций отправлен на Кислогубскую ПЭС, сначала по железной дороге до Мурманска, а затем, на корабле по Баренцеву морю и разгружен на перекрытие здания ПЭС эксплуатационным портално-стреловым краном.

Монтаж всего оборудования был осуществлен заводской бригадой с участием специалистов ОАО «Колэнерго».

Пробный пуск ортогонального гидроагрегата был успешно осуществлен в декабре 2004 г.

*Испытания ортогонального гидроагрегата Кислогубской ПЭС*  
Механические и энергетические испытания, которые рассчитаны

на длительный период были частично выполнены с момента включения гидроагрегата в течение 2004-2006 гг. В результате удалось оценить характеристику ортогональной турбины при работе ее на сеть при напоре близком к максимальному ( $H = 1,6$  м) и при частоте вращения турбины  $n_t = 60$  об/мин и 75 об/мин (рис. 4.).

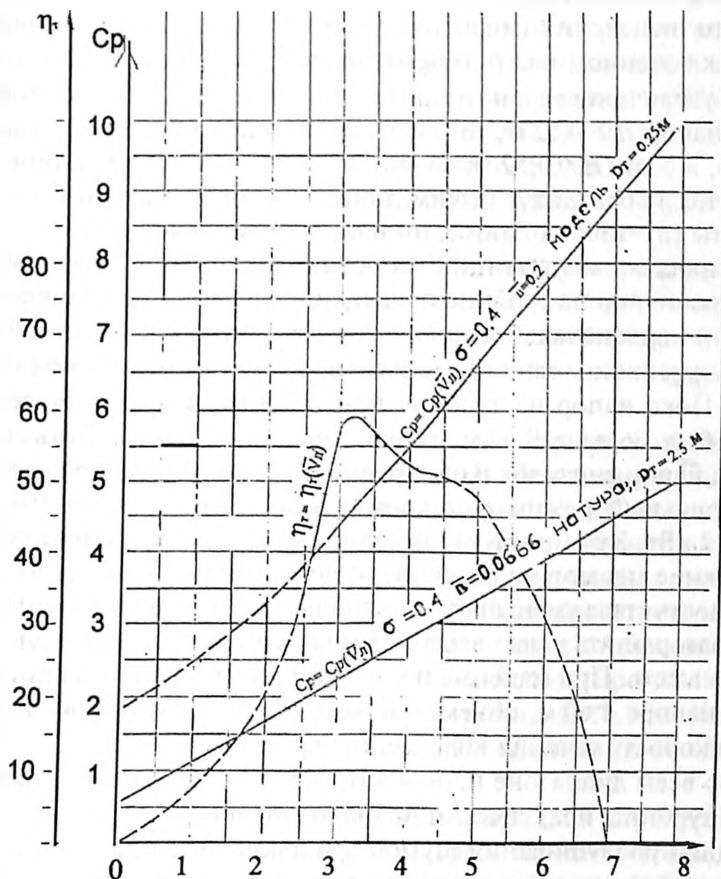


Рис. 4. Универсальная характеристика ортогональной турбины  $D=2,53$  м

В процессе предварительных испытаний было установлено следующее:

Турбина начинает вращаться и достаточно быстро набирает максимальную (угонную) частоту вращения при напоре равном 0,35м. Частота вращения турбины составляет при этом  $n_t = 45,6$  об/мин. При напоре 0,5м турбина разгоняется до частоты вращения  $n_t = 60$  об/мин. и при установленном в период

испытаний мультипликаторе (редукторе) с передаточным отношением  $i = 25$  генератор вращается с номинальной (синхронной) частотой  $n_r = 1500$  об/мин. Поэтому при напоре  $H > 0,5$  м и отпущенном тормозе происходит саморазгон турбины, а генератор при достижении синхронной частоты автоматически включается в сеть методом самосинхронизации. Процесс автоматического включения гидроагрегата в сеть протекает нормально. При включенном в сеть генераторе частота вращения турбины, как с увеличением, так и с уменьшением напора не меняется. Если напор  $H > 0,52$  м, то генератор выдает активную мощность в сеть, а если  $H < 0,52$  м, то потребляет активную мощность из сети, т.е. переходит в режим двигателя, не меняя при этом ни частоты ( $n_r = 1500$  об/мин.), ни направления вращения.

В процессе испытаний был осуществлен режим работы, при котором напор на турбине переходил через нулевое значение со сменой первоначального направления течения воды по водоводу на противоположное, а генератор при этом не выключался из сети. Пока напор на турбине при течении воды из бассейна в море был больше 0,52 м, генератор выдавал мощность в сеть. Когда напор снизился и стал равным нулю, генератор перешел в двигательный режим с максимальной потребляемой мощностью 18 кВт. Затем, при смене направления течения на противоположное (из моря в бассейн), с ростом напоров потребляемая мощность стала уменьшаться, а при напоре, превышающем 0,52 м, генератор опять начал выдавать положительную активную мощность в сеть. При максимальной мощности генератора при работе и напоре 1,60 м. объемным методом была установлена средняя скорость течения воды через турбину 3,67 м/с.

Во всем диапазоне напоров от 0,35 м до 1,6 м звука работающей турбины практически не было слышно.

Для прослушивания шумов вращающейся под напором турбины и уточнения ее угонной характеристики был осуществлен специальный режим. При закрытых затворах турбинного водовода турбина была отсоединена от мультипликатора и генератора путем отсоединения зубчатой муфты от рабочего колеса (на рис. эта муфта не видна, так как ее закрывает генератор). При этом в качестве внешней нагрузки на рабочем колесе турбины остаются только весьма заметные потери мощности на трение в торцевых уплотнениях вала и незначительные потери мощности в подшипниковых опорах. Затем, в период установления нулевого напора, были открыты затворы водовода, и по мере роста напора



турбине, она стронулась с места уже при напоре 0,16 м, а при напоре 0,18 м пошла в угон и достигла максимальной частоты вращения 42 об/мин, отвечающей этому напору. Рост напоров происходил настолько медленно, что турбина постепенно, по мере роста напоров, увеличивала максимальную частоту вращения и этот процесс можно рассматривать, как квазиустановившийся. Максимальный напор на турбине в этих экспериментах составил 0,83 м, а частота вращения турбины составила при этом 95 об/мин. По мере дальнейшего снижения напоров, турбина снижала частоту вращения в угонном режиме. Самопроизвольная остановка турбины произошла при напоре 0,04 м.

Максимальный к.п.д. ортогональной турбины Кислогубской ПЭС  $D = 2,5$  м составил 0,62.

Протечек воды в подвижных соединениях (торцевые уплотнения вала турбины) и неподвижных соединениях обнаружено не было, что говорит о хорошем качестве изготовления и монтажа рабочего колеса турбины и турбинной камеры с примыкающими к ней водоводами.

*Технические предложения по промышленному применению ортогональных гидроагрегатов для мощных ПЭС.* Для мощных ПЭС России: Мезенской на Белом море мощностью до 19,2 млн. кВт, Тугурской мощностью до 8 млн. кВт и Пенжинской мощностью до 87 млн. кВт на Охотском море, а также для низконапорных ГЭС в качестве основного гидросилового оборудования предлагается использовать гидроагрегаты с ортогональными турбинами.

Основанием к этому являются положительные результаты натурных испытаний модельного ряда турбин с  $D=0,25$  м. (микро - ГЭС «Барвиха»),  $D = 0,86$  м. (малая ГЭС «Сенеж») и  $D = 2,5$  м. и  $D = 5,0$  м (Кислогубская ПЭС).

Практически одинаковые параметры прилива для Мезенской и Тугурской ПЭС позволяют рассмотреть экономическую целесообразность применения ортогональных турбин для ПЭС на примере одной из них, в частности для Мезенской ПЭС, расположенной в Европейской части России и являющейся наиболее вероятной ПЭС, строительство которой может стать первоочередным.

При практически одинаковой выработке электроэнергии стоимость строительства ПЭС с ортогональными турбинами снижается более чем на 20%, а с учетом технологических преимуществ изготовления сотен ортогональных турбин по сравнению с осевыми проект Мезенской ПЭС становится реально осуществимым. Целесообразно также для мощных ПЭС России рассмотреть ва-

рианты непосредственного соединения ортогональной турбины с низкооборотным генератором (без мультипликатора) и объединения на одном общем валу нескольких (не менее двух) рабочих колес, передающих мощность на один общий генератор.

Применение нового ортогонального гидроагрегата для ПЭС (по сравнению с применяемыми сейчас традиционными для ПЭС капсульными и разрабатываемыми фирмой Esher Wyss для ПЭС Мерсей трехлопастными осевыми машинами) позволит:

- осуществлять изготовление технологически простых по своей конфигурации ортогональных турбин на заводах общего машиностроения в необходимых количествах и в требуемые сроки. Так, ФГУП «ПО «Севмаш» дает гарантию изготовления в год до 160 ортогональных машин диаметром 5 м;

- сократить массу ортогонального гидроагрегата (а, следовательно, и стоимость);

- сократить количество гидроагрегатов (при сохранении выработки количества электроэнергии) за счет возможности объединения на одном валу не менее, чем двух ортогональных турбин;

- сократить физический объем здания ПЭС;

- увеличить вдвое пропускную способность турбин при холостых пропусках воды и в связи с этим отказаться от сооружения в составе гидроузла отдельной водопропускной плотины, заменив ее на более простую и дешевую земляную плотину – дамбу;

- сократить потери пропускаемого через менее затененную ортогональную турбину планктона, являющегося основным питанием для рыбного стада;

- сократить капитальные затраты на сооружение ПЭС (по оценке в ТЭД-2006 Мезенской ПЭС затраты на новые сопоставимые ГЭС превышают капзатраты на сооружение ПЭС).

С целью последующего применения ортогональных гидроагрегатов в отечественной энергетике на Мезенской и Тугурской ПЭС (на этих ПЭС равноценные величины прилива) разработан и осуществлен на «Севмаш» типовой опытный наплавной блок – модуль здания ПЭС укороченного размера с ортогональным гидроагрегатом диаметром 5 м (турбина с вертикальным валом) заводского промышленного изготовления (рис. 5) [6].

В феврале 2007 г. этот типовой для крупных ПЭС наплавной блок «Малая Мезенская ПЭС» с опытным образцом серийного ортогонального гидроагрегата диаметром 5 м. установлен на Кислогубской ПЭС (пристыкован к водоводу 1 этой ПЭС). Начались его всесторонние натурные испытания. Конструкция нового энергоблока ПЭС и ортогональных машин защищена патентами РФ [7,8].



Рис. 5. Рабочее колесо ортогонального гидроагрегата диаметром 5 м.

#### Выводы

1. На Кислогубской ПЭС установлен новый энергоблок «Малая Мезенская ПЭС» мощностью 1,5 МВт с опытным образцом серийного одноярусного ортогонального гидроагрегата для ПЭС с диаметром рабочего колеса 5 м (ОГА-5)
2. Испытания ортогонального гидроагрегата диаметром 5 м осуществляются на Кислогубской ПЭС, на которой в период сизигии возможно получение рабочих напоров (3,5 м) Мезенской и Тугурской ПЭС
3. Энергоблок «Малая Мезенская ПЭС» представляет собой полный прототип будущего промышленного исполнения наплавным способом типовых блок – модулей с ортогональными гидроагрегатами для Мезенской и Тугурской ПЭС («Севмаш» подтверждает возможность изготовления в своем доке полностью оборудованных 16 наплавных блоков в год для Мезенской ПЭС с 10-ю агрегатными секциями в каждом блоке)
4. Результаты испытаний нового ортогонального гидроагрегата на Кислогубской ПЭС позволят приступить с 2007 года к проектированию и строительству сначала Кольской, а затем и Мезенской ПЭС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн Л.Б., Гаврилов В.Г., Усачев И.Н. и др. Кислогубская приливная электростанция. М.: «Энергия». 1972.

2. Бернштейн Л.Б., Гельфер С.Л., Усачев И.Н. и др. Приливные электростанции. М.: «Гидропроект». 1994. Сеул. Корея. KORD1. 1996 (на английском). Ханчжоу. Китай. ROADHANGYOO. 1996 (на китайском).
3. Золотов Л.А., Историк Б.Л., Усачев И.Н. Новая турбина для низконапорных гидроэнергетических установок. //Гидротехническое строительство. 1991. №1
4. Историк Б.Л., Прудовский А.М., Усачев И.Н., Шполянский Ю.Б. Применение ортогональной турбины на приливных электростанциях // Гидротехническое строительство, 1998, №12
5. Историк Б.Л., Прудовский А.М., Усачев И.Н., Шполянский Ю.Б. Ортогональная гидравлическая турбина, пригодная при реверсивном течении «Моделирование, тестирование и мониторинг для гидроэлектростанций». Aix-en-Provans, Франция. 1998
6. Патент РФ 2044155. Гидротурбинная установка /Историк Б.Л., Шполянский Ю.Б. Открытия. Изобретения. 1995.
7. Усачев И.Н., Историк Б.Л. Оборудование приливных электростанций, Энциклопедия систем, поддерживающих жизнь. Том Е3-08-05-04. ЮНЕСКО. Оксфорд. Великобритания. 2003.
8. Историк Б.Л., Усачев И.Н., Шполянский Ю.Б. Новый ортогональный гидроагрегат для приливных электростанций, //Гидротехническое строительство. 2007. № 4.
9. Бородин В.В., Будниченко М.А., Историк Б.Л., Кондрашов Ю.В., Пастухов В.П., Рудяк М.С., Усачев И.Н., Шполянский Ю.Б. Гидроэнергетическая установка. Патент РФ 60644 с приоритетом 30.08.2006. Опубликовано: 27.01.2007. Бюл. №3. 2007.

### **III. ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ВОДОХРАНИЛИЩ И РЕК**

#### **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЕЙ ВОДЫ В РЕКЕ, ГДЕ ПРОИСХОДИТ ТРАНСФОРМАЦИЯ РУСЛА, МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ЭКСТРАПОЛЯЦИЙ С УЧЕТОМ РИСКА**

*Стефанишин Д.В., доктор техн. наук, Фролов А.Н., инженер  
(ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»)*

Гидрологический режим рек в его экстремальных проявлениях (максимумах и минимумах стока) является одним из основных факторов, определяющих безопасность приречных территорий и надежность функционирования объектов использующих и потребляющих воду, в том числе тепловых электростанций (ТЭС). В периоды наводнений (половодье, дождевые паводки) могут иметь место проблемы с функционированием гидротехнических сооружений (насосных станций и других), опасности затоплений пойменных территорий и подтоплений надпойменных площадок ТЭС. В периоды межени (минимумы стока) могут иметь место перебои в системах технического и хоз-питьевого водоснабжения, интенсификация эрозии, ухудшения показателей качества воды, условий судоходства и т. п. [1, 2].

Непосредственно опасность экстремальных проявлений речного стока характеризуются отметками максимальных и минимальных уровней воды в реке. При этом основной причиной повышения-понижения уровней в настоящее время во многих случаях является трансформация речного русла.

Под трансформацией русла, согласно М.Э. Факторовичу [3, 4], понимают изменение геометрических и гидравлических характеристик русла реки, происходящее на значительном ее протяжении и обусловленное нарушением ранее существовавших режимов твердого и жидкого стоков. В результате трансформации в про-

цессе русловых переформирований начинают преобладать необратимые деформации, проявляющиеся в изменении связи между расходами и уровнями воды в различных сечениях реки. При этом, на разных участках реки трансформация русла может приводить как к понижению уровней при неизменных расходах — на участках развития эрозии, так и к их повышению — на участках отложения продуктов эрозии [4, 5].

Причины трансформации речных русел могут быть разными. Это и гидротехническое строительство — сооружение плотин и водохранилищ, перехватывающих твердый сток (наносы), русловые карьерные разработки песка и гравия и другие [4 — 8]. Обычно, существенное изменение режимов уровней воды в результате трансформации русел происходит в относительно короткий срок, однако, при русловых карьерных разработках и ряде других случаев процессы трансформации русла могут со временем усиливаться и продолжаться десятки лет [4]. При этом нарушается однородность гидрологических рядов, что следует учитывать при прогнозировании гидрологических характеристик статистическими методами [9].

Статистический подход с использованием методов теории вероятностей является основным способом для решения задач прогнозирования гидрологических характеристик. В рамках статистического подхода интегрировано учитывается комплекс разнообразных факторов, определяющих образование стока, путем прямых измерений уровней и расходов воды с последующей статистической обработкой гидрологических рядов и их экстраполяцией аналитическими законами распределения [10, 11].

Построение аналитических кривых обеспеченности на основе результатов статистического анализа гидрологических данных позволяет, при определении расчетных гидрологических характеристик, оперировать их годовой обеспеченностью или вероятностью превышения, которые могут трактоваться как гидрологические надежность или риск, соответственно [12]. Так для максимальных гидрологических характеристик, в зависимости от класса гидротехнического сооружения, категории надежности системы водоснабжения вероятность превышения при проектировании устанавливается от 0,01% до 5-7%, а для минимальных гидрологических характеристик — от 90% до 97%.

В тоже время учет эффектов трансформации речного русла при прогнозировании гидрологических характеристик наиболее полно можно осуществить в рамках генетического подхода, который ориентируется на исследование генезиса (происхождения) параметров речного жидкого и твердого стоков [5, 10, 13].

В настоящее время существуют и применяются на практике ряд расчетных методов генетического типа, позволяющих прогнозировать ход трансформации русла реки на основе математического моделирования. По принципу обоснования их условно разделяют на гидромеханические и гидролого-морфометрические методы [4]. Гидромеханические методы основываются на решении системы уравнений, обычно 1-D модели, руслового взвешенного потока, замыкаемой с помощью тех или других допущений и эмпирических зависимостей [4]. Методы гидролого-морфометрического направления базируются на использовании корреляционных морфометрических зависимостей между основными параметрами руслового потока.

Более адекватными физике явлений, определяющих русловые переформирования, считаются методы гидромеханического направления, однако, они не всегда позволяют учитывать с достаточной полнотой все особенности руслового процесса [4]. Морфометрические методы, уступая гидромеханическим методам в части физического обоснования, в ряде случаев могут быть довольно эффективными, упрощающими задачу. Однако решение задачи и гидролого-морфометрическими методами также может усложниться на практике, поскольку они нуждаются в изучении баланса наносов, что не всегда удается с достаточной адекватностью, например, применительно к русловым карьерным разработкам.

Ограниченность исходных данных, особенно имеющих отношение к балансу речных наносов, перспективам объема карьерных разработок в русле и на пойме приводит к тому, что использование гидромеханических и гидролого-морфометрических методов при прогнозировании экстремальных уровней воды в реке, где происходит трансформация русла, часто становится задачей осложненной неопределенностью исходной информации.

Прогнозирование гидрологических характеристик генетическими методами существенно осложняется и по экономическим причинам, связанным с получением дополнительной информации, в том числе путем проведения натурных исследований [11, 14]. Кроме того, в рамках гидромеханических и гидролого-морфометрических методов, идентификация и корректирование параметров математических моделей, верификация численных решений, как правило, осуществляется по ретроспективным данным, и, следовательно, решения данными методами в некотором роде также являются экстраполяциями прошлых (ретроспективных) тенденций на будущее.

При прогнозировании изменения уровней на реке, где трансформация русла продолжается длительное время и имеется дли-

тельный ряд (ряды) гидрометрических наблюдений, представляется целесообразным применение прямой статистической экстраполяции.

В основе метода экстраполяции лежит пролонгация прошлых тенденций в развитии исследуемого явления на будущее [9], при этом выделяется неслучайная составляющая ряда измерений и случайная его составляющая.

В общем случае неслучайная составляющая в колебаниях экстремальных уровней воды может обуславливаться наличием одной или нескольких компонент [9]: 1) направлением изменения среднего (трендом); 2) аперiodическими (циклическими) колебаниями возле среднего; 3) сезонными изменениями; 4) детерминированной составляющей. Выделив выше перечисленные тенденции из временного ряда значений, остатки ряда исследуют как случайные величины.

Выбор зависимости для моделирования той или иной неслучайной компоненты обуславливают точностью выравнивания временного ряда, например, по методу наименьших квадратов.

Задача по выделению неслучайных компонент в поведении гидрологического ряда упрощается при долговременном прогнозировании. При этом, циклическими (многолетними) изменениями можно пренебречь, рассматривая сезонные изменения отдельно, т. е. анализируя соответствующие разным сезонам многолетние тренды, тем более что в нашем случае имеет место сезонное различие воздействия гидрологических характеристик на гидросооружения.

Методом статистических экстраполяций нами было произведено прогнозирование (до 2030 года) поведения минимальных уровней воды на р. Оке в районе гидрометрического поста г. Кашира при сохранении существующих тенденций русловых карьерных разработок и условий образования минимального стока в бассейне реки.

Особенностью предлагаемого подхода к прогнозированию минимальных уровней воды в реке, где происходит трансформация русла, с использованием метода статистических экстраполяций, является раскрытие неопределенности перспективного прогнозирования, обусловленной использованием ретроспективных данных и пролонгации тенденций на основе учета риска.

На р. Оке, начиная с 1954 года, в результате русловых и пойменных карьерных разработок, происходит трансформация русла [15], приводящая к настоящему времени к значительному (~1,9 м) «падению» минимальных, меженных уровней воды (рис. 1).



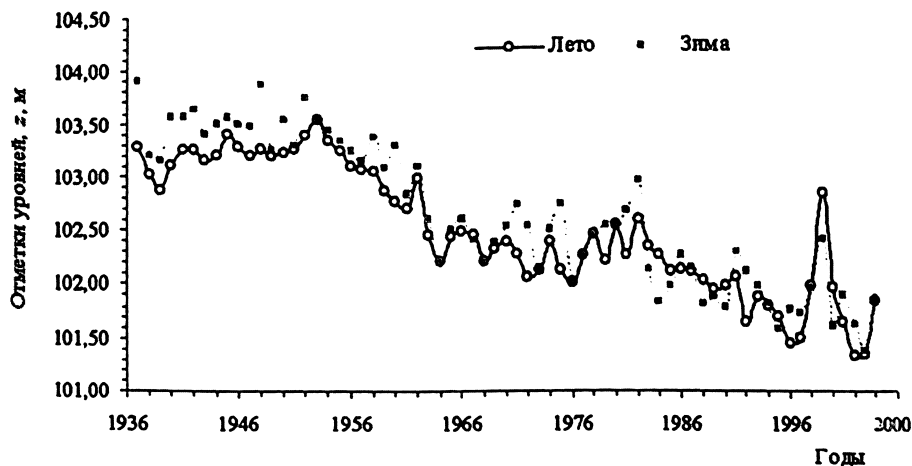


Рис. 1. Графики минимальных уровней воды в р. Ока в летний и зимний меженные периоды (гидрометрический пост Кашира)

Анализ данных гидрологических расчетов минимального расхода, которые проводились в «МО Теплоэлектропроект», «Союзводоканалпроект», «ИВП РАН» на различных по продолжительности гидрологических рядах (от 37 до 103 лет) свидетельствует о практической неизменности минимального стока р. Оки в створе г. Кашира. Кроме того, по данным [16] изменение минимального стока в результате водопотребления в бассейне р. Оки на участке Калуга-Муром составило лишь около 4,7% от общего его объема.

При решении задачи были рассмотрены пять гипотез относительно трендов поведения летних минимальных уровней (рис. 2) для разных по продолжительности и начальному году гидрологических рядов. Таким образом, зона неопределенности перспективного прогнозирования «покрывалась» несколькими альтернативными трендами с целью более полного учета ретроспективных тенденций.

Тренды моделировались экспоненциальными зависимостями (рис. 2). Моделирование и численные расчеты велись в среде MS Excel.

Для каждого из трендов определялась достоверность аппроксимации и была осуществлена нормализация достоверностей на множестве гипотез по формуле:

$$V^H(R^2)_i = \frac{R_i^2}{\sum_{i=1}^n R_i^2} \quad (1)$$



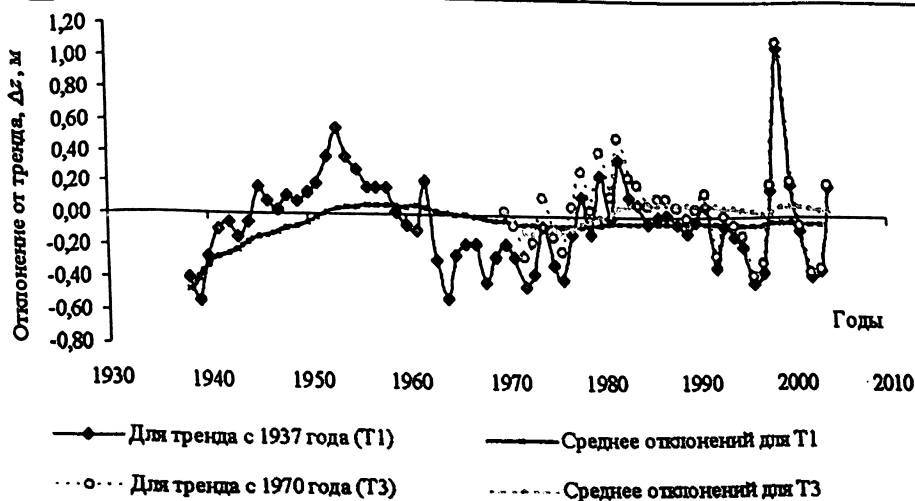


Рис. 3. Графики  $\Delta z_i(t)$  и их накопленных средних значений для гидрометрического поста Кашира (летний период)

По значениям отклонений  $\Delta z_i(t)$  на соответствующих ретроспективных интервалах были построены эмпирические кривые обеспеченности (рис. 4). Расчеты велись по формуле Н.Н. Чегодаева [10].

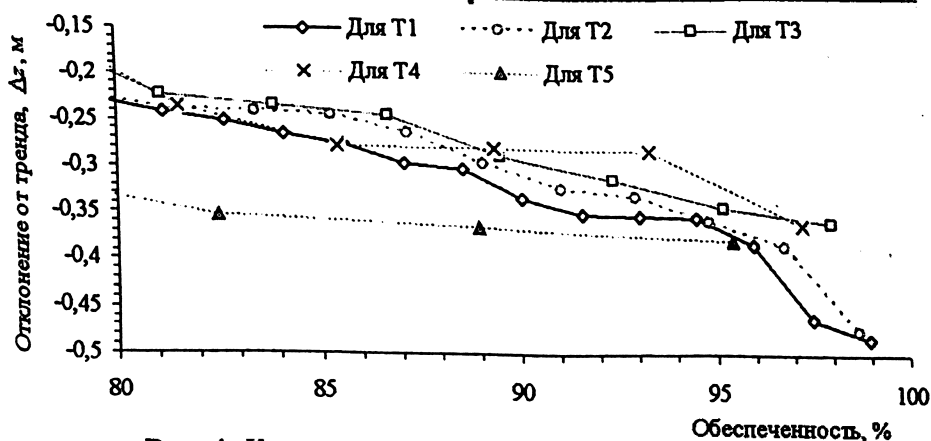


Рис. 4. Кривые эмпирической обеспеченности  $\Delta z_i(t)$  для гидрометрического поста Кашира (летний период)

Расчетные значения минимального уровня воды, например обеспеченностью 95%, для каждого  $i$ -го тренда на лето 2030 года определялись по формуле:

$$z_{i,95\%} = z_{0,i} + \Delta z_{i,95\%} \quad (2)$$

где:  $z_{0,i}$  — значения  $i$ -го тренда на лето 2030 года;  $\Delta z_{i,95\%}$  — расчет-

ное значение 95% обеспеченности прогнозируемого отклонения годового минимума в летний сезон от  $i$ -го тренда на лето 2030 года.

Обобщенное по трендам расчетное перспективное значение минимального уровня воды обеспеченностью 95% на лето 2030 года определялось как:

$$z_{95\%} = \sum_{i=1}^n z_{i,95\%} V^n(R^2)_i, \quad (3)$$

где  $n = 5$  — количество модельных трендов ( $i$ -х гипотез);  $V^n(R^2)_i$  — нормализованная достоверность аппроксимации  $i$ -го тренда.

Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты прогнозирования минимального уровня воды 95% обеспеченности для р. Оки в районе гидрометрического поста Кашира для лета 2030 года

Показатели	Тренды (гипотезы) $T(H_i)$					Сумма
	1	2	3	4	5	
Значения тренда $Z_{0,i}, \text{м}$	100,95	100,81	101,09	100,7	101,26	
Отклонения от тренда $\Delta z_{i,95\%}, \text{м}$	-0,37	-0,37	-0,35	-0,32	-0,38	
Достоверность аппроксимации $R_i^2$	0,7946	0,7519	0,4698	0,3945	0,038	2,4488
Нормализованная достоверность аппроксимации $V^n(R^2)_i$	0,3245	0,3071	0,1918	0,1611	0,0155	1
Расчетные значения минимального уровня воды $z_{i,95\%}, \text{м}$	100,58	100,44	100,74	100,38	100,88	
$z_{i,95\%} V^n(R^2)_i, \text{м}$	32,638	30,845	19,322	16,171	1,5637	100,54

Дополнительно, к результатам табл. 1, были проанализированы зависимости результатов прогнозирования от количества используемых гипотетических трендов.

На рис. 5 приводятся графики зависимости обобщенного на множестве гипотетических трендов расчетного значения минимального уровня воды 95% обеспеченности от количества используемых при обобщении гипотез (трендов).

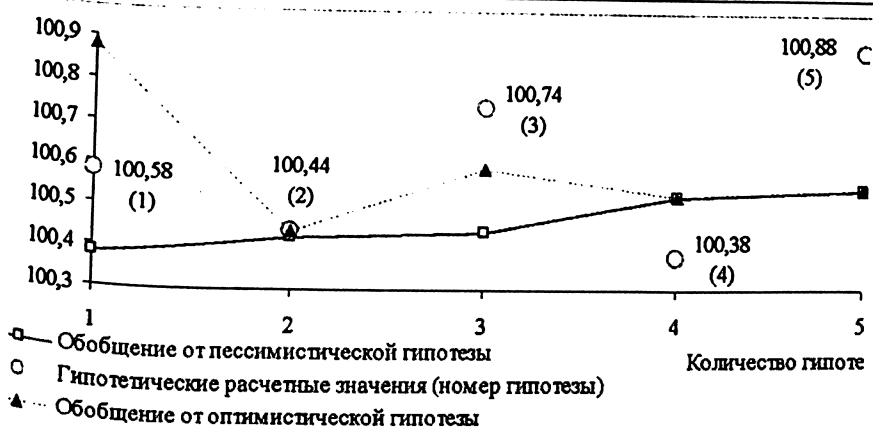


Рис. 5. Зависимость обобщенного расчетного минимального уровня воды на лето 2030 года в р. Оке от количества используемых гипотез (трендов) для гидрометрического поста Кашира

На рис. 6 приводятся графики зависимости относительных погрешностей обобщения от величины прогнозируемого падения минимального уровня с 2004 по 2030 год и количества используемых при обобщении гипотетических трендов.

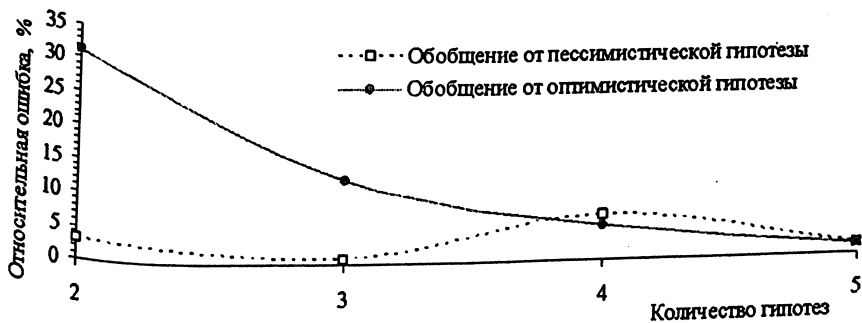


Рис. 6. Зависимость относительных погрешностей обобщения расчетного летнего минимального уровня от величины прогнозируемого его падения в р. Оке с 2004 по 2030 год для гидрометрического поста Кашира

Представленные на рис. 5, 6 графики позволяют констатировать, что использование множества гипотетических трендов дает принципиальную возможность раскрывать неопределенность перспективного прогнозирования в рамках метода статистических экстраполяций с учетом риска — как риска, связанного с достоверностью аппроксимации временных рядов, так и допустимого риска, связанного с расчетной обеспеченностью минимальных

уровней. Второй вывод заключается в том, что расчетное множество гипотетических трендов при прогнозировании может быть ограничено в зависимости от поставленной задачи.

Предлагаемая методика позволяет прогнозировать минимальные и максимальные уровни в реке, где происходит трансформация русла, с целью обеспечения надежной эксплуатации насосных станций и других сооружений ТЭС. Методика может использоваться как на начальных стадиях изменения уровней воды в реке, так и при отсутствии данных, которые требуются для проведения расчетов гидромеханическими или гидролого-морфометрическими методами. Дальнейшее развитие методики связано с учетом циклических колебаний стока, что позволит осуществлять адекватное прогнозирование и на коротких интервалах времени.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Векслер А.Б., Ивашинцов Д.А., Стефанишин Д.В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. СПб.: ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». 2002.
2. Россия: социально-экологические водные проблемы /Под ред. А.М. Черняева; РосНИИВХ. —Екатеринбург: Изд-во Аэрокосмоэкология. 1999.
3. Факторович М.Э. Развитие аналитического описания процесса русловых трансформаций. //Труды коорд. совещаний по гидротехнике. Вып. 36. 1967.
4. Векслер А.Б., Донеберг В.М. Переформирование русла в нижних бьефах крупных гидроэлектростанций. М.: Энергоатомиздат. 1983.
5. Environmental experience gained from reservoirs in operation. Transactions of the 18-th Int. Congress on Large Dams. Vol. 2. Q.69. Durban - South Africa. November. 1994.
6. Гришанин К.В. Устойчивость русел рек и каналов. Л.: Гидрометеиздат. 1974.
7. Экология эрозионно-русловых систем России /Под ред. Р.С. Чалова. М.: Географический факультет МГУ. 2002.
8. Knighton D. River channels: environment and processes. N.Y.: Basil Blackwell Ink. 1987.
9. Методы расчета низкого стока. Под ред. Т. А. Мак Магона и А. Диаза Аренаса. Вклад в Международную гидрологическую программу. Л.: Гидрометеиздат, 1984.
10. Виссен У., Харбаф Т.И., Кнэпш Д.У. Введение в гидрологию. Л.: Гидрометеиздат. 1979.
11. Владимиров А.М. Гидрологические расчеты. Л.: Гидрометеиздат. 1990.
12. Векслер А.Б., Стефанишин Д.В. К вопросу о назначении вероятностей превышения расчетных расходов воды в зависимости от длительности временной эксплуатации гидротехнических сооружений и их класса. // Гидротехническое строительство. №11. 2004.

13. Картвелишвили Н.А. Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулирование речного стока. Л.: Гидрометеоиздат. 1985.
14. Асарин А.Е., Прудовский А.М. Гидрологическая безопасность.// Безопасность энергетических сооружений. Вып. 2-3. М.:ОАО "НИИЭС". 1998.
15. Беркович К.М. Современная трансформация продольного профиля верхней Оки. //Геоморфология. №3. 1993.
16. Бабкин В.И., Вуглинский В.С. Водный баланс речных бассейнов. Л.: Гидрометеоиздат. 1982.

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ С РЕЗКИМИ ПЕРЕПАДАМИ ОТМЕТОК ДНА**

*Беликов В.В., доктор техн. наук, Борисова Н.М., кандидат физ.-мат.наук (ОАО «НИИЭС»), Остапенко В.В., доктор физ.-мат. наук (Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН).*

В гидравлической практике часто возникает необходимость расчета течений со свободной поверхностью над профилем дна сложной формы и с большими градиентами, в том числе и при наличии разрывов отметок дна. Например, это течения на порогах шлюзов (в частности, в случае разрушения шлюзовых ворот), в водосбросных сооружениях с подпорными стенками, ступенчатых водосбросах, при переливах через гребень плотины и т.п.

Зачастую, такие течения моделируются в рамках уравнений мелкой воды (одномерных либо двумерных уравнений Сен-Венана). При этом на разрывах дна возникают сложности принципиального характера как в теоретическом плане (не выполняется закон сохранения полного импульса), так и при реализации устойчивых и монотонных численных алгоритмов.

В последние годы В.В.Остапенко предложена модифицированная система уравнений мелкой воды на разрывах поверхности дна и получены ее важные теоретические решения для различных случаев, в том числе, для задачи о разрушении плотины. С одной стороны, эти исследования послужили основой для построения адекватных численных алгоритмов для уравнений мелкой воды с выделением линий разрыва, а с другой, дали возможность оценить точность и применимость существующих схем сквозного счета для решения подобных задач. В настоящей работе рассматриваются оба этих вопроса.

### Методика моделирования

Дифференциальные уравнения однослойной мелкой воды (уравнения Сен-Венана) [1,2] в случае прямоугольного русла постоянной ширины и переменной глубины, без учета влияния трения, имеют вид

$$h_t + q_x = 0, \quad (1)$$

$$q_t + \left( qv + g \frac{h^2}{2} \right)_x = -ghb_x, \quad (2)$$

где  $h(x,t)$ ,  $q(x,t)$ ,  $v = q/h$  — глубина, удельный расход и скорость жидкости;  $b(x)$  — функция отметки дна;  $g$  — ускорение свободного падения. В классической теории мелкой воды предполагается, что функция отметки дна является непрерывной, тогда уравнения (1) и (2) являются системой базисных законов сохранения массы и полного импульса соответственно, из которой следуют условия Гюгонио на ударных волнах

$$D[h] = [q] \quad (3)$$

$$D[q] = \left[ qv + g \frac{h^2}{2} \right], \quad (4)$$

где  $D$  — скорость распространения волны, а  $[f] = f_1 - f_0$  — скачок функции на ее фронте,  $f_0$  — значение функции перед фронтом волны,  $f$  — значение функции за фронтом волны.

Предположим, что функция является кусочно-постоянной на интервале

$$I = \{0 \leq x \leq X\} \quad (5)$$

и имеет разрыв в некоторой точке  $x_* \in I$ , т.е.

$$b(x) = \begin{cases} b_1, & 0 \leq x \leq x_* \\ b_0, & x_* < x \leq X \end{cases} \quad (6)$$

Будем считать, что жидкость движется слева направо, тогда с учетом терминологии, принятой в [3], разрыв (6) в случае будем называть уступом, а  $b_1 < b_0$  — ступенькой дна. Поскольку уравнения мелкой воды (1), (2) представляют собой простейший пример сильно нелинейной гиперболической системы законов сохранения [4], эквивалентной системе уравнений изоэнтропичес-



кой газовой динамики [5] с показателем адиабаты, то, следуя [6], решение для этих уравнений задачи о распространении жидкости в канале будем искать в виде комбинации простых волн, стационарного скачка, расположенного над скачком отметки дна (6), и соединяющих их зон постоянного течения. В серии работ [7, 8, 9] была построена теория, хорошо совпадающая с экспериментом, позволяющая использовать систему уравнений мелкой воды (1), (2) в случае кусочно-постоянной функции отметки дна вида (6). Согласно этой теории, по аналогии с [6], предполагается, что на стоячем разрыве глубины, возникающем над скачком отметки дна (6), выполнены законы сохранения массы (1) и локального импульса

$$v_t + \left( \frac{v^2}{2} + gz \right)_x = 0, \quad (7)$$

где  $z = h + b$  — уровень жидкости в канале. Закон сохранения локального импульса (7) является дифференциальным следствием системы (1), (2) на ее гладких решениях. Условие Гюгонио для уравнения (7) имеет вид

$$D[v] = \left[ \frac{v^2}{2} + gz \right]. \quad (8)$$

Из (3), (8) следует, что на стационарном скачке глубины, скорость которого, возникающем над скачком отметки дна (6), непрерывны расход и константы Бернулли

$$[q] = 0, \quad \left[ \frac{v^2}{2} + gz \right] = 0. \quad (9)$$

Задача о распространении жидкости в канале в рамках классической системы уравнений (1), (2) будем решать на интервале  $I$  (5), на котором необходимо задать отметку рельефа дна  $b(x)$  вида (6), начальное значение уровня воды  $b(x)$  и начальную скорость жидкости  $v_0(x)$ . На границах интервала  $I$  либо ставится условие непротекания  $v = 0$ , либо задается значение инварианта, принимаемого на границу вдоль характеристики, выходящей из внутренней части интервала  $I$ .

Сквозным счетом решать данную задачу в рамках классической системы уравнений (1), (2) на первый взгляд невозможно, т.к. на стоячем разрыве глубин, возникающем над разрывом функции

отметки дна (6), не выполняется закон сохранения полного импульса (2), а выполнены дополнительные соотношения (9). Поэтому для решения такой задачи необходимо выделить разрыв над скачком отметки дна (6), для чего интервал  $I$  делится на две части:  $I_1 = \{0 \leq x \leq x_*\}$  и  $I_0 = \{x_* \leq x \leq X\}$ .

На каждом из этих интервалов поставленную задачу можно решать с помощью любой подходящей схемы сквозного счета, а параметры течения на неподвижном разрыве над скачком отметки дна (6) на каждом временном слое определять с помощью дополнительного решения системы из четырех уравнений, представляющих собой соотношения на приходящих из внутренней части областей  $I_1$  и  $I_0$  характеристиках (при этом в число приходящих включаются характеристики, распространяющиеся с нулевой скоростью вдоль линии стационарного разрыва) и условий Гюгионо (9). При этом, если на линию неподвижного разрыва над скачком отметки дна (6) пришло три характеристики, то для определения параметров течения на таком разрыве, в соответствии с [7], из двух условий Гюгионо (9) будет использоваться только первое, вытекающее из закона сохранения массы (1), т.е. условие непрерывности расхода.

Параметры течения слева и справа на стационарном скачке над разрывом отметки дна (6) обозначим соответственно нижним индексом 1 и 0. Чтобы определить количество характеристик, приходящих на стационарный скачок над разрывом отметки дна из внутренней части областей и необходимо сравнить скорость  $v_1$  со значением  $v_C(h_1)$ , а  $v_0$  с  $v_C(h_0)$ , где  $v_C(h) = \sqrt{gh}$ . Тогда, если  $v_1 \geq v_C(h_1)$ , то на линию стационарного скачка слева приходят две  $r$ - и  $s$ - характеристики, вдоль которых переносятся соответственно  $r$ - и  $s$ -инварианты системы (1) — (2), если  $v_1 < v_C(h_1)$  — одна  $s$ - характеристика. Если  $v_0 \leq v_C(h_0)$ , то на линию стационарного скачка справа приходит одна  $r$ -характеристика, если  $v_0 > v_C(h_0)$  — ни одной. Затем для каждой приходящей на линию стационарного разрыва характеристики вычисляется значение переносимого вдоль нее инварианта, для этого определяется точка  $y$ , из которой выходит эта характеристика с предыдущего временного слоя, т.е. численно решается уравнение относительно  $y$ :

$$x_* = y + \tau \left( v(y) - \sqrt{gh(y)} \right)$$

для  $r$ -характеристики,

$$x_* = y + \tau (v(y) + \sqrt{gh(y)})$$

для  $s$ -характеристики, где  $\tau$  — шаг с предыдущего на новый временной слой, и  $h(y)$  определяются интерполированием по двум ближайшим к стационарному скачку сеточным значениям скорости и глубины жидкости на предыдущем временном слое. В данной работе определение точки  $y$  проводилось с помощью метода «золотого сечения». Вычислив  $y$  и значения  $v(y)$  и  $h(y)$  определяется для  $r$ -характеристики переносимый вдоль нее  $r$ -инвариант  $r = v(y) - 2\sqrt{gh(y)}$ , а для  $s$ -характеристики —  $s$ -инвариант

$$s = v(y) + 2\sqrt{gh(y)}.$$

Далее, используя условия (9) и значения вычисленных инвариантов, можно определить значения скорости и глубины жидкости слева  $v_1, h_1$  и справа  $v_0, h_0$  на стационарном скачке на новом временном слое, а далее применять схему сквозного счета отдельно для каждого интервала  $I_1$  и  $I_0$ . В данной работе в качестве схемы при расчете с выделением разрыва дна использовалась TVD — схема Хартена [10], имеющая второй порядок точности на гладких решениях. При расчетах сквозным способом (без выделения разрыва дна) применялась неявная схема А.Н. Милитеева [11] и ее модификация с направленными разностями.

### Результаты расчетов

Рассмотрим задачу о разрушении плотины (1)-(2).

$$h(0) = \begin{cases} H_1, & x \leq x_* \\ H_2, & x \geq x_* \end{cases}, \quad v(0) = 0, \quad (10)$$

над уступом дна

$$b(x) = \begin{cases} b, & x \leq x_* \\ 0, & x \geq x_* \end{cases} \quad (11)$$

На рис. 1 и 2 приведено сравнение численного решения этой задачи по описанному выше алгоритму с результатами экспериментов, описанных в [12], и с точными решениями, построенными по теории, разработанной в работах [7, 8, 9]. Уступ расположен в начале координат, т.е.  $x_* = 0$ . На рис. 1 (кривые 1, 2, 3) приведены типичные примеры экспериментальных волн в нижнем бьефе, ре-

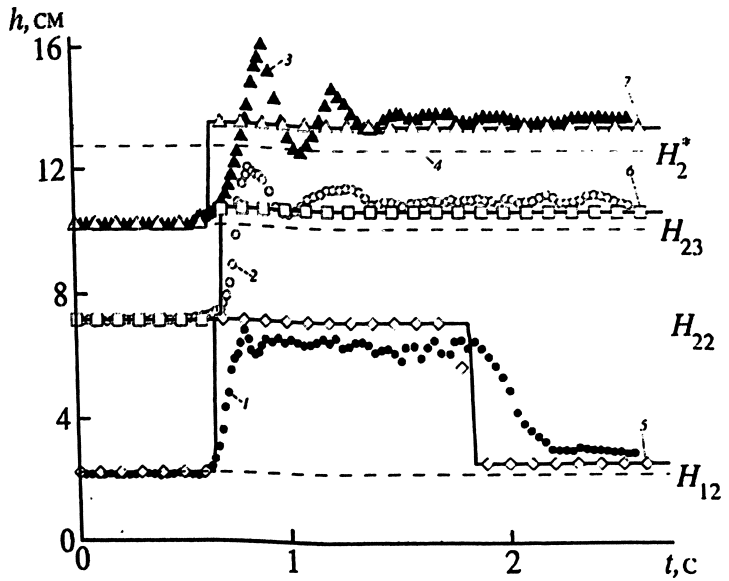


Рис.1. Изменение уровня свободной поверхности во времени при . .  
 Экспериментальные данные: 1 - ; 2 - ; 3 - . 4 - теоретическая верхняя  
 граница неподтопленного режима. 5, 6, 7 - соответствующие численные  
 решения; сплошные линии - соответствующие точные решения

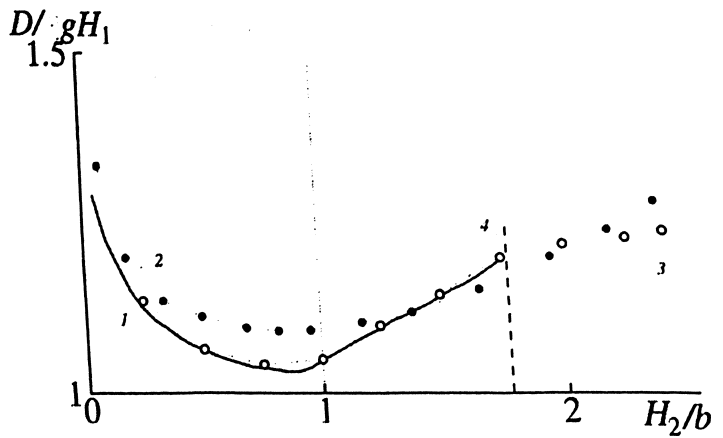


Рис.2. Скорость распространения бора при : 1 - точное решение; 2 -  
 эксперимент; 3 - численное решение; 4 - верхняя граница области  
 применимости теории по условию

гистрируемых неподвижными волномерами. Волномер дает информацию о колебании уровня свободной поверхности во времени и не различает направление движения волн. В его сигнале передний фронт волны расположен слева (в нижнем бьефе волны распространяются вправо). Можно отметить, что при начальной глубине в нижнем бьефе  $H_{21}$  профиль решения представляет собой две прерывные волны, распространяющиеся вниз по потоку, а при  $H_{22}$  и  $H_{23}$  — одну. Расчетные и экспериментальные данные о скорости распространения  $D$  переднего фронта волны (в неподвижной системе координат) при  $H_1 = 12,5$  см перед уступом высотой  $b = 7,2$  см приведены на рис. 2. Следует отметить, что в эксперименте возникают трудности при измерении скорости распространения рассматриваемых здесь волн. Прежде всего, строгое определение скорости распространения можно дать лишь для стационарных волн, когда их форма неизменна в системе координат, движущейся с волной, или для автомодельных решений, полученных в [7]. В эксперименте условия стационарности или автомодельности, строго говоря, не выполняются из-за диссипации энергии. С учетом сказанного соответствие расчетных и экспериментальных данных на рис. 2 можно считать удовлетворительным.

Рассмотрим задачу о разрушении плотины (1), (2), (10) над уступом дна (11) высотой  $b = 3$  м, расположенного в точке  $x_* = 50$  м при начальных данных  $H_1 = 10$  м и глубине нижнего бьефа 0,01 м (рис.3 а), 1 м (рис.3 б), и 4 м (рис.3 в). На рис. 3 приведены для сравнения численное решение данной задачи, полученное сквозным счетом по неявной схеме А.Н. Милитеева [11] с направленными разностями (белые кружки), решение по описанному в данной работе алгоритму с выделением разрыва над уступом (черные кружки) и точное решение (сплошная тонкая линия). Как видно из этих рисунков, решение с выделением разрыва более точно передает параметры течения. Для третьего расчета пришлось модифицировать схему сквозного счета введением потерь энергии по формуле Борда, т.к. при таких начальных данных существует только решение с потерей энергии, и первоначальное решение по неявной схеме неверно передает его профиль.

Рассмотрим задачу о разрушении плотины (1), (2), (10) над ступенькой дна

$$b(x) = \begin{cases} 0, & x \leq x_* \\ b, & x \geq x_* \end{cases}$$

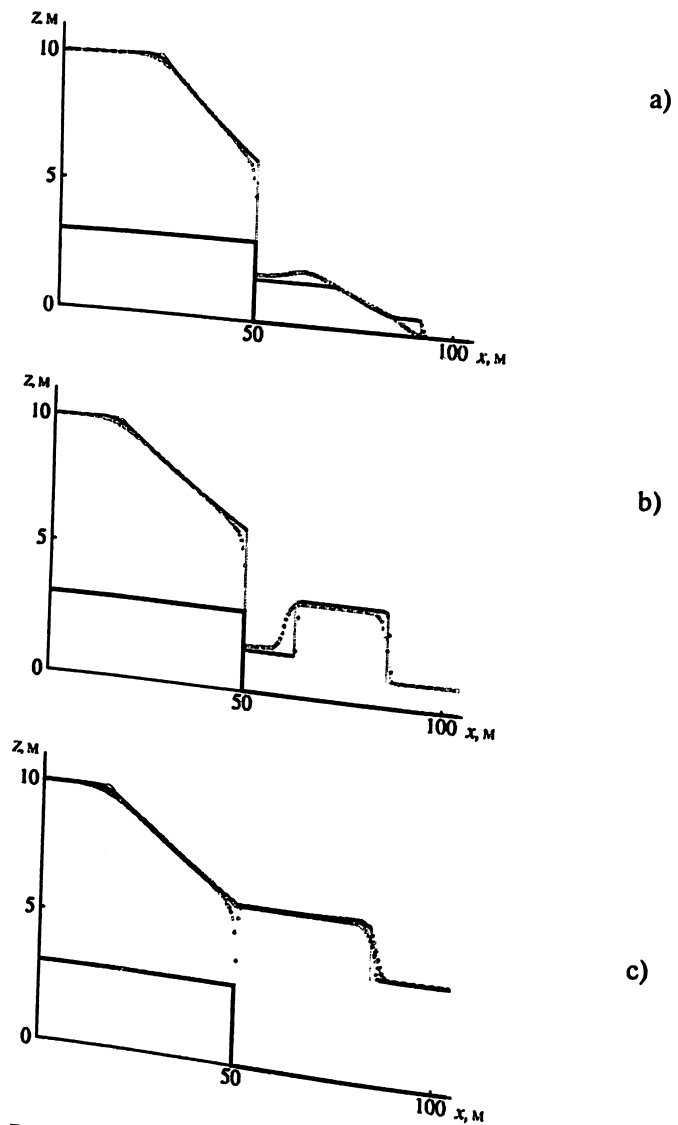


Рис.3. Сравнение численных решений задачи о разрушении плотины над уступом дна. Черные кружки — численное решение по описанному в статье алгоритму с выделением разрыва над уступом; белые кружки — численное решение сквозным счетом по неявной схеме; сплошная тонкая линия — точное решение, треугольники на рис. с) — численное решение по неявной схеме с направленными разностями с потерей энергии за уступом по формуле Борда.

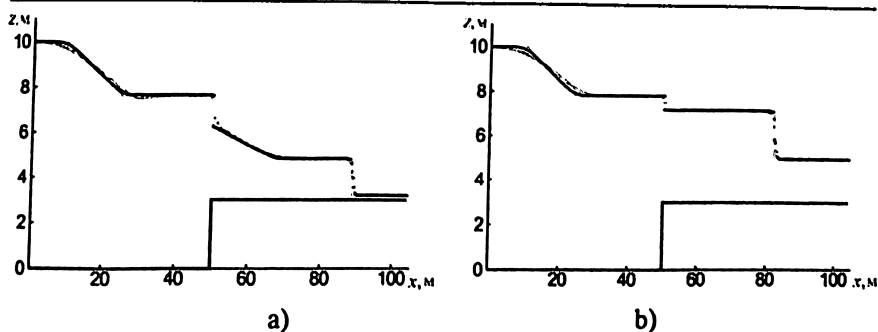


Рис. 4. Сравнение численных решений задачи о разрушении плотины над ступенькой дна. Черные кружки — численное решение по описанному в статье алгоритму с выделением разрыва над ступенькой; белые кружки — численное решение сквозным счетом по неявной схеме; сплошная тонкая линия — точное решение.

высотой  $b = 3$  м, расположенной в точке  $x_0 = 50$  м при начальных данных  $m$  и глубине нижнего бьефа 0,02 м (рис.4 а) и 2 м (рис.4 б). В данном случае схема с выделением разрыва лишь немного точнее передает параметры течения жидкости.

#### Выводы

Разработана методика численного решения уравнений мелкой воды с выделением разрывов поверхности дна, обеспечивающая высокую точность расчетов.

Разработан универсальный программный модуль, подключение которого к различным явным по времени схемам позволяет модифицировать их в схемы с выделением разрывов дна. В частности, таким способом выполнена модификация схемы распада разрыва для двумерных уравнений мелкой воды [13], которая применялась для расчетов сложных реальных объектов.

Существуют схемы сквозного счета (причем неявные), которые для задач с разрывом отметок дна дают удовлетворительные результаты в основной области течения, за исключением небольших участков, прилегающих к линиям разрывов дна. Предполагается протестировать еще ряд известных схем на представленных сложных точных решениях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Стокер Дж. Дж. Волны на воде. М.: Изд-во иностр. лит., 1959.
2. Остапенко В.В. Гиперболические системы законов сохранения и их приложение к теории мелкой воды (курс лекций). Новосибирск: Изд. Новосиб. госуд.-университета. 2004.

3. Букреев В.И., Гусев А.В. Волны за ступенькой в открытом канале // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 1.
4. Lax P.D. Hyperbolic systems of conservation laws and the mathematical theory of shock waves. Philadelphia: Soc. Industr. And Appl. Math.. 1972..
5. Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н. Системы квазилинейных уравнений. М.: Наука. 1978.
6. Дулов В.Г. Распад произвольного разрыва параметров газа на скачке площади сечения // Вестник Ленингр. ун-та. Сер. математики, механики и астрономии. 1958. № 19. Вып. 4.
7. Остапенко В.В. О разрывных решениях уравнений мелкой воды над уступом дна // ПМТФ. 2002. Т. 43. № 6.
8. Остапенко В.В. Течения, возникающие при разрушении плотины над ступенькой дна // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 4.
9. Остапенко В.В. Течения, возникающие при разрушении плотины над уступом дна // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 6.
10. Harten A. High resolution schemes for hyperbolic conservation laws // J. Comput. Phys. 1983. V. 49.
11. Ляхтер В.М., Милитеев А.Н. Гидравлические исследования численными методами // Водные ресурсы. 1981. № 3.
12. Букреев В.И., Гусев А.В. Гравитационные волны при распаде разрыва над уступом дна открытого канала // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 4.
13. Беликов В.В., Семенов А.Ю. Численный метод распада разрыва для решения уравнений теории мелкой воды. // Ж. Вычисл. Матем. и Матем. Физики. 1997. Том 37. № 8.



## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА КАПЕЛЬНОЙ ВЛАГИ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ГИДРОУЗЛА «КАПАНДА» С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ СТЕНКИ И ВОЗДУХОЗАБОРОВ ГЭС**

*Котеров В.Н., Архипов Б.В., кандидаты физ.-мат. наук,  
Беликов В.В., доктор физ.-мат. наук (ОАО «НИИЭС»),  
Солбаков В.В., кандидат физ.-мат. наук, Федосов В.Е. кандидат  
техн. наук, (Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН,  
Филиал ОАО «Инженерный центр ЭЭС»-«Институт  
Гидропроект», ОАО «НИИЭС»)*

При пропуске паводков 2003 – 2006 гг. р. Кванза через гидроузел «Капанда» (Ангола) выявилось, что при работе поверхностных водосбросов плотины гидроузла образуется водно-воздушная пыль, которая, формируясь в виде облака, может перемещаться из зоны сопряжения бьефов на прилегающую территорию, в том числе на стационарную площадку гидроузла (рис.1). Эта капельная влага затем выпадает в виде интенсивных осадков, что вызывает определенные неудобства для производства строительных работ и эксплуатации ГЭС. В частности, высокая концентрация влаги, проникающей в воздухозаборные устройства системы охлаждения ГЭС, может привести к нерасчетным режимам работы оборудования.



**Рис. 1.** Гидроузел «Капанда» при сбросе воды из верхнего бьефа через 4-й поверхностный водосброс и два донных водосброса  
(<http://www.hydroproject.ru>)

В 2004 г. были проведены натурные исследования параметров упомянутого выше водно-воздушного облака. В 2005 – 2006 гг. на основе этих данных была разработана, откалибрована и протестирована компьютерная модель [1,2] трехмерной вынужденной конвекции и переноса капельной влаги в районе крупного гидроузла, в котором сопряжение бьефов осуществляется путем отброса струй водосброса, обеспечивающих интенсивное дробление сбросного потока с целью предотвращения размыва русла потока в нижнем бьефе.

В настоящей работе данная математическая модель применяется для прогноза эффективности влияния разделительной защитной стенки, предназначенной для уменьшения попадания влаги на территорию станции и в воздухозаборы ГЭС «Капанда». Оценивается количество капельной влаги, которое может попасть в воздухозаборное устройство при работе поверхностных водосбросов на максимальном режиме, когда суммарный сбросной расход составляет  $7400 \text{ м}^3/\text{с}$ .

#### Физико-математическая модель.

#### Результаты калибровки и тестирования

В математической модели [1,2] (рис.2) полагается, что изменение характера циркуляции воздуха и образование капельной влаги в нижнем бьефе гидроузла обусловлено влиянием на окружающую среду мощных турбулентных струй, формирующихся во время пропуска расхода на носиках-трамплинах водосброса. Модель состоит из трех последовательно связанных частей:

1) из струйной модели водосброса, позволяющей рассчитать объемы воздуха, вовлекаемого турбулентными струями, формирующимися на носиках-трамплинах;

2) из трехмерной модели вынужденной циркуляции воздуха в районе гидроузла, учитывающей выброс воздуха в области падения турбулентной струи в нижнем бьефе;

3) из модели переноса и диффузии капельной влаги (водности) возмущенным струями водосброса воздушным потоком с источником капель, расположенным в области падения этих струй.

Результаты расчетов объемов воздуха, транспортируемого в нижнему бьефу струями водосброса, и расчетная форма этих струй являются исходными данными для численного моделирования вынужденной циркуляции атмосферного воздуха в нижнем бьефе. Получаемые в результате этого моделирования трехмерные распределения скорости воздушного потока и коэффициента турбулентной диффузии затем используются при моделировании переноса капельной влаги.

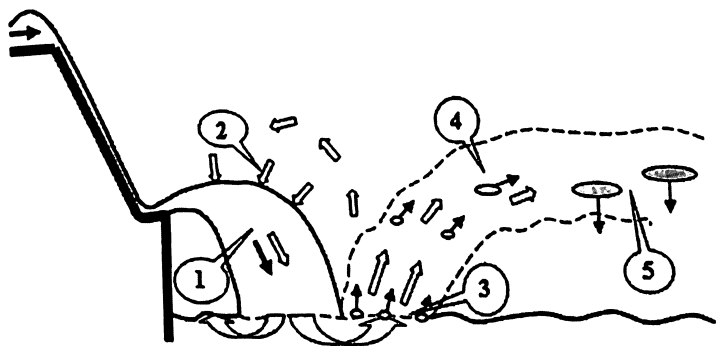


Рис. 2. Концептуальная модель циркуляции воздуха и переноса капельной влаги в нижнем бьефе гидроузла

1 — турбулентная струя; 2 — вовлечение воздуха в турбулентную струю; 3 — область выброса воздуха, «вовлеченного» турбулентной струей; в этой области происходит интенсивное образование капельной влаги; 4 — перенос капельной влаги воздушным потоком, сопровождающийся укрупнением капель за счет гравитационной коагуляции [3]; 5 — выпадение крупных капель на подстилающую поверхность в виде осадков.

В 2004 г. при проведении натуральных исследований переноса капельной влаги в нижнем бьефе гидроузла «Капанда» были реализованы 7 различных режимов пропуска расхода паводка через поверхностный водосброс. При этом для определения величины осадков, выпадающих на площадках гидроузла при работе водосбросных сооружений, были использованы мерные емкости (бочки) в количестве 24 шт. Размещение этих емкостей с указанием их нумерации показано на рис.3. Следует отметить, что в отмеченной на рис.3 затененной области «А» темп поступления капельной влаги крайне высок, так что во время работы водосброса практически при всех реализованных режимах в данной области происходило регулярное переполнение мерных емкостей. По-видимому, этому есть две причины. Первая состоит в проникновении на данную площадку водно-воздушного облака, формирующегося в области падения струй водосброса. Вторая причина — возникновение в нижнем бьефе интенсивных поперечных волновых движений воды, при которых при ударе волн о берег образуются крупные «брызги», способные подняться на достаточно большую высоту и достичь рассматриваемой площадки. Именно этим, вторым, механизмом можно объяснить аномально большие значения осадков, измеренных в точках 6 и 7, которые находятся на разделительной стенке в области «Б», также показанной на рис. 3 затенением.

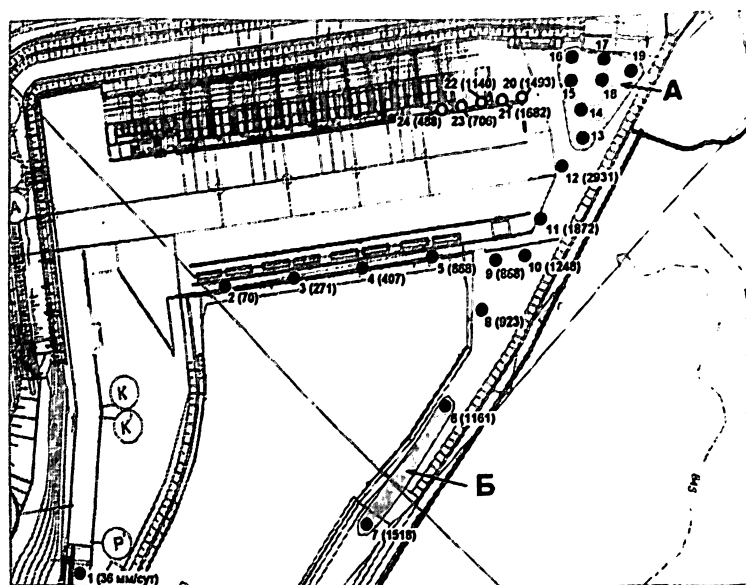


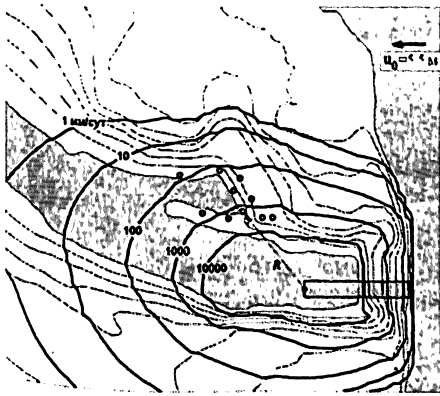
Рис. 3. Размещение мерных емкостей для измерения величины осадков, выпадающих на площадках гидроузла; в скобках указаны экспериментальные значения осадков (в мм/сут), полученные в 2004 г. при пропуске расхода по режиму 1

Для калибровки используемой в настоящей работе математической модели (т.е. для первоначального подбора параметров, значения которых на практике известны с большой погрешностью) был использован режим 1 пропуска расхода паводка 2004 г., когда был задействован только один 3-й пролет водосброса<sup>1</sup>, а сбросной расход составил  $1700 \text{ м}^3/\text{с}$ . Для дальнейшего тестирования модели использовался наиболее сложный режим 4, при котором были задействованы все четыре пролета поверхностного водосброса, а также оба донных водосброса. Общий сбросной расход (при неполном открытии всех водосбросов) при этом составлял  $2250 \text{ м}^3/\text{с}$ . При численном моделировании режима 4 пропуска расхода расчет объемов воздуха, вовлекаемого турбулентными струями и транспортируемого ими к нижнему бьефу, осуществлялся с помощью следующего простейшего предположения. Считалось, что весь сбросной расход сосредоточен в единой «плоской» турбулентной струе, имеющей в горизонтальном направлении ширину 80 м, которая соответствует общей ширине проходного сечения всех четырех пролетов водосбросного сооружения. Основанием для этого служила относительная малость величины расхода, перенос

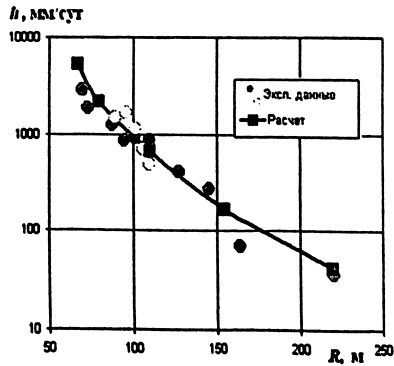
<sup>1</sup> Пролеты нумеруются справа налево, если смотреть с плотины в сторону нижнего бьефа, так что пролет 1 является ближайшим к ГЭС пролетом; см. рис.1

симиго струями донного водосброса, и визуальные наблюдения, демонстрирующие сильное взаимодействие всех сбросных струй.

Результаты калибровки и тестирования модели показаны на рис. 4,5 (расстояние  $R$  на рис.4,б и 5,б отсчитывается от некоторой фиксированной (условной) точки, которая помещена в область падения струи водосброса; см. рис.4,а). Совпадение расчетных и натуральных данных, на наш взгляд, представляется удовлетворительным.

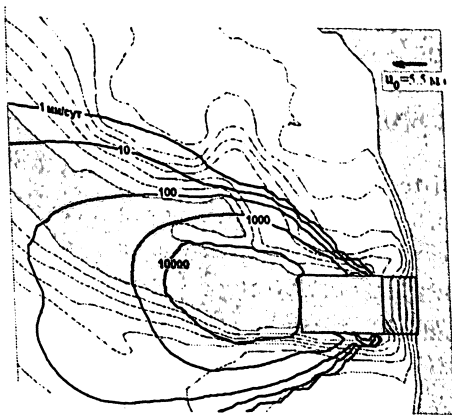


а)

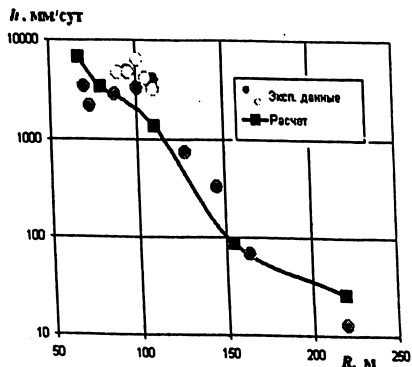


б)

Рис. 4. Результат расчетов интенсивности осадков  $h$ , мм/сут, выпадающих на подстилающую поверхность (а), и сравнение с результатами экспериментальных измерений (б) при пропуске расхода водосброса по режиму 1



а)



б)

Рис. 5. Результат расчетов интенсивности осадков  $h$ , мм/сут, выпадающих на подстилающую поверхность (а), и сравнение с результатами экспериментальных измерений (б) при пропуске расхода водосброса по режиму 4

### Моделирование переноса капельной влаги с учетом влияния разделительной защитной стенки

На рис.6 показана орография подстилающей поверхности, использованная в расчетах. На этом рисунке указано также положение воздухозаборного устройства, расположенного на левой торцевой части здания ГЭС, и разделительной защитной стенки, сооружаемой для уменьшения попадания капельной влаги на территорию станции. Отметим, что воздухозабор ГЭС примыкает к площадке, на которой наблюдается максимальная интенсивность выпадения капельной влаги (область «А» на рис.3).

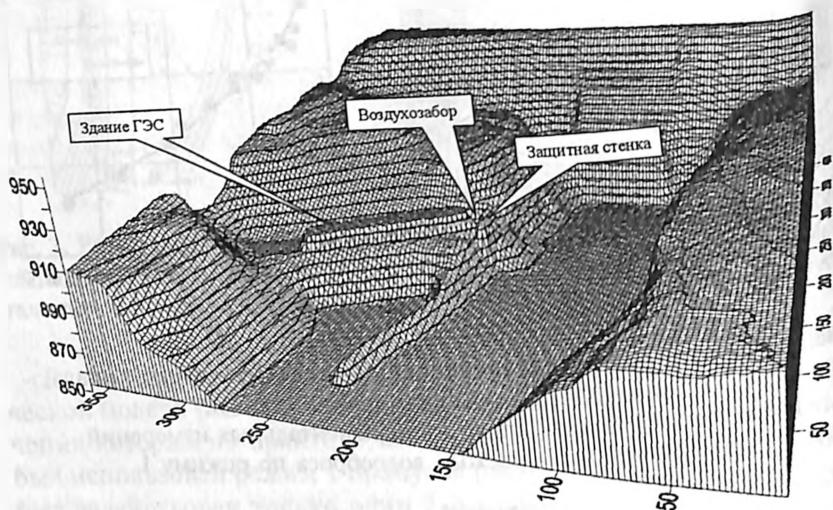


Рис.6. Расчетная область и орография подстилающей поверхности

Для того, чтобы оценить влияние высоты защитной стенки на характеристики водно-воздушного облака в окрестности воздухозабора ГЭС, была проведена серия расчетов, в которых высота стенки  $H$ , отсчитываемая от уровня площадки перед левой торцевой частью здания ГЭС, менялась от 8 до 40 м. При этом полагалось, что реализуется максимальный режим работы водосбросных сооружений, когда суммарный сбросной расход воды из верхнего бьефа составляет  $7400 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Результаты расчетов представлены на рис.7 в виде зависимостей влажности среды  $q$  и количества осадков  $h$  в точке воздухозабора от высоты стенки  $H$ . Расчетный средний радиус капель в водно-воздушном облаке у точки воздухозабора составил около

400 мкм. Отметим, что, согласно соглашениям, принятым в отечественной метеорологии, термин «сильный дождь» соответствует величине осадков  $\sim 20100$  мм/сут [4], а характерный радиус дождевых капель составляет около 500 мкм.

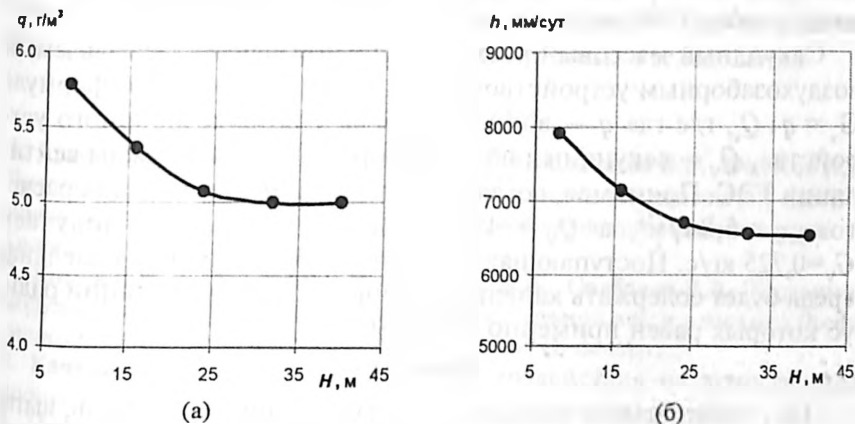


Рис. 7. Расчетные зависимости влажности среды  $q$  (а) и количества осадков  $h$  (б) в точке воздухозабора от высоты защитной стенки  $H$

На графиках видно некоторое, хотя и незначительное уменьшение расчетных характеристик с увеличением высоты защитной стенки. Однако по мере роста высоты стенки этот эффект становится все менее и менее заметным. Объясняется это, по-видимому, тем, что основное количество влаги в виде водно-воздушного облака проникает в окрестность воздухозабора с фронтальной стороны здания ГЭС (см. рис.8).

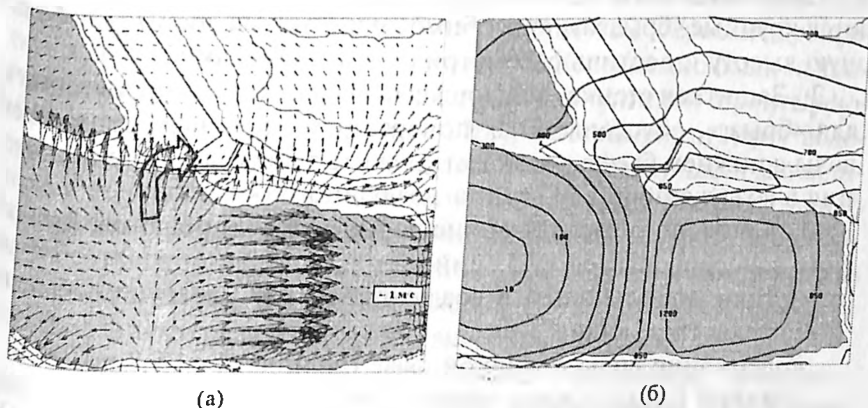


Рис. 8. Расчетные поля скорости ветра (а) и коэффициента турбулентного обмена  $A/m^2/c$  (б) у подстилающей поверхности при высоте защитной стенки  $H=40$  м

Таким образом, судя по результатам расчетов, проектируемая защитная стенка, являющаяся эффективным препятствием для «брызг», обусловленных поперечным волновым движением воды в нижнем бьефе, не может служить защитой от проникновения в воздухозабор ГЭС водно-воздушного облака.

Секундный массовый расход капельной влаги, засасываемый воздухозаборным устройством ГЭС, можно оценить по формуле  $G_v = q \cdot Q_v$ , где  $q$  — водность среды у воздухозаборного устройства,  $Q_v$  — секундный объем забора воздуха на нужды вентиляции ГЭС. Принимая, согласно результатам предыдущих расчетов,  $q = 5,8 \text{ г/м}^3$ , а  $Q_v = 450 \text{ тыс.м}^3/\text{час}$  ( $125 \text{ м}^3/\text{с}$ ), получаем  $G_v = 0,725 \text{ кг/с}$ . Поступающая в воздухозабор воздушно-капельная среда будет содержать капли различного размера, средний радиус которых равен примерно 400 мкм.

### Выводы

На основе анализа натуральных данных о величине осадков, выпадающих на площадках гидроузла при работе водосбросных сооружений, и с учетом результатов численного моделирования процесса переноса капельной влаги в нижнем бьефе гидроузла «Капанда» представляется возможным сделать следующие выводы.

1. При работе водосбросов большое содержание капельной влаги в окрестности воздухозаборного сооружения здания ГЭС определяется двумя причинами. Первая состоит в проникновении на данную площадку водно-воздушного облака, формирующегося в области падения струй водосброса. Вторая причина — возникновение в нижнем бьефе интенсивных поперечных волновых движений воды, при которых при ударе волн о берег образуются крупные «брызги», способные подняться на достаточно большую высоту и достичь рассматриваемой площадки.

2. Защитная стенка, являющаяся эффективным препятствием для «брызг», обусловленных поперечным волновым движением воды в нижнем бьефе, не может служить защитой от проникновения в воздухозабор ГЭС водно-воздушного облака.

3. Согласно результатам численного моделирования, при работе водосбросных сооружений на максимальном режиме характеристики поступающей в воздухозабор ГЭС воздушно-капельной среды следующие:

содержание воды в жидкой фазе (водность) —  $5,8 \text{ г/м}^3$ ,  
средний радиус капель влаги — 400 мкм.

4. При объемах забора воздуха  $450 \text{ тыс.м}^3/\text{час}$  расчетное количество капельной влаги, проникающее в воздухозабор, составляет



около 0,7 кг/с. Приведенные величины практически не зависят от характеристик средней (метеорологической) скорости ветра в районе гидроузла.

5. Из-за относительно большого размера капель они, скорее всего, будут интенсивно осаждаться внутри воздухозаборного устройства ГЭС. Однако этот вопрос требует специальных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Котеров В.Н., Архипов Б.В., Беликов В.В., Солбаков В.В., Федосов В.Е. Численное моделирование образования и переноса капельной влаги в нижнем бьефе гидроузла при работе водосбросов трамплинного типа. // Гидротехническое строительство. (В печати).
2. Котеров В.Н., Архипов Б.В., Беликов В.В., Солбаков В.В. Численное моделирование образования и переноса капельной влаги в нижнем бьефе гидроузла // Математическое моделирование. (В печати).
3. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1973.
4. Интернет ресурс «Метеоцентр»: <http://meteocenter.net/forecast/comment.htm>.

### ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ САНГУДИНСКОГО ГИДРОУЗЛА

*Куприянов В.П., Онинченко Г.Ф., кандидаты техн. наук,  
Амирова Н.Н., инженер (ОАО «НИИЭС»)*

Сангудинская ГЭС сооружается на р. Вахш в Таджикистане. Проект этого гидроузла был разработан институтом «Средазгидропроект» в конце 80-х — начале 90-х годов. Одновременно были начаты строительно-монтажные работы и проходка туннелей строительно-эксплуатационных водосбросов (СЭВ), забетонирован порог водоприемника, изготовлена и доставлена на площадку часть металлической облицовки и механического оборудования. Впоследствии, в связи с изменением политико-экономической ситуации, все работы были приостановлены. В настоящее время работы на строительстве возобновлены, что потребовало доработки проекта и проверки исследованиями ряда изменений, внесенных в проект.

В состав гидроузла входят следующие сооружения: каменно-набросная плотина; две нитки СЭВ, рассчитанные на пропуск расхода 4120 м<sup>3</sup>/с; четырехагрегатное здание ГЭС с максимальным расходом 1280 м<sup>3</sup>/с ((рис. 1).

Таким образом, судя по результатам расчетов, проектируемая защитная стенка, являющаяся эффективным препятствием для «брызг», обусловленных поперечным волновым движением воды в нижнем бьефе, не может служить защитой от проникновения в воздухозабор ГЭС водно-воздушного облака.

Секундный массовый расход капельной влаги, засасываемый воздухозаборным устройством ГЭС, можно оценить по формуле  $G_v = q \cdot Q_v$ , где  $q$  — водность среды у воздухозаборного устройства,  $Q_v$  — секундный объем забора воздуха на нужды вентиляции ГЭС. Принимая, согласно результатам предыдущих расчетов,  $q = 5,8 \text{ г/м}^3$ , а  $Q_v = 450 \text{ тыс.м}^3/\text{час}$  ( $125 \text{ м}^3/\text{с}$ ), получаем  $G_v = 0,725 \text{ кг/с}$ . Поступающая в воздухозабор воздушно-капельная среда будет содержать капли различного размера, средний радиус которых равен примерно 400 мкм.

### Выводы

На основе анализа натуральных данных о величине осадков, выпадающих на площадках гидроузла при работе водосбросных сооружений, и с учетом результатов численного моделирования процесса переноса капельной влаги в нижнем бьефе гидроузла «Капанда» представляется возможным сделать следующие выводы.

1. При работе водосбросов большое содержание капельной влаги в окрестности воздухозаборного сооружения здания ГЭС определяется двумя причинами. Первая состоит в проникновении на данную площадку водно-воздушного облака, формирующегося в области падения струй водосброса. Вторая причина — возникновение в нижнем бьефе интенсивных поперечных волновых движений воды, при которых при ударе волн о берег образуются крупные «брызги», способные подняться на достаточно большую высоту и достичь рассматриваемой площадки.

2. Защитная стенка, являющаяся эффективным препятствием для «брызг», обусловленных поперечным волновым движением воды в нижнем бьефе, не может служить защитой от проникновения в воздухозабор ГЭС водно-воздушного облака.

3. Согласно результатам численного моделирования, при работе водосбросных сооружений на максимальном режиме характеристики поступающей в воздухозабор ГЭС воздушно-капельной среды следующие:

содержание воды в жидкой фазе (водность) —  $5,8 \text{ г/м}^3$ ,  
средний радиус капель влаги — 400 мкм.

4. При объемах забора воздуха 450 тыс.м<sup>3</sup>/час расчетное количество капельной влаги, проникающее в воздухозабор, составляет

около 0,7 кг/с. Приведенные величины практически не зависят от характеристик средней (метеорологической) скорости ветра в районе гидроузла.

5. Из-за относительно большого размера капель они, скорее всего, будут интенсивно осаждаться внутри воздухозаборного устройства ГЭС. Однако этот вопрос требует специальных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Котеров В.Н., Архипов Б.В., Беликов В.В., Солбаков В.В., Федосов В.Е. Численное моделирование образования и переноса капельной влаги в нижнем бьефе гидроузла при работе водосбросов трамплинного типа. // Гидротехническое строительство. (В печати).
2. Котеров В.Н., Архипов Б.В., Беликов В.В., Солбаков В.В. Численное моделирование образования и переноса капельной влаги в нижнем бьефе гидроузла // Математическое моделирование. (В печати).
3. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1973.
4. Интернет ресурс «Метеоцентр»: <http://meteocenter.net/forecast/comment.htm>.

#### ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ САНГУДИНСКОГО ГИДРОУЗЛА

*Куприянов В.П., Онопченко Г.Ф., кандидаты техн. наук,  
Амирова Н.Н., инженер (ОАО «НИИЭС»)*

Сангудинская ГЭС сооружается на р. Вахш в Таджикистане. Проект этого гидроузла был разработан институтом «Средазгидропроект» в конце 80-х — начале 90-х годов. Одновременно были начаты строительно-монтажные работы и проходка туннелей строительно-эксплуатационных водосбросов (СЭВ), забетонирован порог водоприемника, изготовлена и доставлена на площадку часть металлической облицовки и механического оборудования. Впоследствии, в связи с изменением политико-экономической ситуации, все работы были приостановлены. В настоящее время работы на строительстве возобновлены, что потребовало доработки проекта и проверки исследованиями ряда изменений, внесенных в проект.

В состав гидроузла входят следующие сооружения: каменно-набросная плотина; две нитки СЭВ, рассчитанные на пропуск расхода 4120 м<sup>3</sup>/с; четырехагрегатное здание ГЭС с максимальным расходом 1280 м<sup>3</sup>/с ((рис. 1).

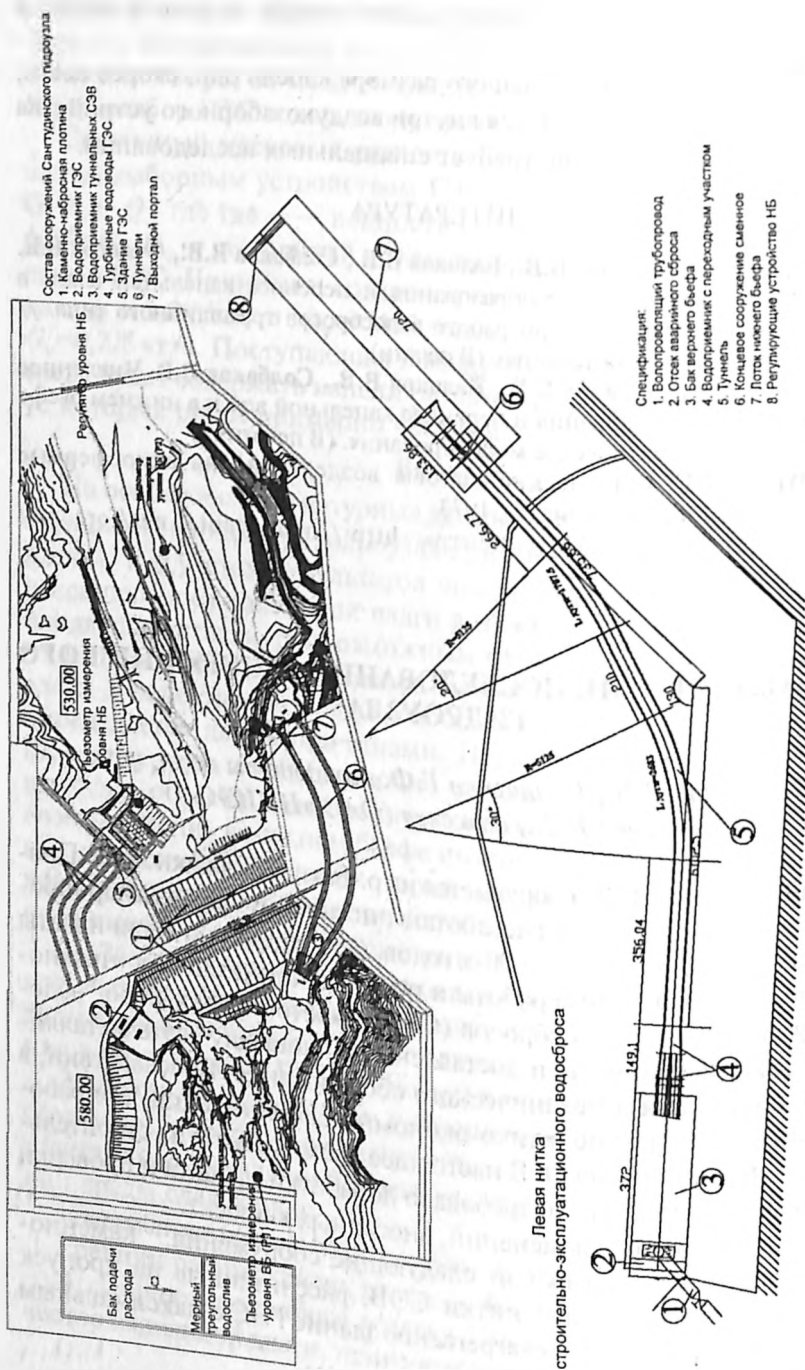


Рис. 1. Пространственная гидравлическая модель в масштабе 1:100 и фрагментная модель левой нитки СЭВ в масштабе 1:40

Расчетный эксплуатационный расход 0,01% обеспеченности с гарантийной поправкой для створа Сангтудинской ГЭС составляет 5400 м<sup>3</sup>/с. В настоящее время, в соответствии с современными нормативными требованиями, при пропуске максимальных паводков расход ГЭС при отсутствии надлежащего обоснования не учитывается, поэтому на гидроузле имеется дефицит пропускной способности.

Расчетное обоснование технических решений предполагает наличие стандартных или общеизвестных условий и факторов, позволяющих получить надежный результат. Конкретные условия каждого гидроузла, как правило, являются уникальными, поэтому исследования на физических моделях и сегодня являются неотъемлемым инструментом проверки и уточнения результатов расчетов, а по ряду вопросов — единственным инструментом выбора и обоснования оптимальных технических решений.

Вопросами, подлежащими проверке и уточнению на модели Сангтудинского гидроузла, являются:

- проверка пропускной способности СЭВ при полном и частичных открытиях затворов;
- определение возможности образования воронок перед водоприемником ГЭС;
- возникновение переходных режимов в туннелях при пропуске различных расходов;
- обеспечение заданных условий пропуска строительных расходов;
- изучение распределения осредненного давления и пульсации давления на потолке водоприемника с циркульной формой абразивной балки;
- обеспечение условий для безкавитационной работы переходного участка между водоприемником и туннелем;
- обеспечение безкавитационной работы выходного портала и носка-трамплина;
- изучение местных размывов в нижнем бьефе при выбранной схеме сопряжения потока с учетом слагающих русло материалов;
- определение величины возможных подпоров, вызванных образованием в русле баров из продуктов размыва;
- определение вероятности прохождения влекомых наносов через туннели при пропуске строительных расходов.

Для решения перечисленных выше вопросов в гидравлической лаборатории Центра гидравлических исследований ОАО «НИИЭС» были созданы две модели — пространственная модель гидроузла в масштабе 1 : 100 в границах, показанных на рис. 1 и фрагментарная модель левой нитки водосброса в масштабе 1 : 40.

Моделирование нижнего бьефа в русле реки и за выходным порталом СЭВ производилось в соответствии с топографией и геологией этого участка строительства. При создании модели для воспроизведения деформационных свойств основания было положено условие соответствия неразрывающих скоростей для материала в натуре и на модели.

В границах пространственной гидравлической модели расположены (рис. 1): участок верхнего бьефа длиной 300 м от водоприемника ГЭС, плотина, здание ГЭС, строительный водосброс и участок нижнего бьефа длиной 750 м от выходных порталов СЭВ.

На первом этапе исследований в связи с увеличением сбросного расхода была проведена расчетная проверка пропускной способности проектного варианта СЭВ и установлена величина дефицита пропускной способности гидроузла. Для его покрытия было рассмотрено несколько возможных вариантов:

строительство дополнительного поверхностного водосброса в теле плотины;

строительство дополнительного поверхностного водосброса в виде быстротока на правом берегу;

строительство шахтных водосбросов, сопрягающихся со строительными туннелями;

строительство дополнительного поверхностного водосброса перепадного типа на правом берегу;

увеличение площади поперечного сечения строящихся туннелей. К дальнейшей разработке был принят вариант с увеличением поперечного сечения туннелей водосброса, признанный наиболее рациональным. Данный вариант и был первоначально воспроизведен на пространственной модели.

В процессе исследований были определены условия работы СЭВ при пропуске строительных расходов до 3400 м<sup>3</sup>/с. Измерены давления на стенки, забральную балку, разделительный бычок и по длине одного из туннелей.

Наибольшая проблема состояла в том, что при регулировании расхода на водоприемнике практически во всем диапазоне уровней в туннелях возникал переходный от безнапорного к напорному режим течения с размахом колебаний давлений 3040 кПа. На участке безнапорного режима скорости течения достигали 30 м/с. При этих условиях для обеспечения кавитационной безопасности необходимо соблюсти жесткие требования к качеству поверхности бетонной обделки с шероховатостью ниже 0,2...0,5 мм, что в условиях большой длины туннелей и сложности очертания

их внутренней поверхности практически недостижимо.

Рассмотрев данную проблему, на заседании секции НТС РАО «ЕЭС России» было принято решение обеспечить напорный режим течения в туннелях, для чего перенести регулирующие затворы на выходной портал, уменьшив сечение затворной камеры на 20 %. При напорном режиме скорости течения уменьшаются до 20...22 м/с, что уже является допустимым при стандартной технологии выполнения облицовки. Зона больших скоростей течения переносится на участок выходного портала за рабочими затворами, который выполняется в металлической облицовке.

По ходу дальнейшей разработки было рекомендовано сделать регулируемой только левую нитку водосброса с устройством низовой затворной камеры, рабочий затвор на правой нитке оставить на водоприемнике, организовав ее работу без регулирования при полном открытии затвора, а сечение туннелей сохранить в соответствии с первоначальным проектом института «Средазгидропроект». При таком режиме эксплуатации обеспечивается напорное течение в туннелях при любых расходах. Однако нормативное требование по обеспечению расчетной пропускной способности гидроузла без учета расхода ГЭС не соблюдается.

В окончательно принятом варианте строительно-эксплуатационный водосброс состоит из объединенного напорного водоприемника башенного типа с донным входным порогом. Отметка порога 512,0 м, что на 2,0 м выше отметки дна русла реки. Ограничение уровня верхнего бьефа в водохранилище установлено отметкой НПУ равной 571,5 м. Входное отверстие каждого водосброса, высотой 9,35 м, с помощью промежуточного бычка, имеющего толщину на входе в водоприемник 4,0 м и на выходе — 1,5 м, разделено на два пролета шириной по 5,0 м. Каждый из пролетов оборудован тремя рядами пазов, соответственно, для ремонтного, аварийно-ремонтного и рабочего затворов плоского типа. Рабочие затворы на входном портале для левой нитки водосброса, оборудованного низовой затворной камерой, устанавливаться не будут. За водоприемником следует переходный участок от прямоугольного поперечного сечения площадью 162,8 м<sup>2</sup> к сечению с полуциркульным очертанием свода (подковообразное сечение) площадью 102,4 м<sup>2</sup>.

Отводящие туннели по всей длине имеют подковообразное сечение (тип IV по СНиП 2.06.09-84) размером ВхН = 11,0х11,0 м. Длина туннеля регулируемой нитки составляет примерно 456 м, нерегулируемой — 522 м. Каждый из туннелей имеет два поворота в плане: левая нитка туннеля имеет первый поворот радиусом

205 м и углом  $30^\circ$ , второй — тем же радиусом и углом  $20^\circ$ ; правая нитка туннеля имеет первый поворот радиусом 245 м и углом  $44^\circ$ , второй — радиусом 260 м и углом  $20^\circ$ .

В конце туннеля левой регулируемой нитки водосброса располагается затворная камера, разделенная бычком на два пролета, перед которой на переходном участке сечение трансформируется в прямоугольное. Размеры выходных отверстий составляют  $5 \times 8$  м. Они перекрываются двумя сегментными затворами радиусом 12 м. Применение сегментных затворов определяется их высокой эксплуатационной надежностью и возможностью точного регулирования сбросного расхода при любом промежуточном открытии.

В конце обеих ниток туннельного водосброса предусмотрено устройство веерообразных носков-трамплинов, предназначенных для осуществления сопряжения бьефов отбросом струи. Носки-трамплины имеют переменный уровень порога, что позволит рассеять падающую струю на большую площадь и уменьшить размывы русла в нижнем бьефе.

Сброс паводковых расходов будет осуществляться совместно с ГЭС по следующей схеме: при превышении притока над расходом ГЭС в работу вступает левый туннель, имеющий возможность регулировки расхода на низовой затворной камере. Его пропускная способность регулируется величиной открытия затворов в соответствии с избытком приточного расхода. Когда пропускная способность регулирующего туннеля будет исчерпана, его затворы закрываются и открываются полностью затворы нерегулируемого правого туннеля. При дальнейшем росте расходов притока регулирование сбросных расходов снова осуществляется затворами левого туннеля.

Пропуск расходов в строительный период будет также осуществляться с помощью туннельного водосброса. Однако в этот период оба туннеля имеют штрабление носков до отметки 505 м с возведенным по оси промежуточным бычком. Он предназначен для установки шандорного заграждения на период достройки конечного сооружения. После окончательного бетонирования конечного сооружения промежуточный бычок вместе с шандорами омоноличивается и остается внутри носка-трамплина. Кроме этого в регулирующем туннеле предусмотрено штрабление в пределах переходного участка и затворной камеры.

В соответствии с этими решениями была выполнена реконструкция пространственной гидравлической модели гидроузла и фрагментной модели левой нитки водосброса, на которых осуществлены основные экспериментальные исследования.



По результатам этих опытов уточнены условия транспорта донных влекомых наносов в строительный период. Установлено, что при расходах до  $2700 \text{ м}^3/\text{с}$  наносы крупностью до  $10 \text{ мм}$  пройдут через туннели. Получены коэффициенты расхода туннеля при полном и частичных открытиях затворов, давления на элементы входного портала и по длине туннелей, нагрузки на стенки и дно конечного сооружения. В исследованиях было подтверждено, что на забральной балке циркульного очертания возникает вакуумная зона. Однако в связи с тем, что металлическая облицовка забральной балки уже изготовлена, заказчиком было решено оставить очертание балки без изменения — циркульное по радиусу  $10,5 \text{ м}$ , хотя, например, при расходе  $1790 \text{ м}^3/\text{с}$  и отметке уровня верхнего бьефа  $545,3 \text{ м}$  осредненное давление на ней достигает вакуума до  $6,4 \text{ м.вод.ст}$  (рис. 2). Это неизбежно вызовет повышенную динамическую нагрузку на балку и появление на ее поверхности кавитации.

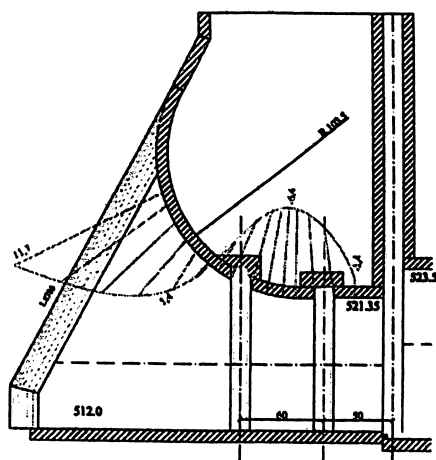


Рис. 2. Давление на забральную балку водоприемника при УВБ  $545,3 \text{ м}$

Сопоставление данных по пропускной способности туннелей для строительного и эксплуатационного периодов показало отсутствие влияния штрабления концевых сооружений.

Поскольку русло в нижнем бьефе сложено аллювием, дно реки в зоне падения струи будет размываться как в строительный, так и в эксплуатационный периоды. Грунт, вымытый из ямы размыва, будет отлагаться в русле в виде баров и отмелей, которые изменяют кривую связи уровней и расходов в отводя-

щем канале ГЭС. Для того чтобы оценить в последующем влияние баров на уровни в канале ГЭС, была построена кривая связи при недеформированном русле (до размывов за водосбросами) для расходов, соответствующих работе от одного до четырех агрегатов ГЭС. Эта кривая являлась исходной при определении влияния деформаций русла на действующий напор ГЭС. Исходный рельеф русла в нижнем бьефе был построен по данным изысканий за 2005 год. Рельеф русла после пропуска строительных расходов существенно изменился. При расходах более  $2000 \text{ м}^3/\text{с}$  появляются опасные подмывы вблизи левой кромки носка левого туннеля, где выклинивается скальный грунт и сосредотачивается поток, подсасываемый под падающую струю слева со стороны русла.

В строительный период большая часть объема материала выносится из ямы размыва и укладывается в бары, занимающие русло у левого берега у выхода отводящего канала ГЭС (рис. 3) и ниже по течению на расстоянии около 500 м от конечных сооружений водосбросов.

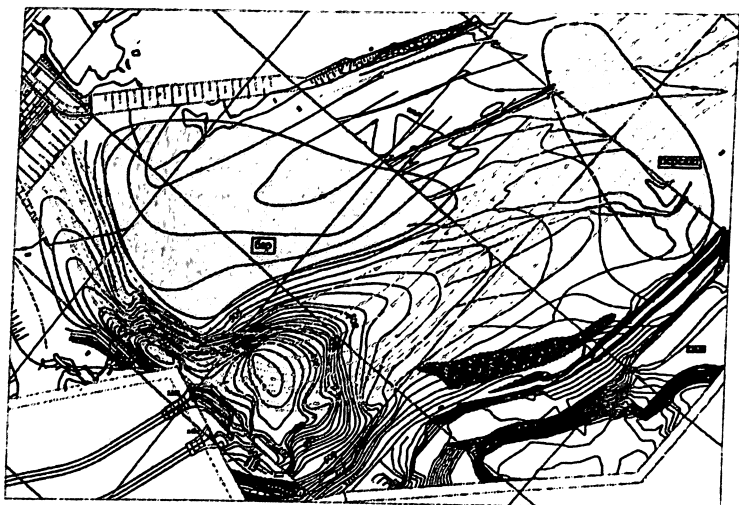


Рис. 3. План течений в нижнем бьефе при работе ГЭС после деформаций русла

После завершения строительства затворной камеры и носка-трамплина на конечном сооружении левой нитки в период наполнения водохранилища правый туннель закрывается и начинается регулирование сбрасываемого расхода путем частичного открытия затворов левого туннеля в соответствии с допустимыми

отметками уровня верхнего бьефа и величиной притока. Для этих условий была проведена серия опытов, в которых затворы левого туннеля открывались на 2, 4, 6 м и полностью (8 м). Деформации русла при этом накладывались на рельеф, образовавшийся после пропуска строительных расходов.

Максимальный расход при полном открытии затворов левого туннеля и отметке НПУ = 571,5 м составил 2046 м<sup>3</sup>/с.

Впоследствии была проведена серия опытов для определения дополнительного подпора в отводящем канале ГЭС при работе от 1 до 4-х агрегатов с учетом произошедших в русле деформаций после пропуска паводков до 2046 м<sup>3</sup>/с через левый туннель. Оба туннеля не работали. Сравнивая полученные результаты с условиями до деформации русла, можно видеть, что кривая связи располагается выше исходной (рис. 4). Дополнительный подпор от образовавшихся в русле баров при работе одного агрегата составлял 1,8 м

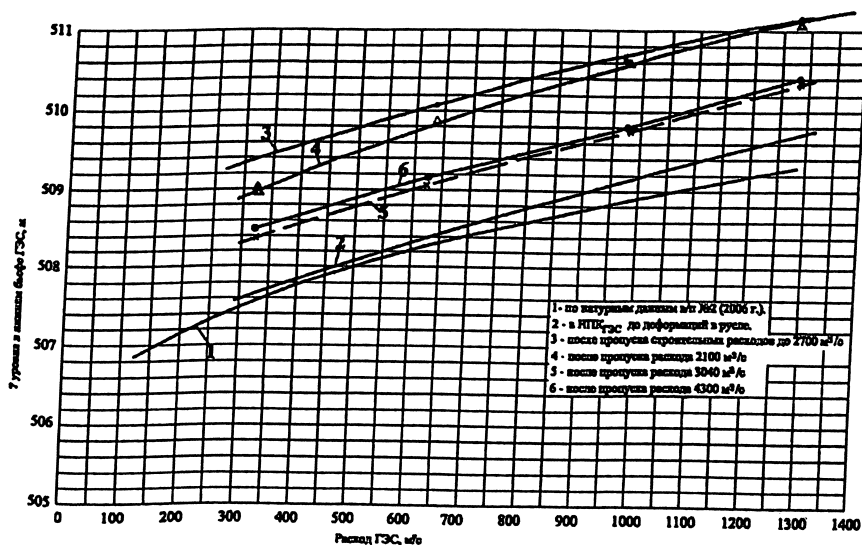


Рис. 4. Уровни в отводящем канале ГЭС после пропуска различных расходов через СЭВ

В соответствии с принятой схемой эксплуатации водосбора при увеличении притока затворы левого туннеля должны закрываться, а расходы переключаться на правый туннель, работающий при полном открытии затворов. В этом случае картина течений в нижнем бьефе существенно менялась. Водоворотная зона в русле слева от струи существенно увеличивается. Транзитная часть потока смещалась к правому берегу, поворачи-

чивая в сторону левого берега на расстоянии около 500 м от СЭВ. Фокус ямы размыва также смещается к правому берегу. Размеры правого водоворота уменьшаются, однако скорости течения в нем увеличиваются. Вследствие этого возрастает интенсивность размывов берега вблизи выходного портала на участке, где выклинивается скальная порода. Отмечаются подмыв и обрушение откоса правого берега (рис. 5).

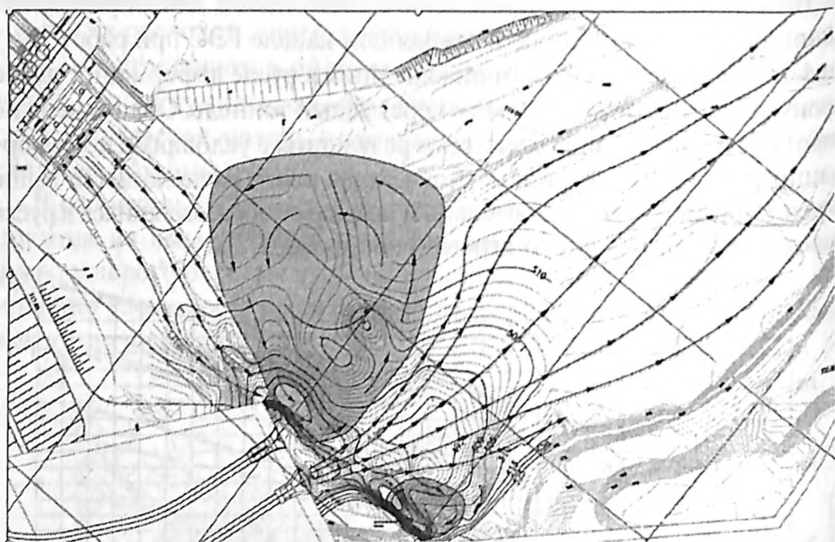


Рис. 5. Плановое распределение потока при работе правого туннеля и ГЭС ( $Q=3477 \text{ м}^3/\text{с}$ )

На модели был проведен эксперимент, когда при работе правого туннеля были включены четыре агрегата ГЭС. Весь поток от ГЭС направляется к выходным порталам водосброса, концентрируясь в яме размыва. Это еще более усиливает размыв в непосредственной близости к носку левого туннеля. Поток из водосброса больше поджимается к правому берегу, усиливая его подмыв.

При дальнейшем повышении расхода притока (свыше  $2100 \text{ м}^3/\text{с}$ ) снова включается в работу левый туннель с регулированием расходов частичными открытиями затворов.

В эксплуатационных условиях размывы в нижнем бьефе продолжают увеличиваться. Увеличивается и объем вымытого грунта (рис.6). Этому способствует изменение распределения расхода по туннелям. Однако приращение подпоров не происходит, а наоборот, с увеличением прошедших в паводок расходов подпор уменьшается. Это объясняется тем, что основной подпор

образуется от бара, расположенного в русле ниже по течению на расстоянии 500...600 м, перегораживающего русло. При увеличении расходов и смещении транзитного потока к правому берегу происходит промыв и снижение нижнего бара, приводящие к уменьшению подпора.

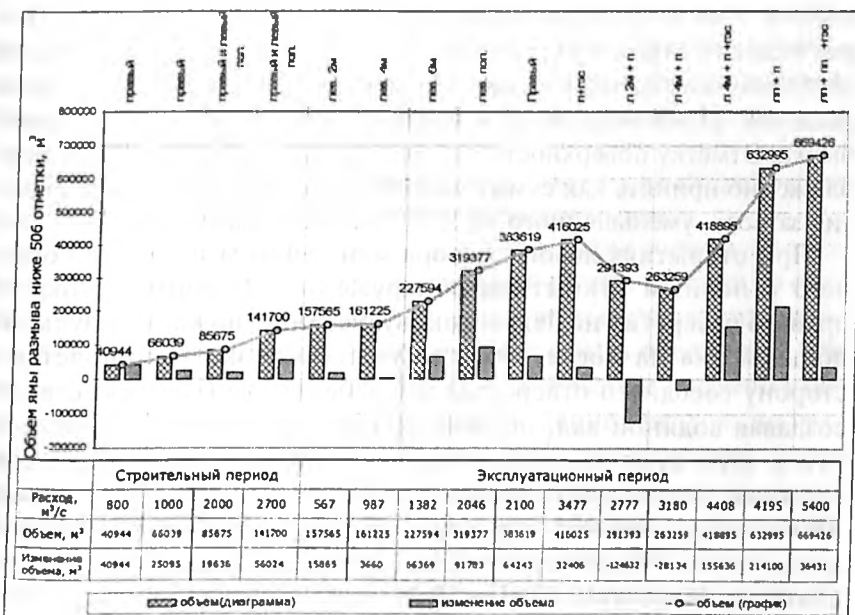


Рис. 6. Изменение объема вымытого материала после пропуска паводков до 5400 м³/с

Однако, большие расходы имеют малую вероятность повторения и за основной случай следует принимать паводки порядка 2...3 тыс. м³/с, при которых следует ожидать подпор до 1,8 м. Это приводит к соответствующей потере напора и снижению мощности на ГЭС примерно на 20 МВт.

Следует заметить, что приведенные выше результаты получены при условии, что к моменту перекрытия русла низовая перемычка СЭВ (ее объем около 25 тыс. м³), будет полностью разобрана. Учитывая, что это не было сделано полностью, то оставшийся объем будет также перемещен в бары, что может еще увеличить подпор на ГЭС.

В практике эксплуатации левой нитки туннеля неизбежны случаи, когда отверстия будут работать несимметрично. Это может быть вызвано необходимостью точного регулирования расхода,

неисправностью одного из механизмов или другими причинами. При этом существенно изменяются гидродинамические нагрузки на бычок и боковые стенки.

Для получения данных об этих нагрузках на фрагментной модели был проведен специальный цикл экспериментов.

При полном открытии обоих затворов нагрузка на бычок в основном состоит из пульсационной составляющей давления. При уменьшении открытия одного из затворов появляется разность как осредненного давления с каждой стороны, так и уровня пульсации давления. Изменится также и глубина потока по разные стороны бычка. Отметку поверхности потока в пределах бычка можно приближенно принять как сумму высоты уступа за затвором и открытия затвора, уменьшенного на 1520 % за счет сжатия струи.

При открытиях левого затвора менее 4-х м и работе соседнего с полным открытием обнаружено набегание потока из правого отверстия на левую боковую стенку носка. В результате подъема дна на носке поток за бычком резко расширяется в сторону соседнего отверстия. Он набегает на боковую стенку, создавая водяной вал, поднимающийся выше верха стенки на 810 м. При этом часть воды падает обратно в портал, а существенная часть выплескивается за стенку. Создаются динамические нагрузки на стенку, осредненное значение которых оценивается величиной до 160 кПа, а стандарт пульсации давления достигает величины 19 кПа. Только при открытии второго затвора более, чем на 4 м удается отжать поток из первого отверстия от стенки. Для обеспечения независимости работы отверстий бычок был продлен на 8,66 м (до края помещения подъемных механизмов). Тогда исключается набегание потока на стенку и нагрузки на нее резко снижаются.

Для получения подробной картины распределения давления на боковые поверхности за затвором при работе его с полным и частичными открытиями на фрагментной модели были проведены эксперименты с удлиненным бычком.

Анализируя результаты измерения распределения осредненного давления на боковые стенки и зависимость давления в точках от открытия затвора, можно сказать следующее:

непосредственно за уступом наблюдается зона отрыва с воздушным шнуром и давлением (при открытиях до 6 м), близким к атмосферному;

далее, на расстоянии 1,52 м, расширяющаяся в плане струя ударяет в стенки, и давление здесь поднимается выше гидростатического;

далее, на участке до начала носка, давление на стенки несколько снижается и при малых открытиях становится близким к атмосферному;

на участке носка, где начинается подъем дна, давление на боковую стенку и бычок непосредственно у дна повышается. Однако по высоте стенки оно быстро убывает.

При различной комбинации открытий затворов динамические нагрузки по обе стороны бычка могут мгновенно складываться или вычитаться, создавая тяжелые условия работы для бычка. Потому рекомендуется избегать большой асимметрии (более 1 м) в открытиях соседних затворов.

По результатам экспериментов, проведенных на гидравлических моделях, могут быть сделаны следующие выводы:

1. При устройстве затворной камеры в конце туннельного водосброса в нем обеспечивается напорный режим течения со скоростями, не превышающими 1920 м/с. В этом случае кавитационная безопасность обделки туннелей может быть обеспечена при соблюдении обычных технологических требований к качеству бетонной поверхности. Это техническое решение предложено реализовать на левой нитке строительно-эксплуатационного водосброса. При этом данная нитка будет являться основным водосбросным сооружением гидроузла и будет обеспечивать пропуск рядовых паводков до 2070 м<sup>3</sup>/с в регулируемом режиме.

2. В период пропуска строительных расходов концевое сооружение левой нитки водосброса будет выполняться со штраблением, заключающемся в устройстве расширения на 1,5 м дна и боковых стенок помещения под затворную камеру, и ограничении носка трамплина отметкой 505,0 м. На горизонтальной части штрабленного носка-трамплина устраивается временный промежуточный бычок для монтажа шандорного заграждения, под защитой которого предполагается осуществлять завершение строительства концевого сооружения.

Для обеспечения приемлемых гидравлических условий при штраблении концевого сооружения сопряжение помещения затворной камеры с носком следует выполнять плавно с помощью треугольных вутов размером 4,0 x 1,5 м. Дополнительно, в пределах концевой части штрабленной затворной камеры, на боковых стенках на отметке 516,0 м рекомендуется выполнить горизонтальные козырьки шириной 1,5 м и длиной 8,0 м

3 При аварийном закрытии сегментного затвора, установленного в конце туннельного водовода, в туннеле будет возникать гидравлический удар, характеризующийся волной повы-

шенного давления. Величина повышения давления будет зависеть от времени опускания затвора (рис.7).

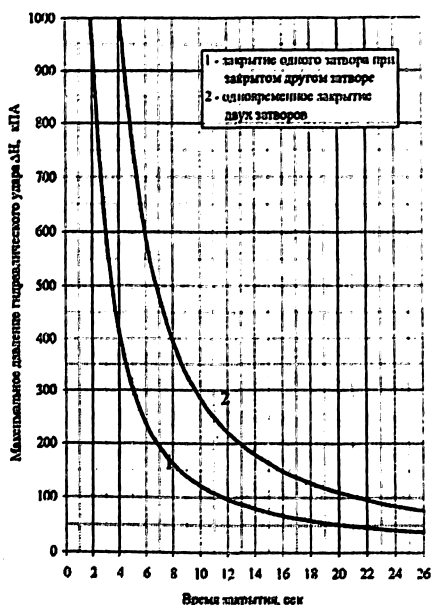


Рис. 7. Зависимость величины гидравлического удара от времени закрытия затворов

Следует отметить, что в аварийной ситуации, приводящей к неконтролируемому падению затвора, например, в случае обрыва штока, проушины, подвески, падение затвора произойдет за 1,53 секунды. При этом увеличение давления, вызываемое гидравлическим ударом, более чем в 10 раз превысит статический напор, вследствие чего весь выходной портал с затворами будет разрушен. Поэтому должна быть предусмотрена система аварийного торможения, исключающая свободное падение затвора.

4 В случае открытия одного затвора на регулируемой нитке водосброса нагрузка, действующая на промежуточный бычок, резко возрастает: статическая составляющая бокового давления составляет более 70 кПа, стандарт пульсации давления — 16 кПа. Распределение давления по длине бычка характеризуется значительной неравномерностью. Поэтому рекомендуется не допускать большой асимметрии в открытиях соседних затворов.

Отмечено набегание потока на участке носка на боковую стенку со стороны неработающего отверстия, достигающее максимальной высоты при полном открытии затвора работающего отверстия. Это явление исключается продлением бычка на 8,66 м



5 Условия входа потока в водоприемник ГЭС проверялись при работе от одного до четырех агрегатов и при уровнях верхнего бьефа от 545,0 до 571,5 м. Установлено, что слабые воронки без образования воздушного шнура появляются у стенок со стороны берега или неработающего пролета водоприемника. Их возникновению способствует малый радиус закругления стенки или промежуточного бычка, но они имеют слабый, временами, затухающий характер. Можно утверждать, что захвата воздуха через них в энергетические водоводы не будет.

В заключение следует сказать, что гидравлические исследования для Сангтудинского гидроузла по не зависящим от исполнителей причинам проводились с большим опозданием, поэтому важные рекомендации не учтены при разработке проекта. В частности:

форма забальной балки на водоприемнике водосбросов осталась циркульной. На ней будет образовываться зона вакуума с кавитацией и повышенными динамическими нагрузками;

конфигурация затворной камеры с уступами не является оптимальной. Известно, что при подобных условиях в строительных водосбросах Бурейской ГЭС образовывались огромные кавитационные каверны в бетоне с размерами 2 x 20 м и глубиной более 1,5 м. Наличие зон кавитации в камере эксплуатационных водосбросов, даже имеющих металлическую облицовку, недопустимо.

Эксперименты показали, что вследствие интерференции косячих волн в бурном потоке за уступами могут возникать подобные очаги. Этот вопрос требует детального дальнейшего изучения:

расположение затворов в конце напорного туннеля требует принятия специальных мер на случай аварийного падения затвора, приводящего к гидравлическому удару. Уравнительные башни, как это делается на водоводах ГЭС, здесь не помогут, так как скорости течения в туннеле могут быть свыше 20 м/с и давление гидравлического удара будет на порядок выше статического напора. Поэтому необходимо предусмотреть систему аварийного торможения движения затвора в случае аварии с гидроцилиндром, маслопроводом, штоком, проушиной, подвеской и т.д.;

большие переформирования рельефа русла в нижнем бьефе неизбежно приведут к образованию больших баров из продуктов размыва. Исследования показали, что в процессе пропуска расчетного паводка объем вымытого грунта достигает 600 тыс. м<sup>3</sup>. Неизбежное при этом образование баров ведет к подпору на ГЭС и потере мощности до 20 МВт. Предварительная выемка грунта из ямы размыва или устройство отводящего канала могли бы предотвратить или существенно уменьшить такой подпор.

Таким образом, недооценка возможности своевременного проведения гидравлических исследований в обоснование проектных решений приводит к ряду существенных упущений, ухудшающих эксплуатационные условия на гидроузле.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чепайкин Г.А. Конструирование моделей для исследования динамических явлений в механическом оборудовании высоконапорных гидротехнических водосбросов. // Гидротехническое строительство. 1983.
2. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений. Л: Энергия, 1967.
3. СНИП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения. М: Госстрой России. 2004.
4. Слиский С.М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. М.: «Энергоатомиздат» 1986.
5. Справочник по гидравлическим расчетам. / Под ред. П.Г.Киселева. М.: «Энергия», 1974. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. М.: «КолосС». 2004.
6. Швайшштейн А.М. Строительные туннели. Гидравлические условия работы. М.: «Энергоатомиздат». 1986.

### ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СОВМЕЩЕННОГО НИЖНЕГО БАСЕЙНА ЗАГОРСКИХ ГАЭС-1 И ГАЭС-2

*Беликов В.В., доктор техн.наук,  
Кочетков В.В., Третьюхина Е.С., инженеры (ОАО «НИИЭС»)*

Резко растущее энергопотребление в Московском регионе при его весьма существенной суточной неравномерности приводит к актуальности создания гидроаккумулирующих станций (ГАЭС) и увеличения их мощностей. В настоящее время в Подмоскowie успешно эксплуатируется Загорская ГАЭС-1 мощностью 1212 МВт, источником водоснабжения которой является р. Кунья. Недавно принято решение о строительстве Загорской ГАЭС-2, которая будет иметь отдельный верхний бассейн, а ее нижний бассейн совмещается с нижним бассейном ГАЭС-1 при увеличении полезного объема последнего. Здание ГАЭС-2 будет располагаться выше ГАЭС-1 по течению р. Куньи на 920 м. На ГАЭС-2 предполагается установить 4 агрегата того же типа, что и на ГАЭС-1, где установлено 6 агрегатов. Мощность ГАЭС-2 в генераторном режиме 840 МВт. Расширение нижнего бассейна первоначально предполагалось осуществить либо за счет повышения НПУ до отметки 165,7 м

при сохранении современных очертаний в плане (этот вариант неэффективен из-за потери напора и по ряду других причин), либо путем строительства дополнительной емкости в низовой части бассейна, которая соединяется с существующим бассейном относительно узким прораном в дамбах обвалования, с сохранением существующих НПУ=162,5 м и УМО = 153,5 м.

Гидравлические режимы течений в совмещенном нижнем бассейне для вариантов, обозначенных выше, были исследованы в работе [1], выполненной ООО «НПП «Аквариус» в 2006 г. Было показано, что расширение в низовую сторону не оптимально с гидравлической точки зрения и приводит к значительному росту скоростей течения в районе сооружений ГАЭС-1 (до 2,6 м/с по сравнению с 1,4 м/с в существующих условиях первой очереди). Это может стать причиной возникновения заторных и зажорных явлений, торошения льда, а также размывов дна и береговых откосов бассейна.

Исходя из результатов проведенных исследований, а также с учетом ряда других факторов (стоимость строительства, возможность землеотвода и др.), был предложен вариант расширения нижнего бассейна в верховую по течению р.Куньи сторону, состоящий из его углубления, расширения и создания дополнительной емкости выше верховой плотины. Этот вариант в настоящее время рассматривается как основной. Предварительные гидравлические расчеты этого варианта выполнены в работе [2]. Некоторые результаты работ [1,2] изложены в настоящей статье.

#### **Объект, задачи и методика исследований**

Как уже упоминалось, нижний бассейн Загорской ГАЭС-1 расположен в долине р. Куньи (притоке р. Дубны) и образован верховой и низовой плотинами, перегораживающими долину реки (рис. 1а). Особенности рельефа местности здесь таковы (большой продольный уклон русла), что при уровне мертвого объема (УМО) верхняя часть бассейна полностью осушается, тогда как вблизи низовой плотины глубины превышают 20 м. Соответственно, имеет место и плановая асимметрия бассейна (его уширение в низовую сторону). В результате основной полезный объем бассейна сосредоточен в его низовой (относительно водовыпуска ГАЭС-1) части.

Варианты расширения бассейна под вторую очередь в низовую сторону предусматривают строительство дополнительной емкости (варианты «Гриб» и «Сапожок», рис. 1а), которая соединяется с существующим бассейном относительно узким прораном (шириной

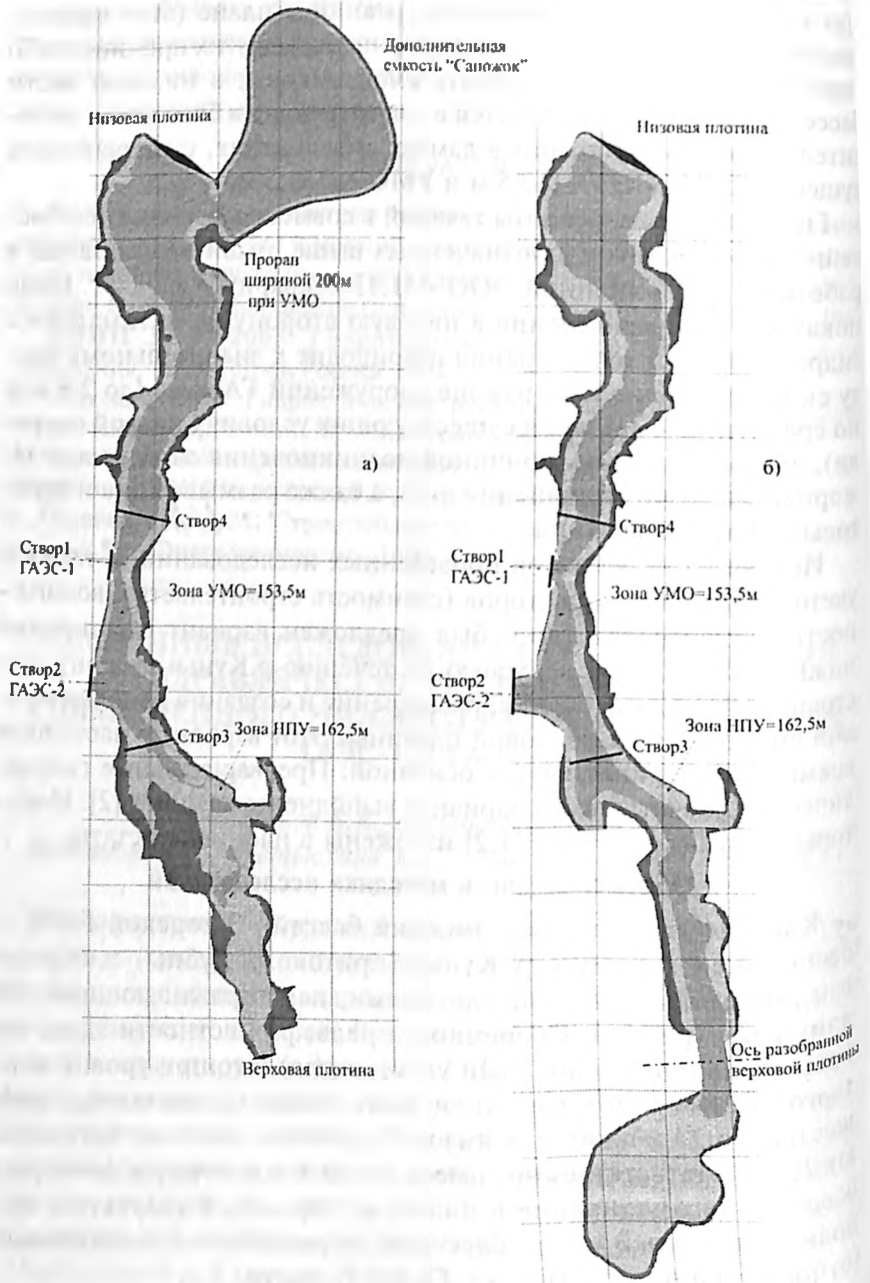


Рис. 1. Варианты расширения совмещенного нижнего бассейна Загорских ГАЭС-1 и ГАЭС-2: а) в низовую сторону; б) в верховую сторону

около 200 м) в дамбах обвалования, с сохранением существующих НПУ = 162,5 м и УМО = 153,5 м. Априори ясно, что эти варианты резко усиливают асимметрию распределения полезного объема по акватории бассейна. Напротив, вариант расширения в верховую сторону (рис.1б) приводит практически к симметричным плановым очертаниям бассейна относительно ГАЭС-1 и ГАЭС-2 и, соответственно, к симметричному распределению полезного объема. Основные параметры совмещенного нижнего бассейна Загорских ГАЭС по проектным данным приведены в табл.1.

Целью выполненных исследований являлся сравнительный анализ вариантов расширения нижнего бассейна и выбор оптимального с гидравлической точки зрения варианта на основе компьютерной гидродинамической модели. Расчеты проводились по программе «BOR» [3] с использованием двумерных (плановых) уравнений Сен-Венана и явной по времени численной схемы распада разрыва, описанной в работах [4, 5]. Моделировались нестационарные течения при совместной работе ГАЭС-1 и ГАЭС-2 в турбинном и насосном режимах, задаваемые часовым графиком расходов воды (табл. 2), в том числе и в зимний период с учетом ледяного покрова.

При построении компьютерной модели нижнего бассейна производилось формирование цифровой модели рельефа (ЦМР). В картографическом редакторе NEVA создавалась пустая электронная карта местности масштаба 1 : 1000, которая совмещалась по координатной сетке с отсканированными растровыми топографическими картами и чертежами основных сооружений. После этого производилась оцифровка объектов карты (горизонталей, отметок высот, сооружений). К ним добавлялась часть информации в формате dwg (ACAD). Затем формировался соответствующий единый файл ЦМР в виде набора точек в декартовых координатах  $X, Y, Z$ . После этого отметки рельефа интерполировались в центры ячеек треугольной расчетной сетки при помощи специальной методики [6].

По предложению Центра гидравлических исследований ОАО «НИИЭС» летом 2006 г. сотрудниками Русловой партии МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством А.А. Зайцева на акватории существующего нижнего бассейна ГАЭС-1 были выполнены водно-технические изыскания с применением системы спутникового позиционирования, имеющие целью получить современную батиметрию нижнего бассейна. Сопоставление старой (по проекту) и новой батиметрий показало, что глобальные деформации дна бассейна (заиление, размывы) за период эксплуатации не произошли. Имеют место лишь небольшие локальные (на небольших площадях) из-

Водноэнергетические показатели Загорских ГАЭС

Показатель	Значение показателя	
	ГАЭС-1	ГАЭС-2
1	2	3
<b>1. Параметры бассейнов</b>		
<i>Верхний бассейн</i>		
Нормальный подпорный уровень (НПУ), м	266,5	266,5
Уровень мертвого объема (УМО), м	257,5	257,5
Полный объем, млн.м <sup>3</sup>		
– при НПУ		
– при УМО	29,9	23,4
Полезный объем, млн.м <sup>3</sup>	7,2	12,2
Площадь зеркала, км <sup>2</sup>	22,7	11,82
– при НПУ		
– при УМО	2,67	1,33
	2,40	1,18
<i>Нижний бассейн</i>		
Нормальный подпорный уровень (НПУ), м	162,5	162,5
Уровень мертвого объема (УМО), м	153,5	153,5
Полный объем, млн.м <sup>3</sup>		
– при НПУ		
– при УМО	45,1	45,1
Полезный объем, млн.м <sup>3</sup>	12,2	12,2
Площадь зеркала, км <sup>2</sup>	32,9	32,9
– при НПУ		
– при УМО	3,76	3,76
Полезный объем, используемый ГАЭС, млн.м <sup>3</sup>	1,67	1,67
– летом		
– зимой (на 15 декабря)	21,7	11,2
	20,8	10,3
<b>2. Водноэнергетические показатели</b>		
Установленная мощность, МВт		
– в турбинном режиме		840
– в насосном режиме	1212	996
Суточная выработка электроэнергии ГАЭС, млн. кВт·ч	1320	
– летом		
– зимой (на 15 декабря)	5,4	2,8
Затраты электроэнергии, млн.м <sup>3</sup> ч	5,2	2,6
– летом		
– зимой (на 15 декабря)	6,9	3,6
Располагаемая по напору мощность (на конец 3-го часа работы в турбинном режиме 15 декабря), МВт	6,7	3,3
	1212	828
	(1128)	(756)

**Безопасность энергетических сооружений**

Таблица 2

**Зимний часовой график совместной работы ГАЭС-1 и ГАЭС-2**

Мощност ти, МВт	ГАЭС-1			ГАЭС-2			Уровни воды, м		
	Расходы воды, м <sup>3</sup> /с	Напоры нетто, м	Мощност ти, МВт	Расходы воды, м <sup>3</sup> /с	Напоры нетто, м	Верхний бассейн		Нижний бассейн	
						ГАЭС-1	ГАЭС-2		
-396	374	94.9	-225	213	95.2	258.7	258.8	165.0	
-1320	1215	97.8	-750	690	98.2	260.5	260.8	162.7	
-1320	1173	101.7	-750	666	102.3	262.2	262.8	160.5	
-1320	1132	105.6	-1000	855	106.9	263.8	265.3	157.8	
-1320	1091	109.8	-527	438	110.5	265.3	266.5	155.1	
-987	793	112.9	0	0	-	266.5	266.5	153.5	
0	0	-	0	0	-	266.5	266.5	153.5	
0	0	-	0	0	-	266.5	266.5	153.5	
246	250	111.7	151	152	111.5	266.1	266.1	154.3	
1000	1047	107.5	840	881	106.8	264.6	263.5	157.8	
1000	1090	102.9	638	700	102.2	263.1	261.5	160.3	
246	271	101.9	151	171	99.5	262.7	261.0	160.8	
0	0	-	0	0	-	262.7	261.0	160.8	
0	0	-	0	0	-	262.7	261.0	160.8	
246	274	100.6	151	173	98.4	262.3	260.5	161.4	
0	0	-	0	0	-	262.3	260.5	161.4	
246	277	99.6	151	176	97.3	261.9	260.0	162.1	
246	280	98.6	151	178	96.2	261.5	259.4	162.5	
642	247	96.5	151	181	94.8	260.4	258.9	163.6	
246	290	95.5	151	185	93.4	260.0	258.3	164.2	
246	293	94.5	53	64	93.6	259.6	258.2	164.6	
246	296	93.7	0	0	-	259.2	258.2	164.9	
246	299	93.0	0	0	-	258.7	258.2	165.3	
294	363	91.6	0	0	-	258.2	258.2	165.7	

менения отметок дна, которые в ряде случаев могут быть интерпретированы как погрешности пересчета отметок дна при сравнении рельефов, заданных на различных наборах точек. Это подтверждается и сопоставлением кривых статических объемов, построенных для старой и новой батиметрий (рис. 2). Таким образом, при проектировании расширения нижнего бассейна под вторую очередь и выполнении моделирования используются достоверные актуализированные батиметрические данные.

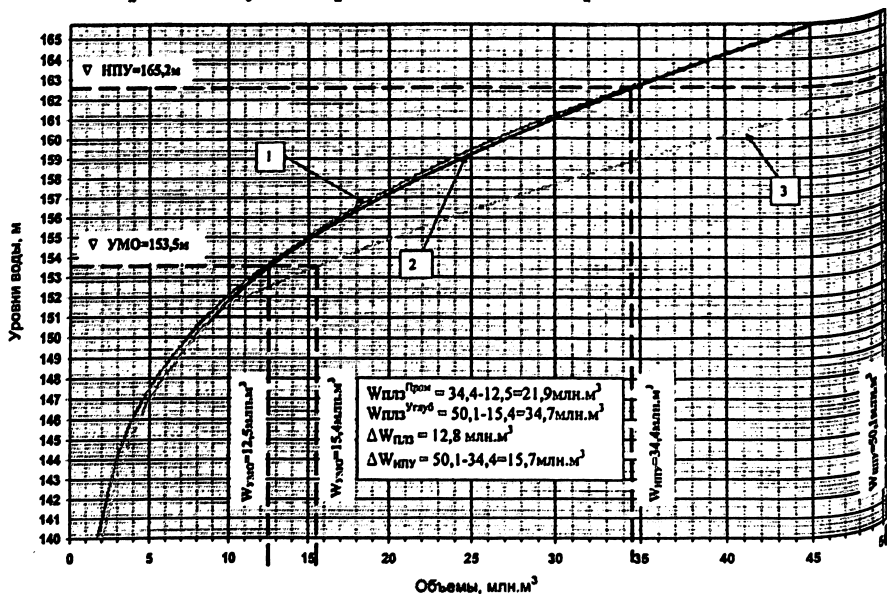


Рис. 2. Кривые статических объемов нижнего бассейна Загорской ГАЭС: 1 — существующий бассейн, старая батиметрия; 2 — существующий бассейн, новая батиметрия; 3 — расширение бассейна в верховую сторону с углублением до отметки 151,5 м

Для расчетов применялись треугольные сетки нерегулярной структуры, хорошо адаптирующиеся под плановые очертания расчетной области и особенности течения. Для их построения применялась следующая методика. На первом шаге расчетная область разбивалась на несколько подобластей (зон), определяемых геометрической формой расчетной области. В каждой из этих зон при помощи модифицированной версии программы «TRIANA» [7] строилась базовая сетка нулевого приближения, максимально адаптированная к контуру соответствующей области. На втором шаге все зоны объединялись и производилось сглаживание сетки по алгоритму минимизации гармонического функционала, регулирующего форму и размеры ячеек.



В итоге было построено четыре варианта сетки с длинами сторон треугольников от 10 до 30 м: вариант 1 — сетка, содержащая 26814 ячеек, по существующим очертаниям нижнего бассейна; вариант 2 — 34510 ячеек с учетом дополнительной емкости «сапожок»; вариант 3 — 32452 ячеек с учетом дополнительной емкости «гриб»; вариант 4 — 37412 ячеек для расширения в верховую сторону.

Важным этапом при построении компьютерной гидравлической модели объекта является ее калибровка, т.е. настройка на данный объект путем подбора входящих в модель параметров (в нашем случае коэффициентов шероховатости) таким образом, чтобы получить согласование с имеющимися натурными данными. Для рассматриваемого объекта в распоряжении исполнителей не было натуральных данных по изменению уровней воды во времени в контрольных точках и створах при работе ГАЭС-1. Поэтому, исходя из опытов расчетов других объектов, нами были назначены коэффициенты шероховатости по Маннингу  $n = 0,03$  для открытого потока и  $n = 0,05$  для потока подо льдом. После этого проводилось сопоставление расчетов зимнего режима при совместной работе ГАЭС-1 и ГАЭС-2 с проектными данными (косвенная проверка, табл. 2). При этом учитывалась толщина льда, которая принималась равной 0,5 м, причем сам ледовый покров моделировался как дополнительное сопротивление потока (путем повышения коэффициента шероховатости).

По нашим расчетам уровни воды отличаются от проектных данных на различные моменты времени (табл. 2, последний столбец) на величину до 0,3 м (при общей амплитуде колебания 9 м), что вызвано существенной неравномерностью распределения отметок водной поверхности по акватории бассейна в силу нестационарности рассматриваемых течений. При калибровке на расчетной треугольной сетке вычислялся также полезный (рабочий) объем  $W_{\text{плз}} = W_{\text{нпу}} - W_{\text{умо}} = 43,3 - 12,2 = 31,1$  млн.м<sup>3</sup>, что в точности соответствует проектным данным для зимнего периода (табл.1.). По результатам калибровки для дальнейших расчетов был принят коэффициент шероховатости равным 0,05 при наличии ледового покрова и 0,03 при его отсутствии.

#### Результаты численного моделирования

##### *Расчет течений для существующего бассейна первой очереди*

Первоначально был проведен расчет нестационарных течений в нижнем бассейне при работе первой очереди ГАЭС. Часовой (зимний) график работы ГАЭС-1 был взят из табл. 2, НПУ = 162,5 м. Расчетное наполнение бассейна РНБ = НПУ - 0,5 м (лед)

= 162,0 м; УМО=153,5 м;  $W_{плз} = 20,8$  млн. м<sup>3</sup>. Расчет выполнен при условии наличия ледового покрова.

По результатам расчетов построены графики хода уровней и скоростей в контрольных точках. Уровни воды в контрольных точках колеблются в диапазоне от 162,0 до 153,0 м (верхняя поверхность льда в диапазоне от 162,5 м до 153,5 м соответственно). По графикам скоростей получено, что при работе ГАЭС в насосном режиме (при закачке в верхний бассейн) максимальное значение скорости вблизи створа ГАЭС-1 будет составлять ~ 1,15 м/с в конце режима (на 6 часов утра); в турбинном — 1,5 м/с, которая будет наблюдаться при максимальном сбросе (на 9 часов утра).

Построены также графики распределения расходов в контрольных створах, расположенных выше и ниже по течению р. Куньи от оси ГАЭС-1. Как уже отмечалось выше, поток делится на две неравные части — в турбинном режиме большая часть расхода поступает в низовую часть бассейна, в насосном — закачивается из низовой части бассейна. В конце режима закачки (при уровнях, близких к УМО) значительная часть верховой части бассейна осушается.

Расчет течений для вариантов расширения водоема под вторую очередь в низовую сторону

Для обеспечения нормальных условий работы ГАЭС-2 необходимо увеличить полезный объем нижнего бассейна на 11 млн. м<sup>3</sup>. Этого можно достичь тремя путями: 1 — повысить НПУ на 3,2 м, при этом сохраняются прежние очертания бассейна; 2 — создать дополнительную емкость в низовой части бассейна, которая присоединяется к бассейну через проран (шириной 200 — 250 м при УМО) в теле низовой плотины, с сохранением прежней отметки НПУ; 3 — углубить верховую часть бассейна и создать дополнительную емкость выше верховой плотины, с сохранением прежнего НПУ.

Были выполнены следующие варианты расчетов:

1 вариант — повышение уровня РНБ до отметки 165,7 - 0,5 (лед) = 165,2 м;

2 вариант — дополнительная емкость «Сапожок» (см. рис. 1а), РНБ = 162,5 - 0,5(лед) = 162,0 м;

3 вариант — дополнительная емкость «Гриб» (аналогичная «Сапожку»), РНБ = 162,0 м.

Расчеты для варианта с углублением и расширением верховой части бассейна описаны в следующем разделе.

Расчеты всех трех вариантов проводили на зимний часовой график совместной работы ГАЭС-1 и ГАЭС-2 при наличии ле-

дового покрова. На рис. 3 приведены гидрографы расходов воды в контрольных створах для варианта 2 («Сапожок»). Основной особенностью рассмотренных вариантов совместной работы ГАЭС-1 и ГАЭС-2 является то, что весь расход ГАЭС-1 и значительная часть сбрасываемого расхода ГАЭС-2 (при турбинном режиме) идет к низовой плотине. Это приводит к резкому повышению скоростей течения в створе ГАЭС-1 (дополнительно примерно на 1 м/с на начальных стадиях турбинного режима) по сравнению с работой только первой очереди. Максимальное значение расхода, подходящего и забираемого в устье «Сапожка» (в створе прорана), не превышает  $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ , в устье «Гриба» —  $1130 \text{ м}^3/\text{с}$ .

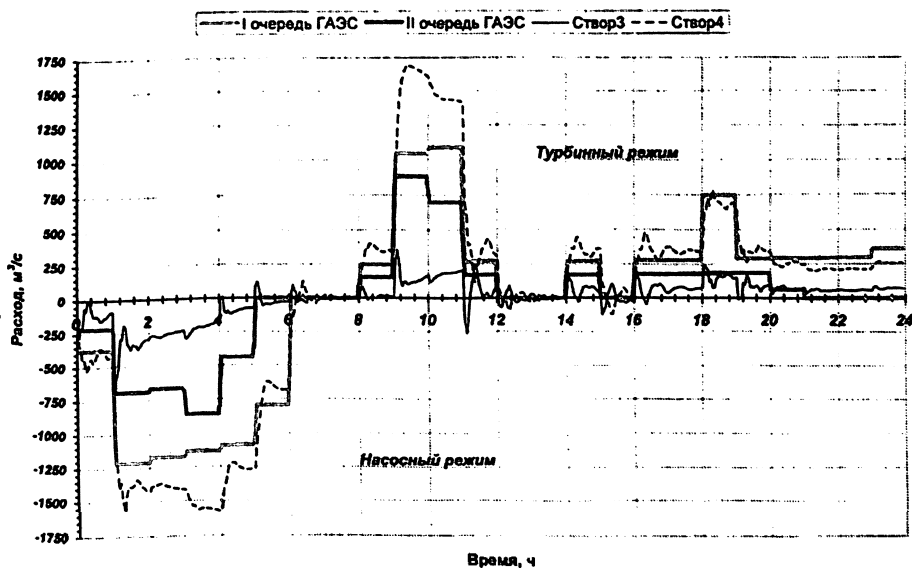


Рис. 3. Расходы воды в контрольных створах в зависимости от времени для варианта «Сапожок» расширения бассейна в низовую сторону и толщиной льда 0,5 м

Максимальные значения скоростей вблизи створа ГАЭС-1 при варианте 1 в турбинном режиме составляют  $\sim 2,3 \text{ м/с}$ , при варианте 2 —  $2,4 \text{ м/с}$ , при варианте 3 —  $2,45 \text{ м/с}$  (напомним, что в створе ГАЭС-1 при работе только первой очереди скорости не превышают  $1,5 \text{ м/с}$ ); в створе ГАЭС-2 —  $1,42; 1,25; 1,4 \text{ м/с}$ , соответственно. Максимальные скорости течений в устьях «Сапожка» и «Гриба» составляют  $1,1; 1,0 \text{ м/с}$ , соответственно. На рис. 4а приведено поле максимальных скоростей течения в районе створов ГАЭС для варианта 2.

При отсутствии ледового покрова скорости течения будут незначительно больше (на пиках до 0,2 м/с), чем при его наличии (т.к. лед дает дополнительное сопротивление потоку). В целом картина течения как при отсутствии льда, так и при его наличии получается весьма схожая.

Как уже отмечалось выше, во всех рассмотренных вариантах возникают высокие (до 2,5 м/с, а с учетом пульсаций до 3 м/с) скорости в районе ГАЭС-1, которые вызваны пропуском большого расхода в суженном участке бассейна. В дополнение ко всему транзитный поток здесь поджимает зона возвратного течения. Резкое повышение скоростей течения по сравнению с режимами работы только первой очереди может привести к увеличению интенсивности донных деформаций, а также к ломке и торшению ледяного покрова.

#### *Расчет течений для вариантов расширения водоема под вторую очередь в верховую сторону*

На данном этапе работы выполнены предварительные расчеты нестационарных течений в нижнем бассейне Загорских ГАЭС-1 и -2 новой конфигурации. Ранее рассматривались варианты увеличения бассейна под вторую очередь путем присоединения дополнительной емкости различных очертаний со стороны низовой плотины. Так как возникли проблемы с отводом земель под строительство, был предложен следующий вариант решения задачи по увеличению емкости бассейна. Верховая плотина полностью разбирается, на ее месте устраивается канал шириной 200 м с вертикальными бетонными стенками, с помощью которого к нижнему бассейну присоединяется емкость с отметкой дна 151,5 м (что ниже УМО = 153,5 на два метра), естественное дно от створа второй очереди до емкости рассчитывается до той же отметки (151,5 м). На рис.16 представлены очертания нижнего бассейна в плане в варианте с расширением в верховую сторону, а на рис. 2 — соответствующая кривая статических объемов.

Рассматривалась совместная работа Загорских ГАЭС-1 и ГАЭС-2 зимой, при этом толщина льда принималась равной 0,5 м и 1,0 м. Как и в предыдущих расчетах, анализировались скоростные поля течения в конце насосного и начале турбинного режимов работы станций (т.е. в моменты возникновения максимальных скоростей и уклонов водной поверхности) для различных толщин льда. Расчеты показали, что вблизи водозаборов/водопусков ГАЭС-1 и ГАЭС-2 максимальные скорости достигают 2 м/с, далее на относительно узких и мелководных участках

нижнего бассейна максимальные скорости имеют значения от 1 м/с до 1,5 м/с, и лишь в наиболее удаленных от ГАЭС и расширяющихся частях бассейна скорости падают до величин 0,1 – 0,3 м/с. Большие скорости течения могут привести к ломке, подвижкам и торошению ледяного поля, к подныриванию льдин друг под друга, образованию заторов и зажоров льда.

Анализ изменения во времени уровней воды в контрольных точках показал, что в конце насосного режима при толщине льда 1 м уровни воды у водозаборов ГАЭС понижаются до отметки 152,0 м, т.е. падают на 1,5 м ниже УМО. Реально это может привести к укладке льда на дно бассейна вблизи водозаборов и практически полному прекращению поступления воды в насосы. В конце закачки и в начале сброса перепады уровней водной поверхности по длине бассейна составляют около 1,5 м – 2 м.

Выполненные расчеты показали, что предложенное конструктивное решение (углубление всего на 2 м ниже УМО) не может гарантированно обеспечить нормальные условия эксплуатации ГАЭС-2 (а так же и ГАЭС-1) в зимний период года при наличии льда. Предложенная глубина выемки до отметки 151,5 м явно недостаточна, поэтому было решено рассмотреть вариант расчистки дна нижнего бассейна вплоть до створа первой очереди на отметке 149,5 м. При этом полезная емкость бассейна остается неизменной.

На рис. 4 б приведены модули максимальных за весь цикл работы ГАЭС скоростей течения для толщины льда 0,5 м. Сравнивая полученные результаты по максимальным скоростям, видим снижение скоростей у ГАЭС-2 и в верховой части бассейна до значений 1 м/с, кроме того, и в низовой части произошло уменьшение скоростей до значений 0,5 – 0,8 м/с, а вблизи ГАЭС-1 до 1,3 м/с, что даже ниже, чем в существующих условиях.

Анализ изменения во времени уровней воды показал, что в конце насосного режима при толщине льда 0,5 м уровни воды у водозаборов ГАЭС понижаются до отметки 153,6 м, т.е. практически совпадают с УМО. На рис. 5 представлены графики расходов воды через контрольные створы. Видно, что поток делится симметрично в верховую и низовую стороны (осредненные расходы в створах 3 и 4 близки друг к другу), что и приводит к значительному снижению максимальных скоростей течения и уменьшению уклонов водной поверхности. Сопоставление вариантов расширения в низовую и верховую стороны (рис.3,6 и рис. 4а,б) убедительно свидетельствует в пользу последнего.

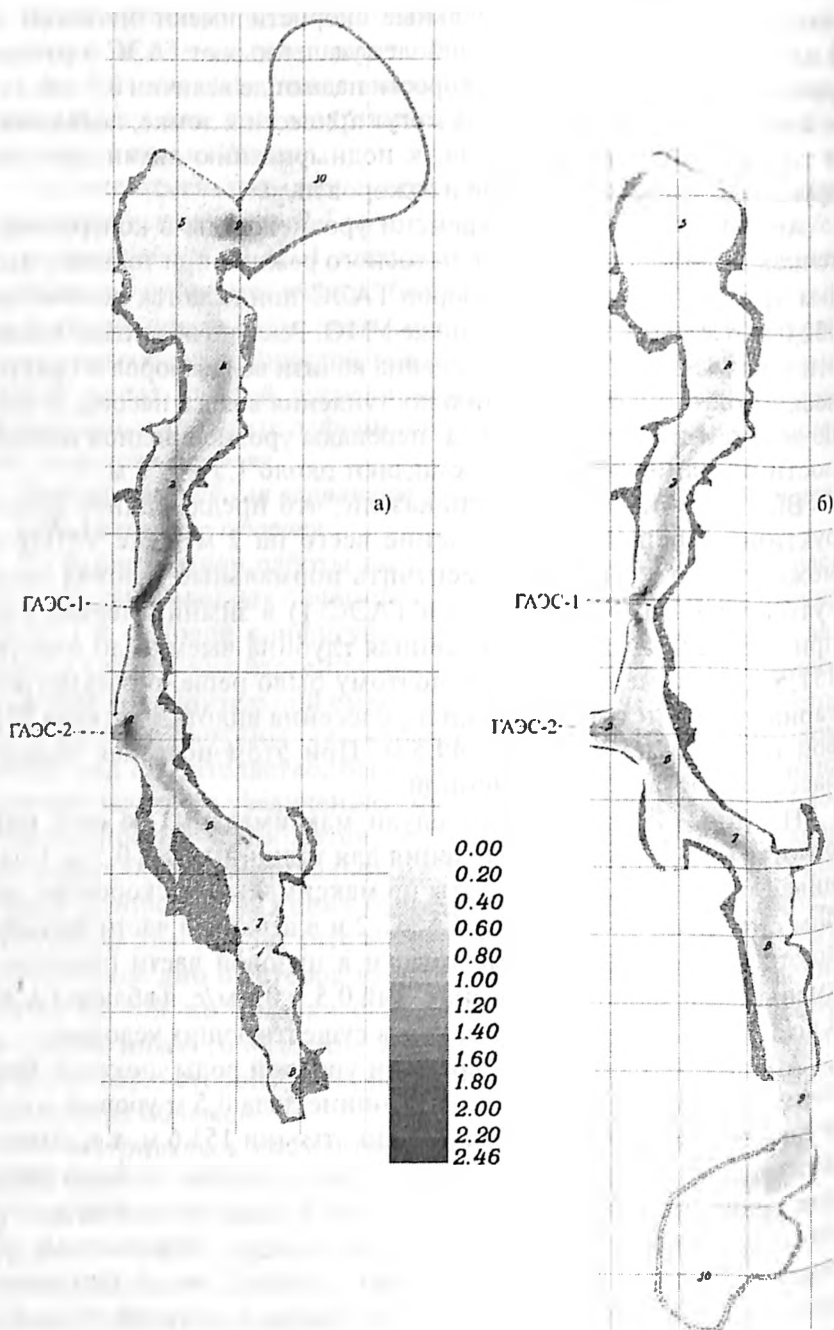


Рис. 4. Поле модулей максимальных скоростей течения в нижнем бассейне Загорских ГАЭС: а) для расширения в низовую сторону (вариант «Сапожок»); б) для расширения в верховую сторону

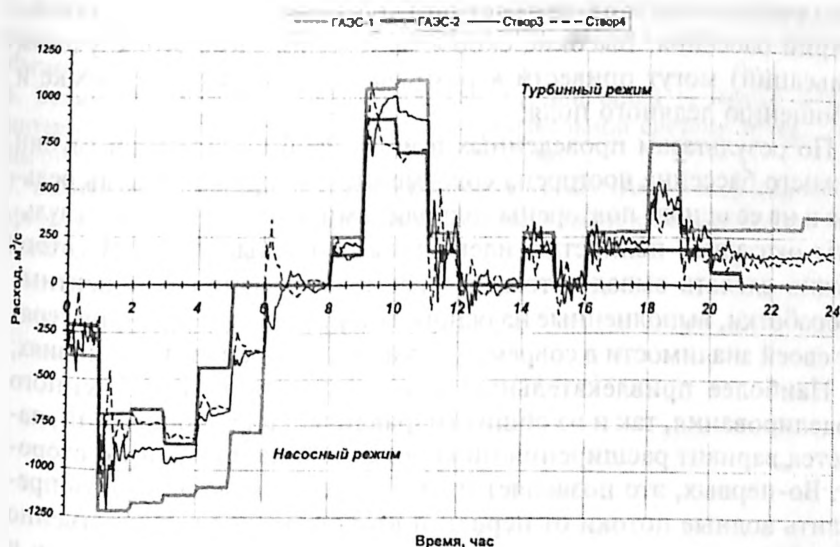


Рис. 5. Расходы воды в контрольных створах в зависимости от времени для варианта расширения бассейна в верховую сторону с отметкой дна 149,5 м и толщиной льда 0,5 м

### Выводы

На основе двумерных уравнений Сен-Венана и детальных актуализированных цифровых моделей рельефа построены компьютерные гидродинамические модели нижнего аккумулирующего водоема первой очереди Загорской ГАЭС существующего очертания, а также вариантов расширения водоема под вторую очередь.

Расчеты течений для существующего водоема первой очереди Загорской ГАЭС показали, что максимальные скорости течения в створе первой очереди составляют 1,5 м/с, которые достигаются при работе станции в начальной стадии турбинного режима с максимальным сбросом расхода.

Расчеты течений для вариантов расширения водоема под вторую очередь в низовую сторону показали, что максимальные скорости течения при совместной работе ГАЭС-1 и ГАЭС-2 для всех вариантов расширения существенно выросли (по сравнению с первой очередью) и составили в районе ГАЭС-1 ~ 2,4 м/с в зимних условиях и 2,6 м/с при отсутствии ледяного покрова. Повышение скоростей вызвано увеличением суммарного расхода в створе ниже ГАЭС-1 (створ 4 на рис.1) до 1700 м³/с в начале турбинного режима, т.е. в этом створе проходит весь расход ГАЭС-1 и значительная часть расхода ГАЭС-2. Асимметричный режим те-

чения вызван сильной асимметрией плановых очертаний и батиметрии бассейна. Высокие скорости течения (до 3 м/с с учетом пульсаций) могут привести к размывам дна и откосов, ломке и торшению ледяного поля;

По результатам проведенных в июле 2006 г. промеров глубин нижнего бассейна построена современная цифровая модель рельефа и на ее основе повторены гидродинамические расчеты. Результаты оказались полностью идентичными предыдущим. Из этого можно сделать вывод о том, что все исследования и проектные проработки, выполненные на основе «старой» батиметрии, не теряют своей значимости в современных актуализированных условиях;

Наиболее привлекательным как по результатам численного моделирования, так и из общих гидравлических соображений, является вариант расширения нижнего бассейна в верховую сторону. Во-первых, это позволяет практически симметрично распределить водные потоки от первой и второй очереди, существенно снизив высокие скорости течения в районе как ГАЭС-2, так и ГАЭС-1 при совместной работе двух станций (до 1 м/с при толщине льда 0,5 м и до 1,3 м/с при толщине льда 1 м). Во-вторых, углубление мелководной части бассейна позволит уменьшить объем намерзания льда на мелководье, что уменьшит потери полезного объема нижнего бассейна в зимний период. При этом для обеспечения надежной работы станции необходимо на участке расширения сформировать дно на отметке не выше 149,5 м, т.е. обеспечить выемку грунта на 4 м ниже УМО.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Научно-технический отчет** «Гидравлические исследования нижнего бассейна Загорской ГАЭС-1 и ГАЭС-2 на численной модели» М., ООО «НПП «Аквариус». 2006.
2. **Научно-технический отчет** «Проектно-сметная документация на устройство дополнительной емкости нижнего бассейна Загорской ГАЭС-2» (Этап 1. «Анализ существующей проектной документации нижнего бассейна Загорской ГАЭС-2 по условиям работы в зимний период года»). М.: ООО «НПП «Аквариус». 2007.
3. **Беликов В.В., Милитеев А.Н., Кочетков В.В.** Комплекс программ для расчета волн прорыва (БОР). //Российское агентство по патентным и товарным знакам. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2001610638. М. 2001.
4. **Беликов В.В., Семенов А.Ю.** Построение численных методов распада разрыва для решения уравнений теории мелкой воды. //В кн. «Вычислительная гидродинамика природных течений». М.: Наука. ФИЗМАТЛИТ. 1997 – Тр. ИОФАН. Т. 53.



5. Беликов В.В., Семенов А.Ю. Численный метод распада разрыва для решения уравнений теории мелкой воды. //Ж. Вычисл. Матем. и Матем. Физики. 1997. Т. 37. №8.
6. Беликов В.В. и др. Несибсоновская интерполяция — новый метод интерполяции значений функции на произвольной системе точек. Ж. Вычисл. Матем. и Матем. Физики. 1997. Т. 37. №1.
7. Беликов В.В. Вычислительный комплекс «TRIANA» — генератор сеток треугольных конечных элементов в произвольных плоских областях. М.: ГосФАП СССР. П007705. 1984.

## III. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ГТС

### ХАРАКТЕР НАВОДНЕНИЙ РАЗЛИЧНОГО ТИПА И СОСТАВ ЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

*Истомина М.Н., кандидат геогр. наук, Лебедева И.П., кандидат геогр. наук (Институт водных проблем РАН)*

Анализ данных по наводнениям в мире и России [1 – 3] показывает, что, несмотря на осуществление противопаводковой защиты, социально-экономический ущерб от этого бедствия имеет тенденцию к увеличению.

В настоящее время все защитные мероприятия подразделяются на инженерные и неинженерные [4]. Под инженерными способами защиты подразумеваются мероприятия, направленные на регулирование, задержание или отвод максимального стока с целью предотвращения затоплений территорий. К ним относятся:

1) строительство различных гидротехнических сооружений (плотин, береговых и заградительных дамб и насыпей, каналов, насосных станций, системы ливневой канализации и т.д.);

2) осуществление русловыправительных работ для увеличения пропускной способности русел рек (углубление, спрямление или расширение речных русел);

3) проведение на пойме земляных работ, способствующих уменьшению площади затопления (подсыпка грунта, дренирование подтопляемых территорий, укрепление берегов и пойменных террас);

4) искусственное регулирование накопленного объема воды в водохранилищах, прудах-накопителях, естественных подпорных озерах (попуски и сброс избыточного количества воды), искусственное регулирование ледовых явлений (попуски с ГЭС, применение ледоколов, взрывных работ и т.д.).

Практика показывает, что в целом одними инженерными мероприятиями невозможно обеспечить полной защиты от навод-

нений. И это связано не только с масштабностью необходимого противопаводкового строительства, но и с психологическим настроением проживающих в потенциально опасной зоне людей. После строительства ГТС у населения защищаемой территории возникает уверенность в том, что возможность затопления полностью исключена. Хозяйственная деятельность возрастает, осваиваются все новые и новые земли. В случае же возникновения исключительно высокого половодья или паводка, когда по той или иной причине защитные сооружения оказываются неспособными выполнять свои функции, ущербы от затоплений многократно увеличиваются. Или другая ситуация. Чувство ложной безопасности может привести к активному освоению и застройке в нижнем бьефе ГТС пойменных земель, которые в естественных условиях подвергаются затоплению каждые 5—10 лет, как, например, это наблюдается в пределах Волго-Ахтубинской поймы и волжской дельты. Для предотвращения затопления этой застройки (в первую очередь садовых домиков) в средние и средне высокие половодья оказывается необходимым форсировать уровень воды в Жигулевском, Волгоградском, Чебоксарском и Нижнекамском водохранилищах, что приводит к ущербам от затопления и подтопления на прилегающих к ним землях в верхнем бьефе сооружений [5]:

Поэтому до сих пор важна организация рационального ведения хозяйства на затопляемых поймах рек, что наряду с проведением инженерно-технических мероприятий, позволяет значительно сократить ущербы от наводнений.

Очевидно, что адекватно отреагировать на возможную катастрофу можно лишь при наличии прогнозных данных. В первую очередь, это касается системы предупреждения о наводнении, представляющей собой, например, следующую условную цепочку: станции слежения за речным стоком и атмосферными осадками — прогнозные центры — потребители информации.

Особую роль в снижении людских и материальных потерь играют действия местной администрации и проживающего в паводкоопасном районе населения. Зачастую мало знать об угрозе наводнения, надо еще и знать, что делать до бедствия, во время и после него.

Таким образом, к неинженерным способам защиты [4], суть которых заключается в приспособлении к природным условиям с целью снижения возможного ущерба, относятся:

регулирование землепользования на поймах и водосборах (частичный или полный запрет освоения опасных территорий на

основе законодательных актов, изменение видов хозяйственной деятельности, проведение агролесотехнических мероприятий, картирование паводкоопасных территорий и т.д.);

проведение образовательных программ, издание специальных брошюр и листовок с целью повышения уровня знаний у постоянно проживающего на опасной территории населения, а также у лиц, временно прибывающих в данном районе (отдыхающие, командированные и т.д.) о видах наводнений, их потенциальной опасности и последствиях, необходимых действиях и т.д.;

подготовка и проведение экстренных мер по эвакуации людей из опасной зоны, ликвидации аварий и организации восстановительных работ;

страхование имущества.

К инженерным способам защиты также относятся:

развитие и усовершенствование системы мониторинга и прогнозирования наводнений;

создание систем предупреждения и оповещения населения об опасности наводнения (в том числе и за ГТС);

Бесспорно, что инженерные и неинженерные мероприятия должны осуществляться в едином комплексе. Однако, как показывают наши исследования, для повышения эффективности защитных мер, необходимо учитывать еще и природу (генезис) самих наводнений.

В зависимости от генезиса наводнения порядок и набор первоочередных защитных инженерных и неинженерных мероприятий должен быть различным. В одних случаях это, в первую очередь, прогноз и регулирование максимального стока (задержание, отвод), в других — мониторинг, оповещение и экстренная эвакуация населения. При этом особую роль для выработки «сценария действий» играют накопленные сведения (современные и исторические) о продолжительности и повторяемости наводнений.

Используя классификацию А.Ф. Мандыча [6], повторяемость наводнений можно представить в виде следующих категорий:

1) регулярные — непродолжительные наводнения, повторяющиеся через примерно одинаковые промежутки времени;

2) нерегулярные — наводнения, время возникновения которых может рассматриваться как случайное;

3) сезонные — регулярные наводнения, повторяемость которых четко определяется реализацией годового гидрологического цикла;

4) спорадические — единичные события наводнений, формирующиеся от случая к случаю.

Продолжительность наводнения, период формирования и последующего распределения ударной волны напрямую влияют на скорость ответной реакции людей на надвигающуюся опасность. Очевидно, что наводнения, имеющие спорадическую природу и кратковременную продолжительность (например, цунами) — представляют наибольшую угрозу и, следовательно, причиняют наибольший ущерб, поскольку их трудно спрогнозировать, а на принятие экстренных мер, например, по эвакуации населения, практически нет времени. С другой стороны, сезонные наводнения с продолжительностью от нескольких дней до нескольких месяцев, в наибольшей степени поддаются прогнозу, что позволяет заранее подготовиться к ним и по возможности минимизировать социально-экономический ущерб (например, во время весеннего половодья).

*Состав первоочередных защитных мероприятий* в зависимости от генезиса, продолжительности и повторяемости наводнений представлен в таблице. Для краткой характеристики различных типов наводнений в таблице также приводятся особенности их проявления.

Как видно из таблицы, наименее опасны сезонные половодья, дождевые паводки, заторы, зажоры, а также нагоны. Данные типы наводнений имеют наиболее высокую оправдываемость прогнозов, знание которых позволяет заблаговременно подготовить водохранилища и водоемы-накопители к принятию паводковых вод, осуществить организационные мероприятия и сформировать вспомогательные бригады, использовать систему оповещения, при необходимости эвакуировать людей, сельскохозяйственных животных, личное и государственное имущество.

Наибольшую угрозу представляют собой ливневые дождевые паводки, паводки прорывов, сели и цунами. Поясним это на нескольких примерах.

Несмотря на то, что селевые наводнения при прорывах характеризуются особой разрушительностью и внезапностью, при детальном изучении их причин выяснено, что неожиданность событий, скорее, является следствием недостатка внимания к конкретному подпруженному озеру или леднику и проблеме в целом. Этот вывод очень ярко подтверждается трагическими событиями на леднике Колка в Северной Осетии в 2002 г.

Из исторических сведений известно о Санибанской (Геналдонской) катастрофе в бассейне реки Геналдон на северном склоне Казбекско-Джидарайхохского массива Большого Кавказа в 3 —

Первоочередные защитные мероприятия в зависимости

Тип наводнения	Генезис	Продолжительность	Повторяемость	Особенности проявления
1	2	3	4	5
Половодья	Весеннее таяние снега на равнинных водосборах умеренного пояса, а также таяния снегов и ледников в горах в весенне-летний период	На малых равнинных реках составляет порядка 15-20 дней, на крупных равнинных, а также в горах – 2-3 месяца и больше	Сезонные	Длительность затопления талыми водами больших территорий
Дождевые паводки	Ливневые дожди продолжительностью от 2-3 часов до нескольких суток, со средней интенсивностью выпадения осадков 2-10 мм/ч	От нескольких часов до нескольких дней	Сезонные/ Нерегулярные/ Спорадические	Кратковременность, локальность
	Обложные дожди (в т.ч. сезонные дожди – муссоны) продолжительностью от 3-5 суток до нескольких месяцев, со средней интенсивность - до 2 мм/ч,	От нескольких дней до нескольких месяцев	Сезонные	Длительность затопления дождевыми водами во время муссонов и сезонных дождей
Заторы	Стеснение живого сечения русла реки многослойными нагромождениями крупно- и мелкобитых льдин в период ледохода в конце зимы - начале весны	От нескольких часов до 15 суток	Сезонные	Совместное действие талых вод с глыбами льда, скопление их на пойме после спада воды

от генезиса, продолжительности и повторяемости наводнений

Первоочередные противопаводковые мероприятия

6

**До наводнения:**

- 1) инженерные (предупредительные): строительство плотин с водохранилищами противопаводкового и комплексного назначения, обвалование берегов рек – строительство вдоль берегов насыпей, валов или дамб; искусственных холмов для эвакуации населения, отводящих каналов, насосных станций для отвода максимального стока из реки в специальные водоемы-накопители или в естественные понижения в рельефе; проектирование шлюзов; проведение русло-выправительных работ; проведение на пойме земляных работ; создание в городских и промышленных зонах систем ливневой канализации и искусственных емкостей для принятия и последующего отвода максимального стока;
- 2) неинженерные: прогноз на базе гидрометеорологических данных, в случае опасности наводнения – задействование систем предупреждения и оповещения населения.

**Во время наводнения:**

- 1) инженерные: укрепление существующих плотин, наращивание их высоты, строительство временных дамб с помощью техники или людских ресурсов (из мешков с песком и др. материалов), подсыпка территории, использование мобильных насосных систем;
- 2) неинженерные: вывод населения из опасной зоны и организация эвакуационных пунктов, формирование местных вспомогательных бригад, с привлечением армейских подразделений, для строительных и гидротехнических работ по защите территории.

**До наводнения:**

- 1) инженерные: сооружение гидроузлов (каскадов); строительство заградительных плотин и дамб, русловыправительные работы; взламывание льда ледоколами; разделение ледяного покрова на карты с помощью ледорезных машин; ослабление льда путем зачернения порошкообразными материалами, воздействия на него химическими веществами и др.);
- 2) неинженерные: прогноз, предупреждение и оповещение.

**Во время наводнения:**

- 1) инженерные: укрепление и наращивание высоты существующих плотин, строительство временных дамб, для разрушения заторов осуществление взрывных работ (термитные смеси, бомбометание с самолетов, обстрел минометами и орудиями), использование ледоколов;
- 2) неинженерные: вывод населения, организация эвакуационных пунктов, формирование местных вспомогательных бригад

Научно-технический и производственный сборник

1	2	3	4	5
Зажоры	Закупорка поперечного сечения русла реки скоплениями рыхлого ледового материала в период ледостава поздней осенью и в начале (середине) зимы	1,5-2,0 месяца	Сезонные	Выход воды (ледового материала) на пойму с последующим замерзанием в холодный период года
Паводки прорывов	<p>Прорыв природных перемычек (плотин) при переполнении завальных, ледниковых и моренных озер, внутриледниковых водоемов, образующихся в результате деятельности ледников, землетрясений, схода снежных лавин, оползней и обвалов</p> <p>Повреждение или разрушение (прорыв) плотин и дамб в результате отказа водобросных устройств или недостаточной их пропускной способности, внутренней суффозии, фильтрации и др., а также при умышленном подрыве ГТС</p>	В зависимости от объема опорожняемого резервуара – в пределах суток	Спорадические	Внезапность, кратковременность, локальность, разрушительность – высокая скорость распространения паводковой волны



**До наводнения:**

- 1) инженерные: управление расходом воды ГЭС с целью недопущения в нижний бьеф гидроузла кромки ледостава и образования зажора в черте населенного пункта; строительство плотин, дамб обвалования;
- 2) неинженерные: прогноз, предупреждение и оповещение.

**Во время наводнения:**

- 1) инженерные: для разрушения зажоров осуществление взрывных работ, применение ледоколов, регулирование расходов воды (попусков) с ГЭС; укрепление, наращивание и строительство временных ГТС.
- 2) неинженерные: вывод населения, организация эвакуационных пунктов, формирование местных вспомогательных бригад.

**До наводнения:**

- 1) инженерные: капитальная мелиорация (предотвращение образования подпорного озера), аварийная мелиорация (ликвидация непосредственной угрозы прорыва водоема – искусственное регулирование уровня воды);
- 2) неинженерные: мониторинг, повышение уровня знаний об опасности данного вида наводнений, предупреждение и оповещение.

**Во время наводнения:**

- неинженерные: экстренная эвакуация населения.

**До наводнения:**

- 1) инженерные: контроль технического состояния ГТС (профилактические работы, замена оборудования и т.д.);
- 2) неинженерные: мониторинг, повышение уровня знаний об опасности данного вида наводнений, предупреждение и оповещение.

**Во время наводнения:**

- 1) инженерные: ликвидация аварийной ситуации в зависимости от ее характера;
- 2) неинженерные: вывод или экстренная эвакуация населения из опасной зоны.

1	2	3	4	5
Сели	Обводнение достаточного количества рыхлообломочного материала в горах при выпадении ливневых дождей, таяния снега, прорыве завальных, ледниковых и моренных озер, внутриледниковых водоемов, а также при разрушении плотин ГТС	1-3 часа, в отдельных случаях - 6 часов и более	Сезонные / Нерегулярные / Спорадические	внезапность, кратковременность, разрушительность - высокая скорость распространения селевой волны из смеси воды и рыхлообломочного материала; преимущественно в ночное время суток; застывание селевой массы в долинах после ее обезвоживания
Нагоны	<p>Действие сильного и продолжительного ветра со стороны акватории (моря, озера) и образованием нагона воды в устье реки или на низменное побережье озера (водохранилища)</p> <p>Действием сильного и продолжительного ветра со стороны моря (океана) и образованием нагона воды на низменное побережье</p>	От нескольких часов до несколько дней и более (в районах с плохим стоком)	Сезонные / Нерегулярные	Проникновение морских вод в глубь территории
Цунами	Подводные землетрясения, деятельность подводных вулканов, оползни на подводных склонах	От десятков минут до 2-3 часов и более (в районах с плохим стоком)	Спорадические	Самые быстрые и разрушительные (скорость волны до 1000 км/ч), с высотой водяного вала до 35 м и более

**До наводнения:**

1) инженерные: строительство аккумулирующих плотин с водосбросными и водопропускными устройствами, фильтрующих плотин, задерживающих твердый сток, сквозных плотин для задержки крупных камней; каскадов запруд или низконапорных плотин; лотков и селедуков; струенаправляющих дамб и берегозащитных стенок; водосбросных траншей и сифонных водосливов; подпорных стенок для укрепления откосов; нагорных стокоперехватывающих и водосбросных каналов;

2) неинженерные: мониторинг, повышение уровня знаний об опасности данного вида наводнений; предупреждение и оповещение.

**Во время наводнения:**

1) инженерные: по возможности возведение временных заградительных дамб (из мешков с песком, камней и т.д.);

2) неинженерные: экстренная эвакуация населения.

**До наводнения:**

1) инженерные: строительство заградительных плотин с открывающимися затворами для пропуска в нормальных условиях приливно-отливных течений, береговых дамб, искусственных дюн, подсыпка территории для повышения отметок местности, создание польдерных систем;

2) неинженерные: прогноз, предупреждение и оповещение.

**Во время наводнения:**

1) инженерные: строительство временных заградительных дамб (из мешков с песком, камней и т.д.), использование насосных станций в городских условиях для откачки воды во время штормов;

2) неинженерные: вывод населения, организация эвакуационных пунктов, формирование местных вспомогательных бригад.

**До наводнения (предупредительные):**

1) инженерные: строительство заградительных вдольбереговых сооружений (волнорезов, молов, насыпей, дамб), осуществление лесомелиоративных мероприятий на побережье;

2) неинженерные: мониторинг, создание систем предупреждения и оповещения, повышение уровня знаний об опасности данного вида наводнений.

**Во время наводнения:**

неинженерные: экстренная эвакуация населения, формирование спасательных бригад, организация эвакуационных пунктов.

6 июля 1902 г., когда при подвижке ледника Колка произошли два гигантских выброса водно-ледниковой массы, был разрушен курорт Кармадон. Следующая подвижка ледника Колка случилась в 1969 г., однако, тогда ледово-селевые явления не достигли большого размаха из-за малой обводненности ледника [7].

20 сентября 2002 г. произошла третья гляциальная катастрофа на леднике Колка. Водно-ледниковая масса объемом в 2,5 млн. м<sup>3</sup> поглотила одно из самых живописных мест Северной Осетии — Кармадонское ущелье. Селевыми потоками были полностью уничтожены нижняя часть селения Кармадон, нежилой корпус одноименного санатория, 2 базы отдыха, блокированы 5 населенных пунктов, оставшихся без электричества и газа. Из-за обильного таяния ледниковой массы в районе поселка Старая Саниба стало образовываться озеро, в результате чего 20 домов оказалось под водой. Избежать затопления других объектов, а также прорыва плотины озера удалось благодаря гидрологическим наблюдениям за уровнем воды и предпринятым инженерным мероприятиям по отводу талых вод из озера.

Это событие назвали ледниковой катастрофой мирового значения. Огромные массы перемещенного материала (130–140 млн. м<sup>3</sup>), высокая скорость движения, большое количество жертв: 18 погибших, 118 человек пропавших без вести. Разрушено 30 км автотрассы, в том числе 3 туннеля длиной 270 м, ЛЭП, скважины для подачи термальных вод, водозаборы и т.д. Толщина завала в сентябре 2002 г. доходила до 140 м (МЧС РФ, 2002).

После катастрофы специалисты отмечали, что обвал ледника Колка можно было предвидеть. Постоянное наблюдение таких ледников, космическая и аэрофотосъемка — это то, что должно быть, и то, что позволило бы предупредить трагедию. Однако исследовательские работы в районе Колки и других пульсирующих ледников на территории России уже несколько лет не ведутся, что и объясняет неожиданность случившейся трагедии и тяжелые социально-экономические потери.

В качестве превентивной меры на случай новых природных катаклизмов в Кармадонском ущелье было принято решение о создании зон отчуждения на потенциально опасных направлениях, где запрещается селиться и строить зоны отдыха.

В июле того же 2002 г. от сильных дождей и формирования череды селей в Тырныаузе (Кабардино-Балкария) были разрушены многоэтажные дома, мосты, дороги, система водоснабжения и другие объекты инфраструктуры. Город оказался изолирован,

что затруднило проведение спасательных работ. Самый тяжелый удар нанесла первая волна стихии продолжительностью около 5 часов, о которой жители города не были заранее предупреждены. Последующие селевые потоки довершили начатое дело — селезащитные устройства, нуждавшиеся в капитальной реконструкции, полностью разрушились под давлением селевых масс. По официальным данным погибли 8 чел. и 16 пропали без вести. Прогноз о последующих сходах селевых потоков позволил избежать новых человеческих жертв и уменьшить величину ущерба. Были эвакуированы 3604 чел.

Возможно образование селей и в результате смерчей на побережье морей. Так, 8 — 9 августа 2002 г. в районе Новороссийска на фоне сильных ливней с грозами в море образовались смерчи. Сотни тысяч кубометров воды были подхвачены смерчами и сброшены на город и прибрежные территории, вызвав кроме наводнения и селевые потоки, уносившие в море людей, строения, автомобили, деревья и др. Погибли люди, был причинен значительный материальный ущерб. Люди не были своевременно предупреждены о возможной опасности, не знали, как вести себя при прохождении селевого потока (вместо того, чтобы попытаться уйти выше по склонам гор, они укрывались в легких постройках в опасной зоне, прятались в автомобилях, которые с легкостью уносились в море селевым потоком). Последствия усугубились тем, что на побережье в связи с индивидуальной застройкой были ликвидированы противоселевые валы, «ухудшающие живописность» района.

К прямым причинам, приводящим к возникновению наводнений, относится разрушение дамб и плотин — техногенные паводки прорывов. Подобные катастрофы иногда наносят гораздо больший ущерб, чем наводнения, вызываемые природными причинами, в тех же географических условиях. Разрушения плотин, как правило, происходят внезапно, расходы воды могут достигать огромных величин, скорость паводочной волны настолько велика, что крайне трудно принимать защитные меры и вовремя провести эвакуацию населения. Однако даже при возможности своевременного оповещения люди, не имея особого представления какие последствия их ожидают, зачастую отказываются от предложения покинуть свои дома и перебраться в безопасные районы. Об этом свидетельствует башкирская трагедия, произошедшая в августе 1994 г. при прорыве плотины Тирлянского водохранилища в результате его переполнения. Летние проливные дожди, превысившие в 1,5–2,0 раза среднемесячную норму осадков, вызвали разлив ма-

лых рек республики, уровень в которых повысился на 1–1,5 м. Тирлянское водохранилище, расположенное в верховьях р. Белой в 40 км от г. Белорецка, приняло на себя основную массу воды из этих рек. Положение стало критическим к утру 7 августа, когда возникла угроза перелива воды через гребень плотины, так как спустить воду из водохранилища оказалось невозможно: не сработал механизм затвора, лопнули старые изношенные тросы. Жителям нижележащих поселков было предложено немедленно эвакуироваться; однако многие остались дома, не веря в серьезность опасности. Построенная в конце 40-х годов и давно неремонтировавшаяся плотина не выдержала напора воды и была смыта. Водяной поток объемом порядка 6 млн. м<sup>3</sup> обрушился на 4 населенных пункта и устремился вниз по реке к плотине в г. Белорецке. К этому моменту из Белорецкого пруда была максимально сброшена вода, и он смог вместить весь объем воды из Тирлянского водохранилища. Водой прорыва было снесено 140 частных домов, разрушены линии связи, узкоколейка между селками Тирлян и Белорецком, автодороги, затоплены три цеха Белорецкого металлургического комбината, полностью снесены продовольственные склады, залиты водой подстанции. По данным МЧС России погибли 15 чел., 66 человек пропали без вести. По предварительным оценкам ущерб от стихии, без учета оставшихся в 1994 г. 6 млрд. руб. [8].

Наряду с реализацией Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений» (1997 г.), который регулирует вопросы безопасности на всех стадиях существования ГТС, устанавливает права и обязанности между различными инстанциями с целью обеспечения безопасности сооружений, повышение уровня знаний населения о прорывных техногенных наводнениях и их последствиях — является не менее важным фактором для предотвращения или минимизации количества погибших во время бедствия.

В конце 2004 г. мировую общественность всколыхнули трагические известия о катастрофическом цунами в Юго-Восточной Азии. 26 декабря подводное землетрясение силой 8,9 балла по шкале Рихтера, произошедшее в Индийском океане, породило гигантские волны — цунами, обрушившиеся на побережье и вызвавшие наводнения в 12 странах мира. Как известно, цунами — одно из самых разрушительных по своим последствиям стихийных бедствий. Серьезные нарушения систем жизнеобеспечения населения были зафиксированы в прибрежных районах Индонезии.

зии, Шри-Ланки, Индии, Таиланда, Малайзии, Бангладеш, Мьянме и Мальдивских островов. В добавлении к этому, от цунами пострадали страны, находящиеся за тысячи километров от эпицентра: Танзания, Сомали, Кения и Сейшельские острова.

По разным сведениям возникло от 1 до 4 волн цунами, скорость которых была порядка 900 км/ч. Судя по следам разрушений, приблизительная высота цунами равнялась 2—3 м. Следует отметить, что тяжелые последствия, связанные с гибелью людей и разрушением построек, были связаны не столько с высотой волн, сколько со скоростью их распространения. Кроме того, основной удар стихии пришелся на прибрежную полосу шириной до одного километра, то есть на наиболее освоенную зону курортного бизнеса азиатских стран.

Общее число погибших во время цунами составило около 300 тыс. чел., тысячи людей пропали без вести, миллионы человек пострадали. Всего же от стихии пострадали или погибли граждане 40 государств, в числе которых туристы из Канады, Швеции, Швейцарии, Норвегии, Финляндии, Германии, России, Италии и других стран.

В первые же часы после цунами были начаты поисково-спасательные работы, трудность которых заключалась в расчистке многочисленных завалов, а также в составлении списков пропавших местных и приезжих людей. Одновременно с этим, начата организация медицинской и гуманитарной помощи пострадавшим (в том числе и при поддержке зарубежных стран), эвакуация из опасной зоны местного населения и иностранных граждан, приехавших на отдых.

Цунами разрушило жилые дома и отели, уничтожило инфраструктуру прибрежных районов. Масштабы разрушений столь велики, что в одних районах — наиболее богатых — восстановительные работы заняли до полугода, в других — наиболее бедных — до двух лет и более из-за отсутствия финансовых средств. Точных данных о прямых материальных потерях до сих пор нет. По имеющейся информации ущерб только по странам Юго-Восточной Азии оценивается от 14 до 20 млрд. долл.

Анализируя причины столь высокого социально-экономического ущерба, можно сказать, что главная из них заключается в отсутствии в Индийском океане системы раннего предупреждения. В настоящее время такая система существует лишь в Тихом океане, куда входят ряд стран, в том числе Россия, США и Япония. Кроме того, местное население и туристы не имели, по-видимому, никакого представления о первичных признаках цуна-

ми: 1) с приближением цунами уровень моря вдоль побережья несколько понижается, обнажая рифы и подводную часть пляжа, 2) наблюдается подъем воды в отлив или быстрое понижение уровня воды во время прилива, 3) на горизонте появляется быстро приближающийся водяной бор — волна цунами. Хотя в Индийском океане вероятность цунами по сравнению с Тихоокеанском районом гораздо ниже, местным властям стран Юго-Восточной Азии все-таки необходимо было сделать береговую зону отчуждения. После катастрофы, например, необходимые выводы для себя сделали власти Шри-Ланки, запретившие восстановление разрушенных домов и гостиниц, расположенных в 100-метровой прибрежной зоне.

### Выводы

1. Наводнения продолжают оставаться одними из наиболее опасных и разрушительных природных бедствий. Несмотря на осуществление противопаводковой защиты, социально-экономический ущерб от этого бедствия имеет тенденцию к увеличению.

2. Причины высоких социальных и экономических потерь кроются в степени готовности человека к опасности наводнений, а именно - в системе защитных мероприятий, целью которой является предотвращение или минимизация возможного ущерба.

3. Планирование и осуществление инженерных и неинженерных мероприятий должно проводиться с безусловным учетом генезиса наводнений, их продолжительности и повторяемости. Первоочередность тех или иных мер должна четко согласовываться со степенью опасности различных видов наводнений.

4. Наводнения, имеющие спорадическую природу и кратковременную продолжительность (ливневые дождевые паводки, паводки прорывов, сели и цунами) — представляют наибольшую угрозу и, следовательно, причиняют наибольший ущерб, поскольку их трудно спрогнозировать, а на принятие экстренных мер практически нет времени. Наименее опасны сезонные половодья, дождевые паводки, заторы, зажоры, а также нагоны. Данные типы наводнений имеют наиболее высокую оправданность прогнозов, знание которых позволяет заблаговременно осуществить необходимые организационные и технические мероприятия.

5. Для предотвращения или смягчения негативных последствий наводнений, в первую очередь, необходимо: 1) создание более разветвленной сети постоянного наблюдения за природными факторами и объектами в опасных районах; 2) повыше-



ние уровня знаний о наводнениях у постоянно и временно проживающего в паводкоопасном районе населения; 3) выработка действенной системы оповещения и защиты населения, среды обитания и хозяйства; 4) обоснование схем использования территорий «риска» с учетом затрат на реально возможную и эффективную их защиту.

6. Мероприятия по защите от наводнений должны осуществляться до бедствия, в период и после него. При этом дальнейшее развитие должно получить страхование с учетом данных Государственного кадастра паводкоопасных территорий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян А.Б., Истомина М.Н. Природные и антропогенные причины наводнений // Информационный сборник. М.: ЦСИ ГЗ МЧС России. 2001. № 8.
2. Global Register of Large River Flood Events. Dartmouth Flood Observatory Department of Geography, Dartmouth College. Hanover NH 03755 USA. <http://www.dartmouth.edu/~floods/>
3. Сообщения пресс-службы МЧС России. Министерства РФ по делам Гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям, и ликвидации последствий стихийных бедствий. <http://www.mchs.gov.ru>.
4. Авакян А.Б., Полошкин А.А. Наводнения. Подписная научно-популярная сер. «Науки о Земле». М.: Знание. 1989. № 7.
5. Асарин А.Е. Проблемы наводнений при эксплуатации водохранилищ на Волге и Каме // Гидротехническое строительство. 2001. № 4.
6. Мандыч А.Ф. Наводнения и их типы // Известия АН. Сер. Географическая. 2002. № 2.
7. Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л.: Гидрометеиздат. 1977.
8. Барабанова Е.А. Причины повреждения плотин гидроузлов как фактор риска и их последствия для населения // Известия АН. Серия географическая. 1994. № 6.

## РЫБОЗАЩИТНОЕ СООРУЖЕНИЕ ВОДОЗАБОРА КРАСНОЯРСКОЙ ГРЭС-2

*Мажбиц Г.Л., кандидат техн. наук, Халаджиев В.П., Крапивина В.И.,  
инженеры ОАО «НИИЭС»*

Источником технического водоснабжения Красноярской ГРЭС-2 является река Кан — правый приток Енисея, относящаяся к водоемам первой категории рыбохозяйственного значения. Водозабор ГРЭС расположен в зоне подпора реки плотиной низконапорной ГЭС. Колебания уровня воды составляют менее 0,15 м, в периоды паводков — 0,2 м. Основные сооружения водозабора: подводный канал, здание вращающихся сеток типа ТН-3000 для механической очистки воды, центральная и три блочные насосные станции. Вход в подводный канал длиной 932 м и шириной по дну 6 м расположен в 1,65 км выше плотины ГЭС. В прибрежной зоне канала перед зданием вращающихся сеток широко развита мягкая подводная растительность, где в весенне-летний период, при отсутствии или низких скоростях течения воды, может происходить нерест и нагул частичковых рыб. Максимальный расход водозабора 50 м<sup>3</sup>/с.

При выборе типа и конструктивно-компоновочного решения рыбозащитного сооружения (РЗС) учитывались гидрологические условия района водозабора, в значительной степени определяющие закономерности попадания в водозабор молоди рыб.

За счет практически постоянного уровня режима водохранилища скорости течения в водохранилище практически линейно связаны с расходом реки. Скорости течения в подводном канале напрямую зависят от масштаба водопотребления, который целиком определяется востребованностью производимой электроэнергии. Отметим, что в последнее десятилетие объем водопотребления по сравнению с началом 90-х годов уменьшился практически в 3 раза.

В водозабор попадает молодь рыб всех стадий развития, начиная с личинок. Вертикальное распределение покатников в районе водозабора имеет следующий характер: 55% покатников снуются в толще, 27% — в поверхностном слое и 18% — у дна. Массово гибнущими на сетках видами являются: елец, плотва, окунь и ерш. Основной ущерб наносится гибелью сеголетков этих видов, доля которых на сетках составляет до 96% от общего количества молоди, попадающей в водозабор.

Исходя из перечисленных особенностей, были сформулированы основные требования к рыбозащитному сооружению\* :

РЗС должно препятствовать попаданию в водозабор покатников всех размерно-возрастных групп и горизонтов воды;

РЗС должно создавать условия для отведения молоди рыб от водозабора. Место размещения РЗС должно быть выбрано с учетом организации оптимальных условий для принудительного отведения молоди;

конструкция РЗС должна учитывать, что при максимальной производительности  $50 \text{ м}^3/\text{с}$  реальное водопотребление в отдельные периоды может быть на порядок меньше;

параметры РЗС должны удовлетворять единым требованиям, установленным СНиП 2.06.07-87 [1] и практикой проектирования.

Опыт многолетних исследований, проведенных Волгоградским филиалом ОАО «НИИЭС» в натуральных условиях, в том числе и на действующих крупных промышленных и энергетических водозаборах, показывает, что наиболее успешно и надежно поставленные задачи можно решить применением комплексного рыбозащитного сооружения, включающего несколько типов устройств и сочетающего различные способы и принципы защиты рыб.

Одним из таких сооружений, позволяющих реализовать поведенческий и физический принципы защиты для молоди всех видов и стадий развития рыб, является рыбозащитное сооружение типа ЖЭГС — жалюзийный экран, омываемый гидроструями [2, 3]. Конструктивно ЖЭГС представляет собой комбинацию двух видов экранов: жалюзийного и гидравлического. Механизм управления поведением молоди рыб у жалюзи связан с реакцией рыб на турбулентные возмущения, формируемые экраном [4, 5]. Эта реакция имеет комплексный характер, включая органы зрения, боковой линии и слуха. При этом эффективность задержания молоди рыб проницаемой преградой зависит от интенсивности турбулентных возмущений перед жалюзийным экраном и распределения скоростей течения между пластинами по его фронту. Жалюзийные экраны создают для молоди рыб иллюзию непроницаемой преграды, действие гидроструй обеспечивает сносящие для молоди рыб скорости течения вдоль водопропускного экрана и тем самым — отведение молоди рыб за пределы влияния экрана без специальных рыбоотводящих трактов.

РЗС типа ЖЭГС были внесены в перечень рыбозащитных устройств, рекомендуемых СНиП 2.06.07-87 к применению на водозаборах страны (письмо ФГУ ЦУРЭН 03-2/487 от 25.11.98г.) по

результатам межведомственных натуральных испытаний в условиях р. Урал. Эффективность их работы с учетом выживаемости отведенной молоди рыб оценена в 80-90% для ценных промысловых видов рыб размерами 5 – 40 см [6].

При проектировании РЗС типа ЖЭГС для водозабора Красноярской ГРЭС-2 особое внимание было уделено:

равномерности распределения скоростей перетекания воды через жалюзийный экрана;

снижению расхода воды на гидрообмыв экрана при обеспечении необходимых сносящих скоростей для молоди рыб в конце экрана.

Равномерное поступление воды по площади жалюзийного экрана обеспечивается особой конструкцией водоприемных камер. Конфигурация их в плане и размеры отрабатывались в лабораторных условиях на гидравлических моделях ОАО «НИИЭС» в г. Волгограде.

Расход воды на гидрообмыв экрана и его рыбозащитная эффективность зависят от величины скорости гидроструи в конце жалюзийного экрана, длины и высоты экрана, а также картины транзитного течения. Гидравлическая струя должна обеспечивать сносящие скорости в конце экрана для молоди рыб защищаемого размера.

С учетом скорости транзитного потока для РЗС водозабора Красноярской ГРЭС-2 максимальный расход струепродуктора снижен до 2% от расхода водозабора при сносящих скоростях в конце жалюзийного экрана 0,5 м/с.

Условия отведения молоди рыб от водозабора наилучшим образом создаются при размещении РЗС на входе в подводящий канал. Компоновка жалюзийного экрана отдельными ступенями — модулями — со смещением каждой последующей в сторону берега на 1,0 м обеспечивает для каждой ступени нормативно установленную длину водопропускного экрана (не более 25 м).

Конструкция РЗС состоит из шести автономных модулей для эксплуатации в большом диапазоне расходов водозабора. Пропускная способность каждого модуля 5,9 – 8,3 м<sup>3</sup>/с. Это позволяет увеличить надежность и экономичность работы РЗС при различных режимах отбора воды из реки, дает возможность проведения профилактических работ по очистке водопропускного экрана, не оставляя водозабор без рыбозащиты. РЗС рассчитано на максимальный пропуск 50 м<sup>3</sup>/с воды при средней скорости в жалюзийном экране 0,14 м/с. При реальном водопотреблении 6 – 35 м<sup>3</sup>/с эти скорости не превышают 0,1 м/с. При пониженных расходах водопотребления РЗС может работать меньшим количеством модулей. Проектом предусмотрена возмож-

ность перекрытия выходных отверстий водоприемных камер и отключения струепродуктора любого модуля.

Рыбозащитное сооружение общей длиной 260 м состоит из (рис. 1):

мостового перехода — металлической эстакады на свайных опорах

шести автономных рыбозащитных модулей с жалюзийными водопропускными экранами

направляющих и сопрягающих с берегом стенок и дамб

системы гидравлического омывания жалюзийного экрана

судоходного проема.

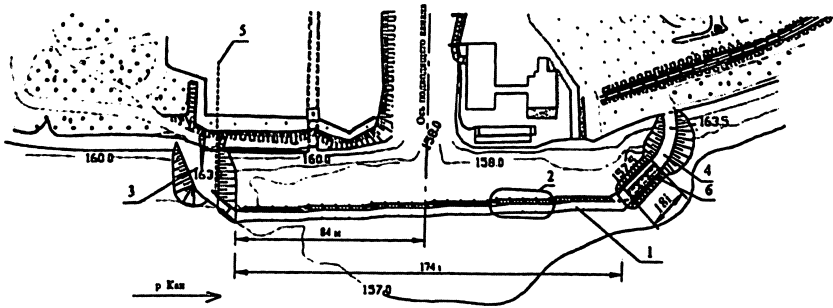


Рис. 1. План РЗС

1 — мостовая эстакада; 2 — рыбозащитный модуль (рис. 2); 3 — верхнее сопряжение; 4 — низовое сопряжение; 5 — трубопровод от насосной станции; 6 — судоходный проем

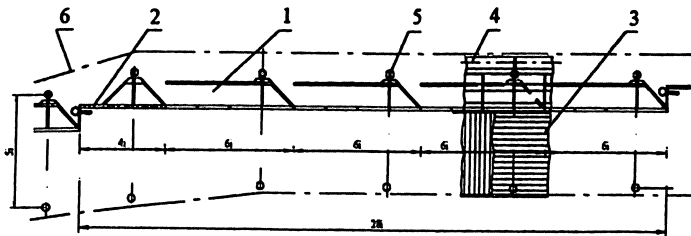


Рис. 2. Рыбозащитный модуль

1 — водоприемная камера; 2 — стенка направляющая;  
3 — настил; 4 — трубопровод струепродуктора;  
5 — свая; 6 — граница эстакады

Для обслуживания съемных элементов РЗС — жалюзийных и глухих секций, задвижек, трубопроводов и пр. — предусматривается автомобильный кран КС-2561 грузоподъемностью до 6,3 т, передвигающийся по настилу эстакады (рис. 3а).

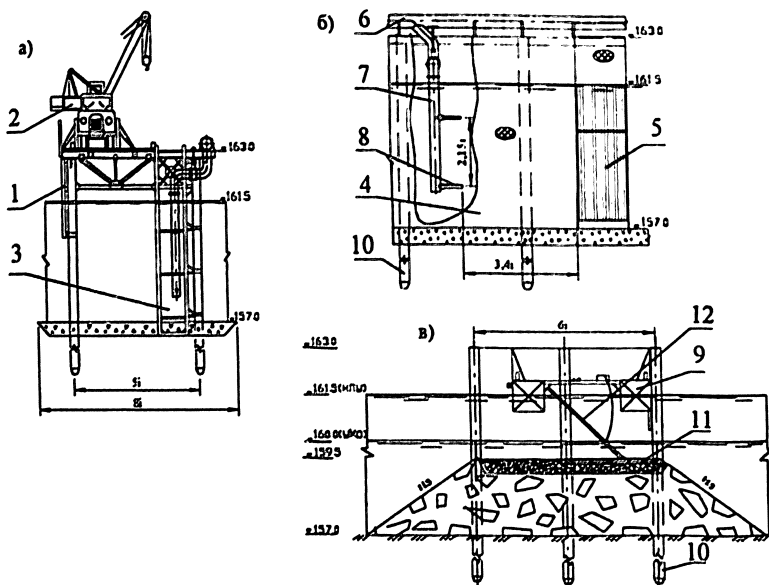


Рис. 3. Разрезы: а) поперечный разрез эстакады РЗС; б) вид на струепродуктор; в) поперечный разрез судоходного проема.

1 — забральная стенка; 2 — автокран; 3 — камера водоприемная; 4 — стенка направляющая; 5 — секция жалюзийная; 6 — трубопровод струепродуктора; 7 — стояк; 8 — насадок; 9 — понтон; 10 — свая; 11 — плита ж/б

Элементами рыбозащитной части сооружения на мостовой эстакаде являются: забральная стенка, рыбозащитные модули, трубопроводы и арматура.

Забральная стенка защищает элементы металлоконструкции эстакады от ледовых нагрузок, предотвращает попадание крупного плавающего мусора в жалюзийный экран и выполняет роль дополнительного рыбозащитного элемента, предотвращающего попадание молоди рыб, скатывающейся в верхнем горизонте воды.

Система струепродукторов предназначена для создания высоко турбулентных гидравлических струй, взаимодействующих с жалюзийным экраном, и отведения молоди рыб и подплывающего мусора вниз по течению [7]. В зимний период гидроструя дополнительно обеспечивает незамерзающую майну. Система включает источник подачи воды, струепродукторы, трубопроводы, регулирующие задвижки и контрольно-измерительную аппаратуру. Струепродукторы могут работать от существующей напорной сети, от отдельной насосной станции или от погружных насосов, устанавливаемых для каждого струепродуктора. В разра-

ботанном проекте предусмотрена отдельная насосная станция в подводящем канале.

Судходный проем располагается между концом эстакады и низовой сопрягающей дамбой, предназначен для пропуска дноуглубительной техники (земснаряда, водолазного бота и др. плавсредств) с целью периодической расчистки акватории за РЗС и подводящего канала от иловых отложений. Конструкция устройства (рис. 3в) обеспечивает перекрытие проема при всех возможных уровнях воды.

В составе РЗС также запроектировано соответствующее энергохозяйство.

Основные показатели рыбозащитного сооружения приведены в таблице.

**Основные параметры РЗС**

*Таблица*

№ п/п	Наименование параметров	Ед. изм.	Кол-во
1	Класс капитальности		III
2	Максимальная производительность водозабора	м <sup>3</sup> /с	50,0
3	Скорость на входе в жалюзи	м/с	0,14
4	Общая длина сооружения с сопрягающими дамбами	м	260
5	Количество рыбозащитных модулей	шт	6
6	Габариты рыбозащитного модуля:		
	длина	м	28,0
	ширина	м	1,2
	высота	м	6,0
7	Высота порога	м	0,2
8	Размеры жалюзийного экрана модуля		
	длина	м	24
	высота	м	4,3
9	Расход воды на систему струепроductоров	м <sup>3</sup> /с	1,0
10	Количество струепроductоров	шт.	6
11	Напор, не более	м	20
12	Скорость истечения из насадка	м/с	10
13	Скорость гидросмыва в конце жалюзийного экрана с учетом транзитного течения	м/с	0,4-0,5
14	Ширина судходного проема	м	17,4
15	Грузоподъемное устройство	Автокран КС-2561	
16	Рыбозащитная эффективность РЗС, не менее	%	70

Срок строительства РЭС – 3 года – определен исходя из объема трудозатрат и объемов работ основных механизмов.

Удельная стоимость строительства РЭС составляет (без стоимости автономной насосной станции) 5,9 тыс. долл. США на 1 м<sup>3</sup>/с.

Обоснования инвестиций в строительство РЭС (ОБИН) и рабочий проект прошли все необходимые экспертизы.

\* В ходе разработки проекта рыбозащиты рассматривалась ее альтернатива – комплекс компенсационных мероприятий. Компенсировать наносимый ущерб предполагалось зарыблением реки Кан сначала мальками карпа, выращиваемого на базе подсобного рыбоводного хозяйства ГРЭС, а через два года – мальками ценных осетровых видов. По сопоставительной оценке экономической эффективности, выполненной на уровне предпроектной проработки, более целесообразным было бы осуществление компенсации наносимого ущерба, а не строительства РЭС. Органами надзора компенсационный вариант рыбоохранных мероприятий был отклонен, как противоречащий российскому законодательству, в соответствии с которым эксплуатация водозаборов без рыбозащиты не допускается [8].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Строительные нормы и правила.** Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. СНиП 2.06.07-87. М.: Стройиздат, 1987.
2. **Патент РФ на изобретение 1474211 «Устройство для защиты и отведения рыб от водозаборного сооружения».** 1989.
3. **Мажниц Г.Л., Крапивина В.И., Халаджиев В.П., Шпак Л.М.** Опыт разработки рыбозащитных устройств и сооружений для энергетических и промышленных водозаборов. //«Безопасность энергетических сооружений». М.: ОАО «НИИЭС». Вып.12.2003.
4. **Павлов Д.С., Тюрюков С.Н.** О применении гидродинамических стимулов для защиты молоди рыб от попадания в водозаборные сооружения. //Экспериментальные и полевые исследования поведения и распределения рыб. М.: Изд. ИЭМЭЖ АН СССР. 1989.
5. **Павлов Д.С., Тюрюков С.Н.** Использование проницаемых заграждений для защиты ранней молоди рыб от попадания в водозаборные сооружения. //Рыбоохр. сооруж. энергет. объектов. Сборник научных трудов Гидропроекта. М., Вып.147. 1991.
6. **Мажниц Г.Л., Крапивина В.И.** Результаты испытаний эффективности рыбозащитных сооружений и устройств, разработанных ОАО «НИИЭС» //В печати. «Безопасность энергетических сооружений». М.: ОАО «НИИЭС». Вып.16.2006.
7. **Патент РФ на изобретение 1011245 «Способ защиты молоди рыб от попадания в водозаборное сооружение».**
8. **Водный кодекс Российской Федерации, 167-ФЗ от 16.10.1995.**



## ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

*Григорьева И.Л., кандидат геогр. наук,  
(Иваньковская научно-исследовательская станция  
Института водных проблем РАН, г. Коонаково)*

Водоохранилища — это особый класс водных объектов, которые с одной стороны управляются человеком, а с другой испытывают сильное влияние природных, прежде всего гидрометеорологических факторов.

Создание водоохранилищ сопровождается рядом как заранее запланированных благоприятных, так и негативных, неблагоприятных последствий. К последним относятся: подтопление и заболачивание прилегающих территорий, эрозийные процессы в береговой зоне, эвтрофикация водоема, изменение качества воды исходного водного объекта и т. д.

Предотвратить или уменьшить негативное взаимовлияние водоема и водосбора возможно путем установления специальных режимов природопользования в водоохранной зоне.

Под водоохранной зоной (ВЗ) понимается часть водосборной площади водоема или водотока, непосредственно примыкающая к водному объекту. Назначение ВЗ состоит в задержании и трансформации составляющими ее природными комплексами загрязнений, поступающих с водосбора, с тем, чтобы участки, близкие к урезу воды, не оказывали негативного влияния на ее качество и, тем самым, на условия жизни гидробионтов.

До настоящего времени в основу выделения водоохранных зон был положен геометрический принцип. По нашему мнению, методика определения границ ВЗ должна базироваться на оценке природной устойчивости ландшафтов, их резистентной способности, адсорбционной емкости входящих в экосистему компонентов. Границы ВЗ могут быть непостоянными и зависеть от разнообразия и мозаичности расположения природных комплексов, вследствие чего ширина ВЗ может меняться. При уже сложившейся ситуации на водосборе максимум усилий при использовании ВЗ или при выделении ее части под заповедные зоны или зоны строго ограниченного природопользования должен направляться на оздоровление или улучшение качества среды в ее пределах. При осуществлении районных планировок следует максимально исключить территории ВЗ из хозяйствен-

ного использования, либо разрешать экологически безопасные виды природопользования при условии соблюдения пользователями норм допустимых нагрузок [5].

Под допустимыми нагрузками понимается такая суммарная нагрузка (при учете всех развитых здесь видах хозяйственного использования), при которой система не выводится из равновесия и не теряет способности к самовосстановлению и самоочищению. При соблюдении допустимых нагрузок все компоненты, входящие в систему «берег — водоем», не теряют своей резистентной устойчивости и сохраняют все свои первоначальные свойства или восстанавливают их за непродолжительный период.

Как показали отечественные и зарубежные исследования, даже такой вид природопользования, как рекреация, оказывает порой весьма существенное негативное воздействие на состояние прибрежных природно-территориальных комплексов, на восстановление которых (по видовому составу и объему биомассы) требуется от четырех до шести лет [5].

Для водохранилищ питьевого и рыбохозяйственного использования, каковым является Иваньковское водохранилище, одной из главных задач при выделении водоохранной зоны является сохранение допустимого качества воды.

На качество природных вод влияют природно-естественные и антропогенные факторы. К первым относят условия формирования поверхностного или подземного водного стока, разнообразные природные явления, накопление в замыкающем створе органического вещества в результате отмирания растительных и животных организмов; к антропогенному фактору — природопреобразующую деятельность людей [1].

Иваньковское водохранилище, являясь водоемом комплексного использования, обеспечивает водоснабжение г. Москвы на 60%.

Водоохранилище создано в 1937 г. на р. Волге. Объем водной чаши водохранилища — 1,12 км<sup>3</sup>, площадь водного зеркала — 327 км<sup>2</sup>. Площадь водосборного бассейна водохранилища составляет 41000 км<sup>2</sup> и расположена большей частью на территории Тверской области.

Водосборный бассейн водоема в настоящее время значительно освоен: здесь расположено 17 административных районов и 18 городов. Основу промышленного производства составляет легкая, машиностроительная, химическая промышленность, энергетика, также развиты пищевая, целлюлозно-бумажная, деревообрабатывающая промышленность и др. Энергетическая промышленность

региона представлена Конаковской ГРЭС и тремя ТЭЦ, расположенными в г. Твери. Всего в бассейне находится более 300 промышленных предприятий. В водные объекты сточные воды сбрасывают 85 предприятий, остальные неочищенные стоки направляют на городские станции очистки.

Суммарный забор воды из природных источников в Тверской области в 2004 г. составил 1282,98 млн. м<sup>3</sup>, а общий объем водоотведения — 1195,45 млн. м<sup>3</sup>, 1182,09 млн. м<sup>3</sup> из которых сброшено в поверхностные водные объекты. Непосредственно в береговой зоне Ивановского водохранилища в настоящее время расположено 16 выпусков сточных вод.

Спад промышленного и сельскохозяйственного производства на водосборе водохранилища в начале 90-х годов прошлого века не привел к улучшению качества воды водоема, в связи с такими негативными процессами в его ВЗ, как: ее хаотическое освоение и застройка, застройка островов, образование свалок мусора и сброс мусора непосредственно в воду, прокладка автодорог и инженерных коммуникаций, уничтожение лесов прибрежной зоны.

Интенсивное освоение ВЗ привело к сокращению боковой приточности в водохранилище, к деградации и уничтожению лесных биоценозов, поступлению коммунально-бытовых сточных вод непосредственно в водоем, загрязнению поверхностных и грунтовых вод и, как следствие, к ухудшению качества воды Ивановского водохранилища по ряду показателей: фосфаты, нитраты, нитриты, ион аммония, нефтепродукты.

Иваньковское водохранилище является хорошо изученным водоемом. Детальные исследования химического состава воды водоема начаты в 50-х годах Рыбинской ГМО на двух створах (Калинин и Дубна) и продолжены с 1964 г. на четырех створах (Калинин, Безбородово, Конаково, Дубна). С конца 50-х годов исследования на водоеме проводились сотрудниками Института биологии внутренних вод РАН, с середины 70-х по настоящее время сотрудниками Института водных проблем РАН. В начале 70-х годов Гидропроектом им. Жука проводились исследования по технико-экономическому обоснованию состояния Ивановского водохранилища. В течение ряда лет наблюдения за качеством воды водоема ведутся такими организациями, как Государственное Федеральное унитарное предприятие по эксплуатации Ивановского водохранилища «Центрводхоз», Дубнинская экоаналитическая лаборатория ФГВУ «Центррегионводхоз» и другие.

Общими недостатками этих исследований являются: разная периодичность отбора проб воды; отсутствие единых створов наблюдений, ограниченный показатель определяемых ингредиентов в воде, при менение разных методики определения химического состава воды.

Как правило, практически отсутствуют наблюдения в половодный период, когда большой объем загрязняющих веществ поступает в водоем с талым стоком с водосборного бассейна.

Из-за слабой оснащенности химлабораторий не определяются такие токсичные вещества как бензапирен, хлорорганические соединения, пестициды, диоксин и другие, хотя единичные исследования указывают на их присутствие в воде.

Анализ результатов химического анализа проб воды р. Волги и Ивановского водохранилища за 2002 – 2004 гг., выполненного в Дубнинской аналитической лаборатории, показал, что превышение ПДК для водоемов рыбохозяйственного использования наблюдается для таких показателей как железо общее, марганец и нефтепродукты (табл. 1).

Сравнительный анализ проводился для трех лет различной водности: 2002 (маловодный), 2003 (близкий к среднему многолетнему) и 2004 (многоводный). Объем притока воды в водохранилище в 2002 г. составил 6400 млн. м<sup>3</sup>, в 2003 г. — 10130 млн. м<sup>3</sup> и в 2004 г. 13700 млн. м<sup>3</sup>. Количество выпавших осадков было минимальным в 2002 году, а максимальным в 2004 г. (табл. 2).

Таблица 1  
Сезонные и годовые суммы осадков (мм), метеостанция Тверь

	2002 г.	2003 г.	2004 г.
Зима	117	94	197
Весна	76	134	103
Лето	81	280	357
Осень	177	239	232
Год	451	747	889

Железо является одним из важнейших биогенных элементов и влияет на интенсивность развития фитопланктона и качественный состав микрофлоры в водоеме.

Основными источниками соединений железа в поверхностных водах являются процессы химического выветривания горных пород, сопровождающиеся их механическим разрушением и растворением, а также поступление с подземным стоком и сточны-

Среднегодовые концентрации (доли ПДК) приоритетных ЗВ в воде  
Иваньковского водохранилища в 2002 – 2004 гг

Год	Створ наблюдений					
	Тверь	Городня	Безбо- родово	Карача- рово	Конако- во	Дубна
ион-аммония						
2002	0,3	2,5	2,2	2,3	2	2
2003	0,7	2	2,7	2,5	3,2	3
2004	0,4	3,3	4,5	4,1	3,6	3,1
фосфат-ион						
2002	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
2003	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
2004	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Нефтепродукты						
2002	2,4	2,2	3,2	1,4	1,8	1,4
2003	4,4	3,4	2,4	3,2	6,4	4,4
2004	2,4	3,6	2,2	2	2,4	1,4
железо общее						
2002	2	2,1	2,4	2,5	1,7	1,2
2003	1,8	1,6	1,4	1,5	1,6	1,2
2004	4,2	4,4	3	8	5,4	2,9
Марганец						
2002	7	8	7	7	6,5	7,5
2003	9	10	11	9	8	11
2004	10	10	20	12	12	12
БПК <sub>5</sub>						
2002	1,4	1,5	1,9	2	0,8	0,7
2003	0,	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6
2004	0,8	0,6	0,8	1,3	0,6	1

ми водами предприятий металлургической, металлообрабатывающей, текстильной, лакокрасочной промышленности и сельскохозяйственными стоками. Повышенное содержание железа наблюдается в болотных водах.

Высокие концентрации железа общего (1,2 – 10 ПДК) в воде Иваньковского водохранилища и его притоков определяются, прежде всего, значительной заболоченностью и сельскохозяйственной освоенностью их водосборных бассейнов.

В природные воды марганец поступает в результате выщелачивания железомарганцевых руд и других минералов, содержащих марганец. Значительные количества поступают в процессе разло-

жения остатков водных животных и растительных организмов, особенно синезеленых, диатомовых водорослей и высших водных растений. Для Ивановского водохранилища среднегодовые концентрации марганца изменяются в диапазоне от 6,5 до 20 ПДК или от 0,065 до 0,20 мг/л. Такие высокие концентрации марганца объясняются, по-видимому, поступлением его при разложении растительных остатков как в самом водоеме, так и в его притоках, а также высокими концентрациями марганца в болотных водах, поступающих с водосбора.

Исследования показали, что водность периода играет существенную роль в формировании качества воды водоема. В годы повышенной водности среднегодовые концентрации иона аммония (табл. 2) во всех створах наблюдений в 1,5 – 2 раза были выше, чем в маловодном 2002 г.

В более многоводные годы значительно возрастают в воде водохранилища и его притоков концентрации железа общего и марганца, что связано с увеличением роли болотных вод в питании Волги и Ивановского водохранилища в эти годы.

Прямой корреляции между водностью года и концентрациями нефтепродуктов в воде водоема не выявлено.

Среднегодовые концентрации фосфат-иона во всех створах наблюдений практически одинаковы и колеблются в интервале 0,2 – 0,4 ПДК.

Содержание легко окисляемой органики в воде водохранилища увеличивается в маловодные годы.

В 2004 г. максимальная концентрация железа общего наблюдалась в июле в створе Конаково и составила 10 ПДК. Максимальная концентрация марганца была зафиксирована в створе Безбородово в марте и составила 52 ПДК. Максимальные концентрации нефтепродуктов наблюдались в конце января и в конце февраля в створе Городня (9 ПДК). Концентрации иона аммония, превышающие ПДК, отмечены в створах Конаково и Карачарово (1,1 – 1,4 ПДК) в апреле месяце.

Наибольшая цветность воды в воде водохранилища наблюдается, как правило, в период весенних и осенних паводков.

Неблагоприятный кислородный режим в водоеме наблюдается в зимний период в Шошинском плесе. В створе Безбородово даже в поверхностном слое в феврале 2003 и 2004 гг. были зафиксированы концентрации менее 4 мг/л.

Оценка качества воды по индексу ИЗВ показала, что в маловодный 2002 г. во всех створах наблюдений качество воды Ивань-

**Безопасность энергетических сооружений**

ковского водохранилища соответствовало III классу («умеренно-загрязненная»). Это объясняется более низкими концентрациями железа общего и марганца в воде водоема в 2002 г., чем в более многоводные 2003 и 2004 гг. (табл. 2). В эти два года качество воды соответствовало IV классу («загрязненная»).

Исследования 2002 – 2004 гг. показали, что качество воды Ивановского водохранилища определяется как природными, так и антропогенными факторами и имеет как межгодовую, так и межсезонную изменчивость. В зависимости от водности периода изменяются значения таких показателей как цветность, перманганатная окисляемость, железо общее, марганец, нитрит- и нитрат-ион, фосфат-ион, а также ион аммония.

Значительная сельскохозяйственная освоенность водосбора обусловила высокое содержание в воде водохранилища азота и фосфора. Среди минеральных форм азота преобладают нитраты, минеральный фосфор составляет значительную долю от общего фосфора.

В табл. 3 приведены концентрации биогенных элементов в воде Ивановского водохранилища в период вегетации в 1980 – 1990 гг. и в 2001 – 2003 гг. В последние годы в Волжском плесе отмечается увеличение концентраций иона аммония и нитрит-иона и максимальных концентраций фосфат-иона.

Таблица 3

**Содержание биогенных элементов в Ивановском водохранилище в период вегетации (май – октябрь):  
I – 1980-1990 гг., по [9]; II – 2001 – 2003 гг., по [3]**

	$\text{NH}_4^+$ , мг/л	$\text{NO}_2^-$ , мгN/л	$\text{NO}_3^-$ , мгN/л	$\text{PO}_4^{3-}$ , мкгP/л	Si, мг/л	$\text{Fe}_{\text{общ.}}$ , мг/л
<b>Волжский плес</b>						
I	<u>0,03-0,52</u> 0,20	<u>0,001-0,017</u> 0,09	<u>0,27-1,40</u> 0,55	<u>24-150</u> 69	<u>0,1-2,2</u> 1,42	<u>0,3-1,25</u> 0,54
II	<u>0,02-0,85</u> 0,24	<u>0,003-0,027</u> 0,010	<u>0,023-0,91</u> 0,30	<u>16-166</u> 52	<u>0,1-1,9</u> 0,7	<u>0,1-1,4</u> 0,26
<b>Шошинский плес</b>						
I	<u>0,01-0,16</u> 0,08	<u>0,001-0,030</u> 0,009	<u>0,01-0,60</u> 0,26	<u>10-49</u> 36	<u>0,2-2,5</u> 1,2	<u>0,31-0,87</u> 0,48
II	<u>0,09-0,62</u> 0,28	<u>0,002-0,018</u> 0,007	<u>0,02-0,54</u> 0,21	<u>16-176</u> 55	<u>0,1-2,5</u> 1,1	<u>0,1-0,7</u> 0,3
<b>Иваньковский плес</b>						
I	<u>0,01-0,29</u> 0,16	<u>0,003-0,025</u> 0,009	<u>0,16-1,22</u> 0,55	<u>29-87</u> 49	<u>0,1-3,0</u> 1,5	<u>0,19-0,82</u> 0,49
II	<u>0,025-0,39</u> 0,19	<u>0,02-0,019</u> 0,007	<u>0,002-0,77</u> 0,30	<u>16-156</u> 42	<u>0,4-1,0</u> 0,6	<u>0,1-1,5</u> 0,35

В Шошинском плесе также отмечается существенное увеличение концентраций иона аммония и фосфат-иона, в Ивановском плесе наблюдается увеличение концентраций иона аммония.

В последние десять лет наблюдается нарастание среднегодовых концентраций в замыкающем створе нитритного (от 0,013 в 1995 г. до 0,029 мг/л в 2004 г) и нитратного азота (от 1,36 мг/л в 1995 г. до 2,25 мг/л в 2004 г.), что указывает на увеличение биогенной нагрузки на водоем.

Увеличение поступления загрязняющих веществ в водоем привело к интенсификации цветения водоема, особенно в жаркие периоды и зарастанию и заболачиванию мелководий и заливов. В настоящее время площадь заросших мелководий составляет 27,5% от площади водного зеркала водохранилища.

По мнению авторов [8] в Ивановском водохранилище наблюдается усиление темпов новообразования органического вещества, основного признака эвтрофирования водоема. В последние годы изменчивость показателей продуктивности фитопланктона оставалась в пределах межгодовых колебаний, и увеличение годовой продукции органического вещества было обусловлено нарастанием биомассы высших растений.

Оценка качества воды Ивановского водохранилища по комплексу гидрохимических и гидробиологических показателей в годы различной водности [6] свидетельствует о неблагоприятном экологическом состоянии водоема. Повышение обилия микротрофов (криptomonад, золотистых и синезеленых водорослей) подтверждают выводы авторов [9] о продолжающемся нарастании содержания легкоусвояемого органического вещества в воде водоема и особенно в Шошинском плесе. В соответствии с концепцией экологических модификаций, состояние сообществ фитопланктона указывает на наличие экологического напряжения с элементами метаболического прогресса в прибрежных частях Ивановского водохранилища, что может быть вызвано увеличивающейся эвтрофикацией [6].

Нерациональное природопользование в водоохраных зонах водохранилищ приводит к ухудшению качества грунтовых вод (ГВ). Наиболее мощным источником загрязнения ГВ прибрежной территории Ивановского водохранилища являются животноводческие хозяйства. Прежде всего, крупные животноводческие комплексы и птицефермы. Загрязнение ГВ происходит в радиусе до 5 км, а основными загрязняющими веществами являются органические вещества, нитратный и аммонийный азот,



тяжелые металлы. Значения перманганатной окисляемости в ГВ могут повышаться до 40 мгО/л, а концентрации нитратного азота до 200 мг/л [4].

Другим источником загрязнения ГВ, разгружающихся в водохранилище, являются садово-огородные участки, которые нередко расположены в водоохранной зоне и даже у уреза воды. Многолетние исследования качества грунтовых вод в водоохранной зоне Ивановского водохранилища показали, что идет неуклонное нарастание загрязнения грунтовых вод биогенами и сульфатами [4, 5]. Например, в 40% из обследованных водопунктов концентрации нитратного азота превышали ПДК (10 мгN/л).

Высокие антропогенные нагрузки по различным видам природопользования на ряде участков уже в настоящее время привели к развитию процессов дигрессии природных комплексов водосборного бассейна водохранилища. Уникальность береговых и аквальных комплексов водохранилища, их защитные функции, способность к самовосстановлению и самоочищению могут быть серьезно нарушены, что приведет к значительным изменениям в экосистеме «водоем — водосбор». В связи с этим необходим серьезный анализ сложившейся ситуации, а также — конкретный комплекс первоочередных природоохранных мероприятий.

Анализ многочисленных литературных источников и собственные многолетние исследования показали, что к основным экологическим проблемам водоема можно отнести: 1) прогрессирующий процесс эвтрофикации; 2) зарастание, а в ряде случаев заболачивание мелководий, площадь которых в настоящее время составляет 48% от площади водохранилища; 3) заболачивание прибрежных участков; 4) ухудшение качества воды (высокая цветность до 100-120 градусов платиново-кобальтовой шкалы цветности, превышение ПДК такими показателями, как общее железо, медь, нефтепродукты, ион аммония, БПК<sub>5</sub>); 5) накопление загрязняющих веществ в донных отложениях и возможность вторичного загрязнения воды; 6) неблагоприятный кислородный режим в зимний период в Шошинском и Волжском плесах; 7) снижение рыбопродуктивности водоема; 8) ухудшение качества грунтовых вод в водоохранной зоне водоема.

Неблагополучное состояние экосистемы Ивановского водохранилища выдвигает на повестку дня ряд задач. Во-первых, назрела необходимость единого геоэкологического мониторинга Ивановского водохранилища и его водосборного бассейна, который включал бы следующие подразделы:

1. Мониторинг источников загрязнения.
2. Мониторинг качества основных притоков: р. Волги и р. Тверцы.
3. Мониторинг малых притоков водохранилища (Орша, Шоша, Лама, Инюха, Дойбица, Таратынка, Сучок, Донховка, Созь).
4. Мониторинг качества грунтовых вод.
5. Мониторинг качества воды и донных отложений самого водоема.

Во-вторых, необходима разработка практических рекомендаций по оздоровлению экологического состояния самого водохранилища и его водосбора. В большей степени это является экономической задачей, т.к. в последние годы растет показатель неэффективности работы очистных сооружений в бассейне. В 1996 г. к неэффективно работающим относились 75% очистных сооружений. Этот факт, несомненно, относится к числу негативных, так как увеличились аварии на очистных сооружениях, утечки и прорывы канализационных систем, когда неочищенные высококонцентрированные стоки сбрасываются непосредственно в Волгу. Вследствие этого в последние годы наблюдались резкие всплески показателей токсичности воды и массовые заморы рыбы.

Для остановки прогрессирующего процесса ухудшения качества воды Ивановского водохранилища необходима разработка и реализация комплекса практических мер по предотвращению попадания в водоем различных загрязняющих веществ как со сосредоточенным, так и с рассредоточенным стоком (модернизация работающих очистных сооружений, залужение и лесонасаждение, ограничение дачного и коттеджного строительства в ВЗ водохранилища и его основных и малых притоков и т.д.).

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шарпов В.А. Водохранилища. М.: Мысль. 1987.
2. Алтуний В.С., Белавцева Т.М. Контроль качества воды. М.: Колос. 1983.
3. Анучкин В.П., Григорьева И.Л., Ермолаев В.В., Чермных Л.П. Трансформация качества воды мелководий Ивановского водохранилища под воздействием антропогенных факторов //Матер. Межд. Конф. «Экологические проблемы литорали равнинных водохранилищ», Казань. 2004.
4. Ахметьева Н.П., Штритер Е.Е. Особенности формирования химического состава грунтовых вод //Иваньковское водохранилище: Современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука. 2000.
5. Григорьева И.Л., Ланцова И.В., Тулякова Г.В. Геоэкология Ивановского водохранилища и его водосбора. Конаково. 2000.

6. Григорьева И.Л., Черных Л.П. Оценка качества воды водохранилища по комплексу гидрохимических и гидробиологических показателей// Материалы Международной Научной Конференции «Биолог.ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Севера». Вологда. 2005.
7. **Иваньковское водохранилище и его жизнь**//Труды ИБВВ АН СССР. Вып. 34 (37). Л.: Наука. Ленинградское отделение. 1978.
8. **Пырина И.Л., Ляшенко Г.Ф.** Многолетняя динамика продуктивности фитопланктона и высшей водной растительности и их роль в продуцировании органического вещества в зарастающем Иваньковском водохранилище//Биология внутренних вод. №3. 2005.
9. **Экологические проблемы Верхней Волги.** Ярославль 2001.

## **РОЛЬ ВОДООХРАННЫХ ЗОН В ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОГО КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

*Кочарян А.Г., кандидат геол.-минер. наук, Лебедева И.П.,  
кандидат геогр. наук, Никитская К.Е. (Институт водных  
проблем РАН, Москва)*

В современных условиях водопользования основным источником загрязнения многих водных объектов являются именно неконтролируемые поступления загрязняющих веществ от рассредоточенных источников на водосборной площади. К примеру, исследования, проведенные US Geological Survey [6], показали, что высокие уровни содержания азота и фосфора отмечаются в водотоках и грунтовых водах на сельскохозяйственных территориях. Также часто встречаются пестициды, и в первую очередь, гербициды. Высокие концентрации пестицидов и фосфора встречаются также и в городских водотоках.

Исследования, проведенные в нашей стране, также свидетельствуют о возрастании роли диффузных источников загрязняющих веществ в процессах формирования качества воды в водных объектах. Интенсификация использования сырья в промышленности, химических соединений в сельском хозяйстве, дорожное строительство, добыча полезных ископаемых, рекреация создали множество трудно контролируемых источников загрязнения, локальных и региональных ореолов рассеяния различных элементов и их соединений.

На рис. 1 показаны возможные источники загрязнения поверхностных водных объектов, расположенные на их водосборных

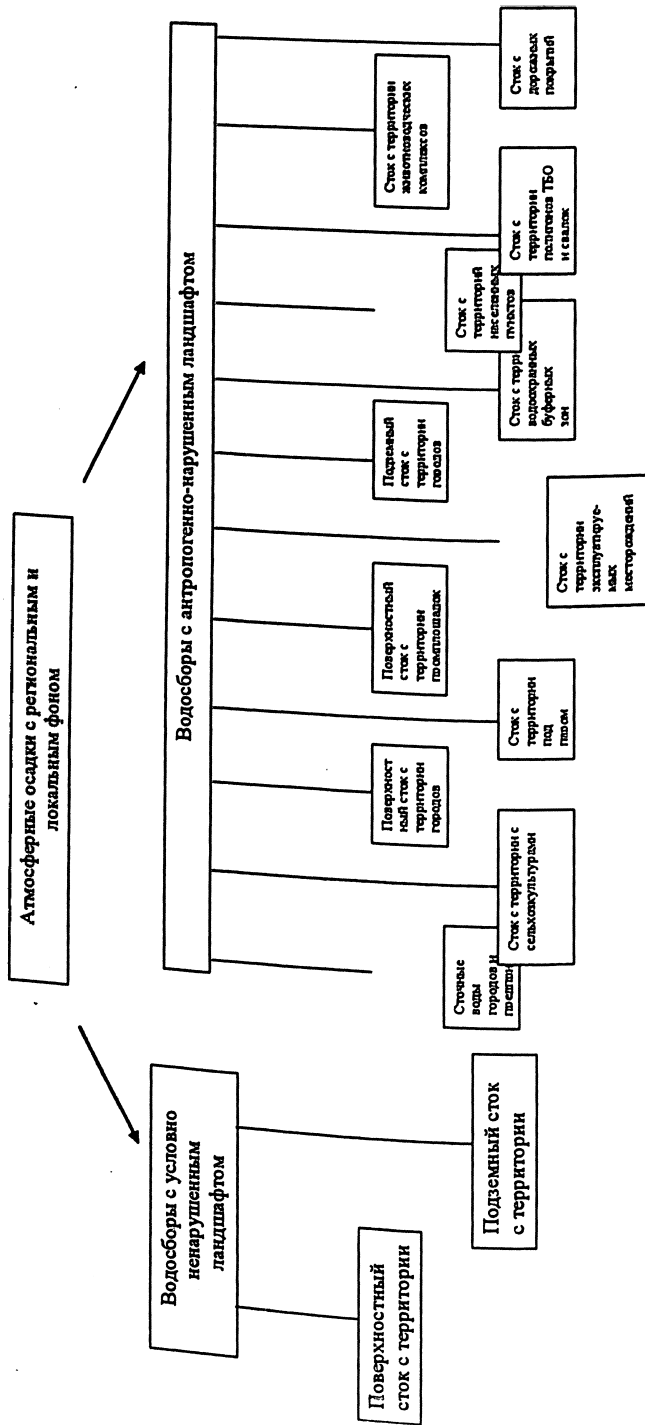


Рис. 1. Источники, формирующие химический состав воды на водосборной площади и создающие внешнюю нагрузку на водный объект

**Безопасность энергетических сооружений**

территориях. Исследования, проведенные ИВП РАН на водосборной площади Иваньковского водохранилища — основного источника водоснабжения г. Москвы, показали существенную роль поверхностного стока с сельхозугодий в загрязнении волжских вод (табл. 1).

**Таблица 1**  
**Роль контролируемых и неконтролируемых источников в поступлении ЗВ с водосборной площади Иваньковского водохранилища (данные 1990 г.)**

ЗВ	Сезон	Поступление ЗВ					
		Всего, г	Контролируемые источники, %	Неконтролируемые источники, поверхностный сток, %			
				Всего	В том числе,		
			Городские территории		Пром-площадки	Сельхоз-угодья	
N <sub>общ</sub>	Весна	2303,0	36	64	5,3	3,3	55,4
	Лето-осень	3023,0	54,8	45,2	8,0	5,1	32,1
P <sub>общ</sub>	Весна	281,2	29,2	70,8	2,1	1,5	67,2
	Лето-осень	418,8	39,2	60,8	2,9	1,8	56,1
НП	Весна	689,0	4,8	95,3	57,5	37,8	0
	Лето-осень	738,0	8,9	91,1	54,6	36,5	0
Fe	Весна	116,2	18,1	81,9	15,7	12,9	53,3
	Лето-осень	109,1	38,5	61,5	28,4	18,9	14,2
Cu	Весна	8,98	10,8	89,2	1,4	0,9	86,9
	Лето-осень	4,31	45	55	5,1	3,5	46,4
Zn	Весна	29	15,9	84,1	0,76	0,48	82,8
	Лето-осень	15,81	58,2	41,8	2,34	1,5	37,9
Cr	Весна	5,613	46,3	53,7	1,3	0,7	51,7
	Лето-осень	6,104	85,2	14,8	2,0	1,3	11,5
Ni	Весна	10,52	8,3	91,7	0,9	0,6	90,3
	Лето-осень	1,94					

В планы управления водосбором необходимо включать показатели, характеризующие величину диффузного загрязнения. Сочетание точечных и диффузных источников загрязнения, изменяющееся на протяжении всего гидрологического года, требует разработки нового поколения статистически обоснованных моделей, которые могут учитывать также сезонные изменения природной составляющей химического состава вод. Природные процессы могут приводить к превышению стандартов некоторых приоритетных показателей качества воды, таких как кислород, тяжелые металлы, нефтепродукты, фенолы, органические вещества и т.п. Включение диффузных источников в планы водоохраны, более обоснованный учет изменения природных процессов формирования качества воды, необходимость сохранения видового состава, разнообразия и функционирования водных организмов в параметрах, свойственных естественной биоте региона, требуют разработки региональных стандартов качества воды.

Любой водосбор вносит свой вклад в формирование химического состава водного объекта. Вклад ненарушенного естественного водосбора формирует химический состав вод, характер которого определяется зональными особенностями дренируемых ландшафтов. Антропогенно-нарушенный водосбор в результате сведения лесов, смены землепользования, осушения заболоченных земель, изменения кислотности и буферности почвенного покрова, утраты части почвенного покрова, потери почвой органического материала, увеличения нагрузки на площадь химических веществ, нарушения естественного круговорота веществ, увеличение непроницаемости водосбора в результате урбанизации, приводят не только к изменению режима и величины стока и зональных особенностей гидрохимического режима водных объектов, но и к резкому увеличению нагрузки на водосбор с одновременной потерей его буферной емкости. Разница между нагрузкой на водосбор и его буферной емкостью, т. е. удерживающей способностью определяет степень уязвимости водосбора.

Снижение антропогенной нагрузки и повышение буферной емкости водосбора является одной из основных задач водоохранной политики. Водоохранные зоны представляются важным элементом в системе охраны вод, так как они позволяют повышать буферную емкость нарушенных водосборов.

Их основное назначение — перехват формирующихся на водосборной площади транзитных потоков поверхностных и подземных вод, поглощение и трансформация ими взвешенных и раство-

ренных веществ, представляющих угрозу здоровью населения и водным экосистемам. В последнее время наметилась опасная тенденция нарушения целостности существующих водоохраных зон застройкой разного типа: городской, коттеджной, поселковой. В пределах этих зон производятся отводы земель под сады и огороды, проводится незаконная рубка лесополос. Эти действия изменяют механизм биологического круговорота элементов, нарушают стокоформирующую и стокорегулирующую функции, снижают барьерную функцию водоохраных зон, превращают их в источник дополнительного загрязнения водных объектов.

Совершенно очевидно, что количественная оценка выноса веществ с водосборной площади и их поглощения и задержания в водоохранной зоне должна базироваться на понимании механизмов массопереноса и поглощения веществ на участках склонового и руслового стоков.

В настоящее время существуют методы расчета поверхностного и подземного стока с водосборной площади, но до сих пор не разработаны методы расчета выноса и трансформации загрязняющих веществ с водосборов, имеющих рассредоточенные источники загрязнения. Так же нет понимания механизмов перехвата этих веществ в пределах водоохранной зоны и влияния нарушения этой зоны на ее барьерные функции. Документы, регламентирующие параметры и режимы ведения хозяйственной деятельности в водоохраных зонах, отражают недостаточность наших знаний о процессах миграции загрязняющих веществ в их пределах. Установление минимальной ширины водоохраных зон рек в зависимости от их протяженности, а для водоемов замедленного водообмена — от площади их акватории совершенно необоснованно и методически просто неверно. Выделение ширины прибрежных защитных полос по уклонам местности и типам сельскохозяйственного использования территории даже не имеет научного обоснования.

Безусловно, большая часть годового поверхностного стока имеет место в период весеннего снеготаяния. В зоне тайги более 50 % зимних осадков вызывает поверхностный сток в этот период. И хотя инфильтрация поверхностных вод в почву происходит при условии частичного промерзания почвы, перевод поверхностного стока в подземный в пределах лесных полос очень незначителен.

Рассмотрим процессы, обеспечивающие барьерные функции водоохраных зон. Перевод поверхностного стока в подземный в пределах лесных полос позволяет ликвидировать эрозионный про-

цесс в пределах этих полос и существенно интенсифицировать перехват загрязняющих веществ почвенным покровом и биотой в летне-осенний период. Очень приближенно, ширина такой полосы может определяться по формуле [3]:

$$b = \frac{a(1+kL)}{n-a},$$

где  $a$  — интенсивность дождя или водоотдачи из снега, мм/мин.,  $k$  — коэффициент стока,  $L$  — длина,  $n$  — коэффициент водопоглощения, мм/мин.

Для водоохранной зоны Ивановского водохранилища коэффициенты водопоглощения можно принять для песка — 1,2 — 1,26 мм/мин; для плотных супесей — 0,3 — 0,6 мм/мин.; для суглинков — 0,01 — 0,02 мм/мин.

По исследованиям Лаборатории лесоведения в Московской области коэффициент поверхностного стока зависит от вида угодья и гранулометрического состава почв (табл. 2).

Таблица 2

*Зависимость коэффициента поверхностного стока от вида угодья и гранулометрического состава почв*

Угодья	Разновидность почв по гранулометрическому составу			
	Глинистые	Суглинистые	Супесчаные	Песчаные
Еловый лес	0,32	0,26	0,09	0,01
Смешанный лес	0,26	0,16	0,09	0,004
Сосновый лес	0,12	0,07	0,01	0,003
Зябрь	0,32	0,18	0,10	0,01
Залежь	0,53	0,28	-	0,20
Многолетние скошенные травы	0,89	-	-	-
Стерня зерновых	0,70	0,59	0,39	-

Более эффективно водоохранные функции выполняют не хвойные, а смешанные леса, обладающие более сложным составом и структурой. Поэтому для улучшения водоохранных функций в хвойные леса рекомендуется вводить лиственные породы, имеющие более разветвленную корневую систему, способствующую рыхлению почвы и улучшению ее водопроницаемости.

Безусловно, такой примитивный расчет не учитывает образования слоя воды на поверхности почвы и возможного возникновения поверхностного дождевого или талого стока. Существуют



точные методы расчета формирования талого и дождевого стока, которые должны быть использованы при расчетах параметров водоохранных лесных, либо луговых полос.

Весеннее снеготаяние в подзоне дерново-подзолистых почв может продолжаться недели три. Водоотдача из снега начинается при переходе среднесуточной температуры через 0°C. Смыв почвенного покрова производится поверхностными плстово-струйчатыми микрорусловыми потоками, а наличие осадков усиливает разрушение почвы и облегчает транспортировку частиц. Так как почва начинает оттаивать только после освобождения из-под снежного покрова, наблюдается запаздывание начала стока наносов по отношению к началу водного стока. В то же время до 70 % от всего запаса растворенных загрязняющих веществ находятся в первых 30 % объема талого стока, т.е. эти вещества поступают в водные объекты тогда, когда эрозионный процесс еще не начинался. Это очень важное наблюдение, показывающее, что поступление растворенных веществ при таянии снега не связано с процессом выноса взвешенного вещества в водный объект.

Наносоудерживающая способность травянистой растительности велика — более 90 % наносов, перемещаемых плоскостным потоком, может задерживаться при прохождении через полосу двухметровой ширины [6]. Это типичный механический барьер. Но действует этот барьер только на склоне безруслового стекания. Ширина склона безруслового плоскостного стекания может быть определена по формуле, предложенной И.Ф. Горшковым [1]:

$$L = \frac{1}{2.25p}, \text{ где } p \text{ — густота гидрографической сети (речной и ов-}$$

ражно-балочной) территории, км/км<sup>2</sup>;  $L$  — ширина безруслового склона, м.

Имеются многочисленные описания методов оценки интенсивности эрозионных процессов на склонах и склоновых водосборах (Glymph, 1953; Козменко, 1954; Швевс, 1974; Заславский, 1983; Кузнецов и др., 1986; Olson, 1993; Ларионов, 1993 и др.).

Для определения величины смыва почв в период весеннего половодья были обработаны натурные данные ряда авторов [4,5]. Это позволило получить зависимости величины твердого стока от склонового стока для разных типов почв и агрофонов (табл. 3).

График (рис. 2) зависимости смыва почвы в период весеннего половодья от водного стока и агрофона для сельхозугодий на

Зависимость величины твердого стока (т/га) от склонового стока воды J (мм) в период весеннего снеготаяния для разных типов почв

Тип почв	Агрофон	Твердый сток, т/га
Дерново-подзолистый	Зябрь	$3,2 \times 10^{-4} \times J^{1,959}$
	Озимь	$4,02 \times 10^{-5} \times J^{1,786}$
	Залежь и травы	$2,8 \times 10^{-5} \times J^{1,474}$
Черноземы	Зябрь	$3,6 \times 10^{-6} \times J^{3,368}$
	Озимь	$6,49 \times 10^{-5} \times J^{1,784}$
Темно-каштановые	Зябрь	$3,18 \times 10^{-3} \times J^{1,384}$
	Стерня	$1,97 \times 10^{-4} \times J^{1,733}$
	Залежь и травы	$3,46 \times 10^{-5} \times J^{1,915}$

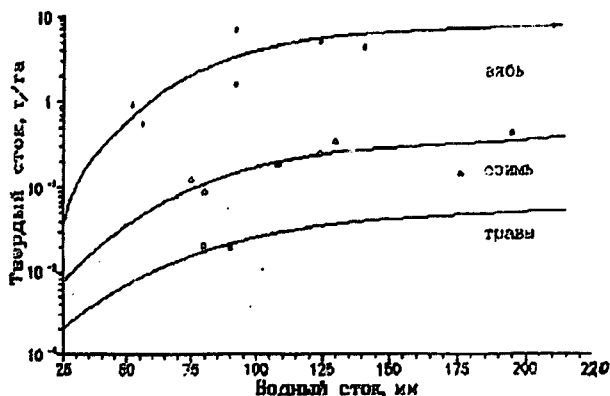


Рис. 2. Зависимость величины твердого стока от слоя стока весеннего половодья и агрофона

дерново-подзолистых почвах указывает на значительную роль агрофона в процессах эрозионного выноса и позволяет оценить буферную роль водоохранной зоны, засеянной травянистой растительностью.

Морфология водосбора оказывает определяющее влияние на пространственную структуру потоков вещества, определяет баланс наносов в его пределах. Днища балок и оврагов являются зонами аккумуляции наносов, смываемых со склонов. Вынос взвешенных веществ и таких загрязняющих веществ, как биогены, пестициды, тяжелые металлы по этим руслам значительно масштабнее, чем путем безруслowego стекания водного потока, и водоохранная зона для русловых потоков барьером не является. Совершенно очевидно, что водоохранная зона должна со-

здаваться и для первичных морфологических образований — лощин, логов, оврагов, притоков I порядка. Либо на этих морфологических образованиях нужно проектировать гидротехнические сооружения или биоплато, которые задерживают взвешенные и растворенные вещества.

При формировании водоохраных зон совершенно недостаточная роль уделяется малым водосборным бассейнам, непосредственно открывающимся в пределы водоохраных зон. Особенно серьезной ситуация становится при определении водоохраных зон водохранилищ, где природный базис эрозии водотоков был искусственно поднят при затоплении ложа водохранилища. Это приводит к формированию «вторичных дельт», обычно расположенных как раз в пределах водоохраных зон.

Такие участки долин обычно очень интенсивно используются в хозяйственном отношении. В 80-90 % случаев устьевые участки с аккумулятивными образованиями используются под водопой скота. В результате в пределах водоохраных зон непосредственно располагаются самостоятельные источники органического и бактериального загрязнения воды.

Поскольку выброс загрязняющих веществ в принимающий водный объект оценивается обычно по створу, расположенному немного выше по течению от устьевой части притока в половодье, то роль такого вторичного ареала практически не учитывается, так как основная масса загрязняющих веществ остается своеобразно «захороненной» в пределах аккумулятивных дельт (особенно в средние по водности годы). Совершенно другая ситуация складывается при выпадении экстремального количества осадков, особенно после значительного периода засухи. В таких случаях происходит интенсивный размыв аккумулятивных участков устья малых притоков, а следовательно, и «залповый» вынос значительного количества загрязнителей в принимающий бассейн.

До сих пор речь шла о выносе и задержании в ландшафте загрязняющих веществ, мигрирующих в виде взвесей, соединенных с почвенными частицами связями разной прочности. Эти вещества в процессе миграции по склону могут переходить в растворенную фазу. Некоторые вещества находятся в поверхностном стоке в виде истинного раствора.

Поэтому для водоохраных зон особый интерес представляют биогеохимические или технические биогеохимические барьеры, представленные естественными или искусственными лесными

насаждениями вдоль рек и водохранилищ. Они переводят поверхностный сток во внутрипочвенный и грунтовый, тем самым активируя его очистку, и задерживают не только взвешенные, но и растворенные вещества, поступающие из выше расположенных элювиальных и трансэлювиальных ландшафтов, включая их биологический круговорот. Содержание в различных видах организмов того или иного химического элемента зависит не только от содержания его в почвенном растворе, но и от избирательного механизма поглощения, который работает на поверхностных слоях корневой системы при контактном адсорбционном поглощении. Глубина всасывания растворов корнями складывается из глубины проникновения корневой системы и высоты капиллярного подъема воды. Отдельные корни достигают 5-7 м, а основная масса корней сосредоточена в верхнем 60-ти сантиметровом слое почв. Высота капиллярного подъема воды для супесей — до 3,5 м, суглинков — до 6,5 м, легких глин — до 12-13 м. Накопление элементов в отдельных частях растения нарастает в следующем порядке: древесина стволов < древесина толстых корней < древесина однолетних побегов < листва < кора корней < кора стволов < тонкие корни с сечением < 1 мм. Перед листопадом происходит отток элементов в корни деревьев, корни и древесину из листьев.

Надо отметить, что лесной покров способствует накоплению на поверхности почв аэрозолей. Поэтому в горизонте опада и подстилки суммируются два миграционных потока — аэрозольный нисходящий и восходящий за счет корневого поглощения, накопления в растениях и опада. Основным показателем накопления элементов в растениях является коэффициент биологического поглощения (КБП). Он равен отношению среднего содержания элемента в золе растения к его кларку (табл. 4).

Таблица 4  
Коэффициенты биологического поглощения элементов растительностью  
( $KПБ = C_{cp} / \text{кларк}$ )

Коэффициент биологического поглощения					
>100	100-10	9,99-1,0	0,999-0,1	0,099-0,01	<0,01
Au, S, J	Ag, Zn, Al, Ge, P, Mo, Se, Mn, Cl, Br	K, Cu, Mg, Ca, B, Sn, Cr, Hg	U, Na, Rb, Cs, Ba, Ra, Cd, Si, Pb, V, As, Sb, Fe, Co, Ni	Sr, Zr, Bi, F	Sc, W, Pt

Вероятно, элементы с высоким КПБ (больше 1) могут хорошо перехватываться лесными полосами водоохранной зоны. При этом необходимо помнить, что ель, сосна, пихта, кедр, лиственница, береза, осина, дуб, тополь, клен, ольха, ива, лещина, плодовые деревья и кустарники средней зоны имеют глубину проникновения корневой системы до 5 м. А на юге эти же растения могут проникать корневой системой до 20 м по глубине. Численная величина КПБ у разных видов растений имеет свои отличительные особенности. Несмотря на разнообразие лесных биоценозов, биологический круговорот в них имеет общие черты. Характерная особенность — значительное преобладание количества элементов, находящихся в биомассе, над количеством вовлеченных в годовой круговорот.

Микроэлементы поступают с опадом на поверхность почвенного покрова и задерживаются в связанных с органическим веществом соединениях. Очень часто концентрация микроэлементов в лесных подстилках выше, чем в растениях. Масса подстилки в тайге составляет примерно 251-1000 ц/га и более, а в широколиственных лесах 125-2500 ц/га.

Детальное изучение биологического круговорота металлов в ельниках Южной Карелии показали, что почти все количество элементов, запасенных фитомассой ельников за год, поступает с опадом на поверхность почв (табл. 5) [2].

Таблица 5

Круговорот рассеянных металлов в ельниках Южной Карелии, г/га в год

	Ti	Pb	Cu	Zn	Ni	Co
Хвоя прирост опад	3,0-6,0	2,0-4,0	2,0-5,0	30,0-70,0	0,5-1,0	0,3-1,0
	2,0-6,0	1,0-3,0	2,0-5,0	25,0-70,0	0,4-1,0	0,2-0,6
Кора прирост опад	0,6-1,4	0,2-0,4	0,3-0,6	4,0-8,0	0,1-0,2	0,03-0,04
	0,3-0,9	0,1-0,2	0,1-0,4	2,0-5,0	0,03-0,1	0,02-0,04
Надпочвенная растительность прирост опад	0,3-1,0	0,3-0,8	0,3-1,0	3,0-8,0	0,08-0,2	0,04-0,1
	0,3-1,0	0,3-0,8	0,3-1,0	3,0-8,0	0,08-0,2	0,04-0,1

Данные, приведенные в табл. 5, свидетельствуют о том, что практически все перехваченные корневой системой растений метал-

лы из почвенных растворов и грунтовых вод поступают с опадом на дневную поверхность. Исключительное значение приобретает вопрос о формах нахождения металлов в опаде и подстилке. Исследования показывают, что ряд металлов находится в легкорастворимой форме с низкомолекулярными кислотами, причем при переходе в раствор эти металлы мигрируют в анионной форме и в виде нейтральных комплексов. А это значит, что растения переводят подземный поток элементов на поверхность и обеспечивают их миграцию поверхностным весенним стоком в формах, которые не могут активно сорбироваться почвой. Возникает вопрос, насколько эффективно работают биогеохимические барьеры в водоохраных зонах? Кроме того, очевидно, что этот барьер работает очень ограниченное число дней в году и активно накапливает элементы только в период формирования прироста. Для широколиственных деревьев это, в основном, период формирования листвы. Однозначного ответа на этот вопрос нет, необходима постановка серьезных исследований в разных ландшафтных условиях и в разные сезоны, т. к. колебания концентрации металлов в листве в разные сезоны могут быть весьма значительными.

Роль макрофитов, образующих заросли вдоль берегов рек, в перехвате и задержании взвешенных и растворенных соединений, поступающих с площади безруслового стекания водного потока, практически не изучена. Изучались только процессы самоочищения в водных объектах при наличии в них высшей водной растительности.

Имеется опыт изучения работы ботанических площадок на малых водотоках и каналах, рассматриваемых как биоинженерные сооружения для очистки и доочистки сточных вод. Однако до сих пор нет даже законченных представлений по вопросам создания теории биоинженерных очистных сооружений. Ясно, что очистительная способность макрофитов имеет место, но процессы сложны и мало изучены. Переносить опыт эксплуатации ботанических площадок, используемых как сооружения очистки стоков, на русловые участки водоохраных зон можно только после экспериментальных исследований.

Физико-химические барьеры обусловлены резко меняющейся обстановкой. И поверхностные и внутрипочвенные потоки элементов взаимодействуют прежде всего с сорбционным барьером. Во время весеннего половодья многие элементы в снеге находятся в форме легкорастворимых солей и при контакте с

подстилкой и гумусовыми горизонтами почвы быстро иммобилизуются, что связано с процессами сорбции их органическим веществом и глинистыми минералами. Прогнофицированные соединения металлов в процессе трансформации переходят в разряд подвижных соединений с органическим веществом. Связывание металлов в растворимые органо-минеральные соединения является наиболее эффективным механизмом выноса из поверхностных горизонтов почв и подстилки. Элементы, находящиеся в подстилке и верхнем гумусовом горизонте почв, в подвижных формах также частично выносятся поверхностным стоком в водный объект. Та часть элементов, которая попадает в почвенные горизонты с инфильтрационными водами, связывается с органическими веществами гумусовой природы в анионные и нейтральные комплексы, которые не могут эффективно сорбироваться на частицах почв и зоны аэрации, представляющих собой катиониты. Очень большая вариабельность подвижных форм тяжелых металлов в почвенных горизонтах и в зоне аэрации, а также смена контролирующих факторов по сезонам не позволяет уверенно прогнозировать количество элементов, которое может задерживаться в водоохранной зоне. Возможны и такие варианты, когда инфильтрация воды идет по трещинам. Почва не успевает перехватывать металлы из раствора. Время контакта почв с фильтрующим раствором играет большую роль еще и потому, что процесс комплексообразования протекает достаточно медленно даже при высоких содержаниях гумусовых веществ в воде. Можно констатировать, что законы трансформации химического состава вод в системе атмосферные осадки — растительность — почвенный покров — зона аэрации — грунтовые воды изучены явно недостаточно.

Ясно, что форма нахождения металла в воде оказывает большое влияние на интенсивность его адсорбции на частицах почвы и зоны аэрации. Исследование лизиметрических вод дерновых и дерново-подзолистых почв, развитых в водоохранной зоне Иваньковского водохранилища, показали преобладание в их составе металлов в форме органо-минеральных комплексов, что свидетельствует о повышенной миграционной способности этих соединений в почвенных горизонтах и зоне аэрации. Судя по всему, физико-химические барьеры также не являются гарантией способности водоохранных зон полностью перехватывать гидрохимические поверхностные и подземные потоки веществ, идущие с водосборной территории.

Возможность самоочищения почвенных и грунтовых вод в водоохраных зонах определяется как свойствами самих загрязняющих веществ, так и свойствами почв и грунтов. Принципиальные различия в механизмах самоочищения этих вод от минеральных и органических веществ. Вещества неорганической природы поглощаются коллоидами и взвешенными веществами, причем емкость поглощения зависит от физических и химических свойств почв, от гранулометрического состава, от содержания гумусовых веществ. Что касается органических загрязняющих веществ, то наряду с их физико-химическим поглощением происходит их частичная или полная деструкция.

В условиях гумидного и аридного климата реакции взаимодействия веществ с почвой и грунтом протекает по-разному. В гумидной зоне ведущим фактором формирования химического состава почвенных вод является преобладание промывного, а в аридной — выпотного водного режима. В пределах же одной зоны значительные различия наблюдаются при формировании химического состава почвенных вод автоморфных и гидроморфных ландшафтов.

Немногочисленные натурные исследования эффективности задержания в водоохраных зонах биогенных элементов и пестицидов не позволяют оценить вклад отдельных механизмов перехвата, а позволяют оценить только суммарный эффект задержания индивидуальных веществ. Особенно интересен вывод об отсутствии различий в эффективности перехвата пестицидов луговой растительностью между весной и летом [7].

### Выводы

Хотя история выделения водоохраных зон в РФ насчитывает не одно десятилетие, теория их функционирования в различных ландшафтно-гидрологических условиях до сих пор не создана. Отсутствует научно-обоснованная классификация водоохраных зон. Слабо изучены механизмы перехвата загрязняющих веществ разного генезиса в различных типах водоохраных зон. Методика оценки и прогноза эффективности работы водоохраных зон в разные сезоны гидрологического года не позволяет включить ряд диффузных источников загрязнения в систему управления качеством вод водных объектов. Существующие нормативные документы, регламентирующие их параметры и режимы ограничения хозяйственной деятельности на их территориях, отражают недостаточность наших знаний. Сложность и многообразие процессов, происходящих на водосборной площади, отсутствие необходимой информации о них делают проблематичным



использование многопараметрических моделей миграции, выноса и задержания загрязняющих веществ в водоохраных зонах. Углубление исследований в этой области позволит значительно повысить уровень управляемости качества воды в бассейнах рек.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горшков И.Ф. Гидрологические расчеты. Л.: Гидрометеиздат. 1979.
2. Добровольский В.В., Ржаксинская М.В. Содержание и биологический круговорот рассеянных металлов в ельниках Южной Карелии /Геохимия ландшафтов древних массивов. Московский филиал Географического общества СССР. М. 1976.
3. Калинин В.М. Конкретизация параметров водоохраных зон для условий Тюменского региона //Водное хозяйство России. Т.1. №3. 1999.
4. Назаров Г.В. Особенности формирования твердого стока и выноса фосфора на пашне //Водные ресурсы. №2. 1987.
5. Эволюция круговорота фосфора и эвтрофирование природных вод. Л. 1988.
6. Novotny V. The next step – incorporating diffuse pollution abatement into watershed management //Water Science & Technology. V. 51. N 3-4. 2005.
7. Syversen N. Cold-climate vegetative buffer zones as pesticide-filters for surface runoff //Water Science&Technology Vol. 51. No 3 - 4. 2005.

### ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗОНИРОВАНИЕ РЕКИ КУНЬИ И БАССЕЙНОВ ЗАГОРСКОЙ ГАЭС ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ВОДНОЙ СРЕДЫ

*Гурьевич Т.Б., канд.техн.наук, Дмитриева И.Л., канд.хим.наук,  
Чуприна Я.Н., инженер (ООО «ЦСКТЭ»)*

ГАЭС — сложные техно-природные объекты, в которых технические и природные составляющие взаимосвязаны и влияют друг на друга. Управление такими объектами, обеспечение их безопасности требует знания закономерностей их функционирования, экологических последствий воздействия на окружающую среду.

В Российской Федерации в настоящее время находится в эксплуатации единственная гидроаккумулирующая электростанция — Загорская ГАЭС. На станции проводятся многоплановые наблюдения за изменением состояния водной среды, включающие в себя: гидрохимические, гидробиологические исследования, изучение санитарно-гигиенической обстановки в бассейне, условия депонирования тяжелых металлов в донных отложениях и ряд других исследований.

Изучение международного опыта эксплуатации ГАЭС и многолетние наблюдения, проводимые сотрудниками ООО «ЦСКТЭ» на Загорской ГАЭС, позволили сформулировать основные факторы и последствия воздействия ГАЭС на водную среду (рис. 1).

Обобщение полученных нами данных экологического мониторинга в районе станции дают возможность выделить 4 экологические зоны на реке Кунья и бассейнах ЗГАЭС, отличающиеся составом и направленностью техно-природных процессов, их характеристиками (табл. 1):

*I зона: р. Кунья — бассейн, образованный верхней плотиной*

*II зона: Зона выклинивания нижнего бассейна ЗГАЭС — очистные сооружения*

*III зона: Центральная часть нижнего бассейна, верхний бассейн — приплотинная часть нижнего бассейна.*

*IV зона: Нижний бьеф.*

*I зона: р. Кунья — бассейн, образованный верхней плотиной*

Участок испытывает влияние расположенных выше по течению г. Краснозаводска и п.п. Скоропусковска и Пересвет. Большое количество сточных вод, поступающих в реку без очистки или достаточной степени очистки, поверхностный смыв с прибрежных территорий обуславливают высокое содержание в воде р. Куньи нефтепродуктов и тяжелых металлов: марганца, цинка, меди. В начальный период наблюдений (1990 — 1992 г.г.) отмечались особо высокие концентрации нефтепродуктов (5 — 22 ПДК), в последующие годы уровень нефтепродуктов несколько снизился, однако наблюдается повышенный уровень концентраций меди, их значения в 2004 — 2006 г.г. превышают ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения от 2 до 30 раз (рис. 2).

В начале 90-х годов уровень содержания тяжелых металлов в донных отложениях свидетельствовал о наличии техногенного загрязнения со стороны г. Краснозаводск и п. Скоропусковск. В настоящее время степень загрязнения снизилась, что связано с уменьшением нагрузки на данную зону (табл. 2).

Данные радиологических исследований донных отложений позволяют говорить о радиационной безопасности изученного участка (табл. 3).

В отношении санитарно-гигиенических показателей р. Кунья соответствует санитарным требованиям: уровень бактерий группы кишечной палочки находится в пределах установленного норматива, не выявлена патогенная микрофлора.

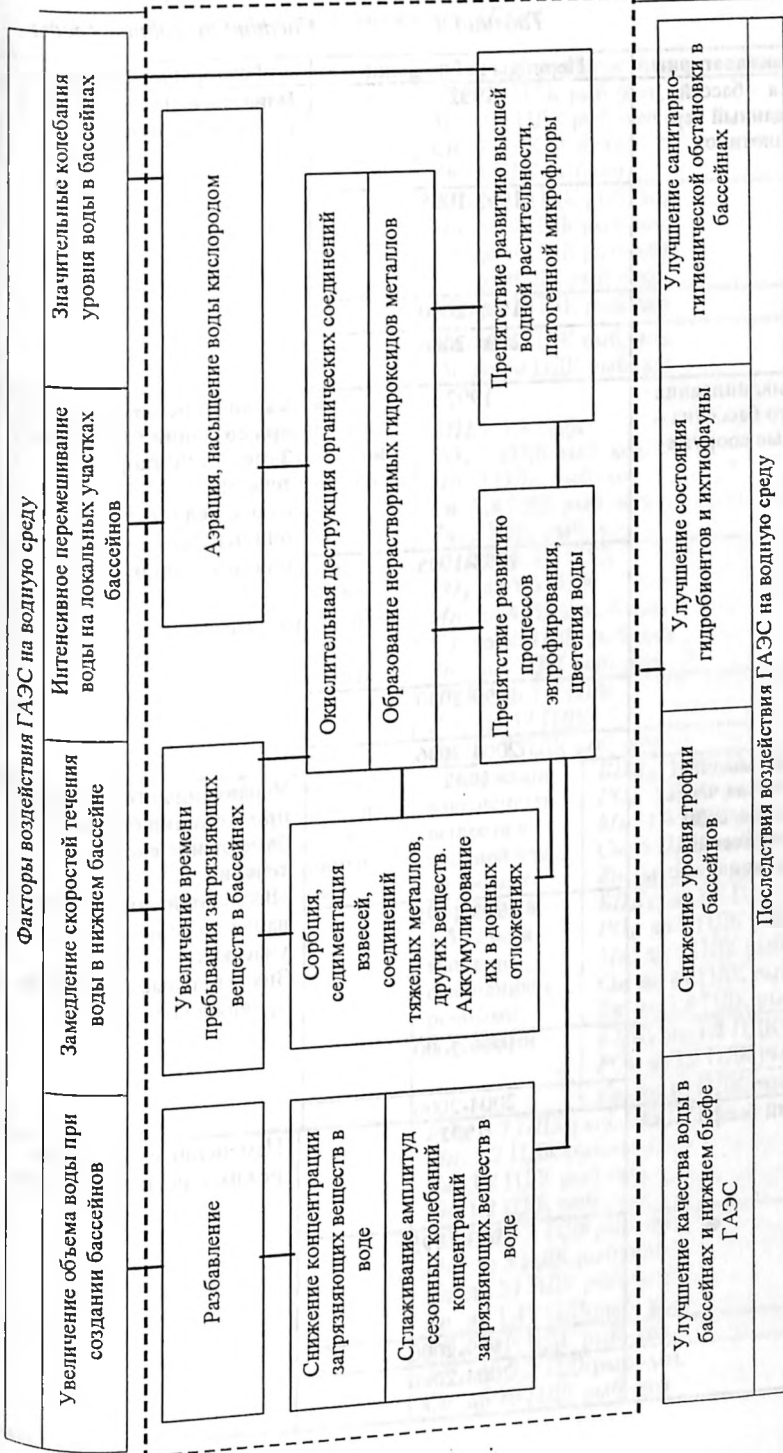


Рис. 1. Факторы и последствия воздействия ГАЭС на водную среду

Таблица 1

Состояние водной среды

Участок акватории	Периоды наблюдений	Факторы воздействия
р. Кунья – бассейн, образованный верхней плотиной	1992	Влияние вышележащих населенных пунктов
	1993-1995	
	1999-2000	
	2004-2006	
Зона выклинивания нижнего бассейна – очистные сооружения	1992	Увеличение объема воды при создании бассейнов, Замедление скоростей течения, Сброс недоста-точно очищенных сточных вод с очистных сооружений
	1993-1995	
	1999-2000	
	2004-2006	
Нижний бассейн центральная часть, верхний бассейн – нижний бассейн приплотинная часть	1992	Увеличение объема воды при создании бассейнов, Замедление скоростей течения, Интенсивное перемешивание воды на локальных участках Значительные колебания уровня воды
	1993-1995	
	1999-2000	
	2004-2006	
Нижний бьеф ГАЭС	1992	Изменение скоростного режима, речные условия
	1993-1995	
	1999-2000	
	2004-2006	

**Безопасность энергетических сооружений**

**различных зон района размещения ЗГАЭС**

Неблагоприятные процессы	Характеристики качества воды	
Загрязнение воды нефтепродуктами, тяжелыми металлами	<p><i>НП</i>: 22 ПДК рыб.-хоз.  <i>Мп</i>: 1,4 ПДК рыб.-хоз.  <i>Си</i>: 4 ПДК рыб.-хоз.  <i>Зп</i>: 3 ПДК рыб.-хоз.</p>	
	<p><i>НП</i>: до 5 ПДК рыб.-хоз.  <i>Мп</i>: до 9 ПДК рыб.-хоз.  <i>Си</i>: до 50 ПДК рыб.-хоз.  <i>Зп</i>: до 4 ПДК рыб.-хоз.</p>	
	<p><i>НП</i>: до 3 ПДК рыб.-хоз.</p>	
	<p><i>Мп</i>: до 4 ПДК рыб.-хоз.  <i>Си</i>: до 30 ПДК рыб.-хоз.</p>	
Поступление в воду нитратов и фосфатов, тяжелых металлов с недостаточно очищенными сточными водами. Накопление загрязнений в донных отложениях	<p><i>БПК<sub>5</sub></i>: 1,3 ПДК  <i>РО<sub>5</sub></i>: 6 ПДК рыб.-хоз.  <i>Мп</i>: 3 ПДК рыб.-хоз.  <i>Си</i>: 7,8 ПДК рыб.-хоз.  <i>Зп</i>: 2 ПДК рыб.-хоз.</p>	
Поступление в воду нитратов и фосфатов, тяжелых металлов с недостаточно очищенными сточными водами Накопление загрязнений в донных отложениях	<p><i>БПК<sub>5</sub></i>: до 3,5 ПДК  <i>РО<sub>5</sub></i>: до 7,6 ПДК  <i>Мп</i>: до 4 ПДК рыб.-хоз.  <i>Си</i>: до 60 ПДК рыб.-хоз.  <i>Зп</i>: до 5 ПДК рыб.-хоз.</p>	
	<p><i>БПК<sub>5</sub></i>: до 1,7 ПДК  <i>РО<sub>5</sub></i>: до 17 ПДК</p>	
	<p><i>Си</i>: до 7 ПДК рыб.-хоз.</p>	
Повышение содержания взвешенных веществ в верхнем бассейне и средней части нижнего бассейна Накопление загрязнений в донных отложениях нижнего бассейна	Содержание взвешенных веществ в средней части нижнего бассейна в 1,5-2 раза выше по сравнению с речными условиями	<p><i>БПК<sub>5</sub></i>: 1,3 ПДК  <i>РО<sub>5</sub></i>: 3 ПДК рыб.-хоз.  <i>Мп</i>: 1,7 ПДК рыб.-хоз.  <i>Си</i>: 5 ПДК рыб.-хоз.  <i>Зп</i>: 1,3 ПДК рыб.-хоз.</p>
		<p><i>БПК<sub>5</sub></i>: до 1,6 ПДК  <i>РО<sub>5</sub></i>: до 3 ПДК рыб.-хоз.  <i>Мп</i>: до 5 ПДК рыб.-хоз.  <i>Си</i>: до 44 ПДК рыб.-хоз.  <i>Зп</i>: до 1,4 ПДК рыб.-хоз.</p>
		<p><i>БПК<sub>5</sub></i>: до 1,2 ПДК  <i>РО<sub>5</sub></i>: до 1,5 ПДК рыб.-хоз.</p>
		<p><i>Си</i>: до 15 ПДК рыб.-хоз.</p>
	<p><i>РО<sub>5</sub></i>: 3,7 ПДК рыб.-хоз.  <i>Мп</i>: 1,2 ПДК рыб.-хоз.  <i>Си</i>: 3,2 ПДК рыб.-хоз.  <i>Зп</i>: 1,2 ПДК рыб.-хоз.</p>	
	<p><i>РО<sub>5</sub></i>: до 3,3 ПДК рыб.-хоз.  <i>Мп</i>: до 3 ПДК рыб.-хоз.  <i>Си</i>: до 23 ПДК рыб.-хоз.  <i>Зп</i>: до 1,45 ПДК рыб.-хоз.</p>	
	<p><i>РО<sub>5</sub></i>: до 3 ПДК рыб.-хоз.</p>	
	<p><i>РО<sub>5</sub></i>: до 2,2 ПДК рыб.-хоз.  <i>Си</i>: до 10 ПДК рыб.-хоз.</p>	

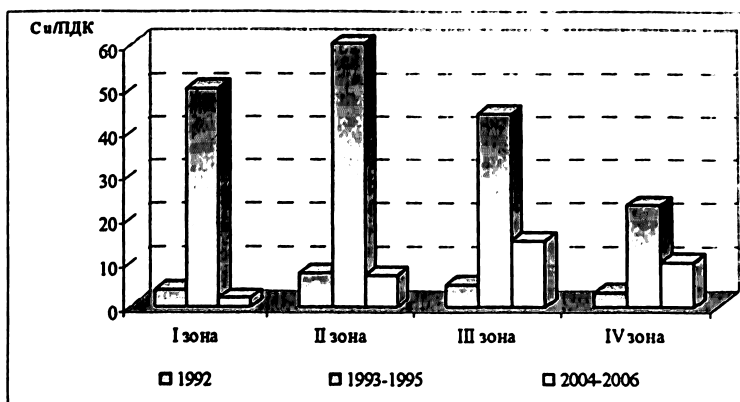


Рис. 2. Кратность превышения рыбохозяйственного норматива по меди для зон района расположения ЗГАЭС в различные периоды наблюдений

Таблица 2  
Содержание тяжелых металлов в донных отложениях р. Кунья и бассейне ЗГАЭС

№№ пп	Место отбора проб	Pb		Cu		Zn	
		1992	2006	1992	2006	1992	2006
1	р. Кунья	26,0	-	35,0	-	137,0	-
2	Бассейн, образованный верховой плотиной	14,0	60,0	61,0	42,0	67,0	40,0
3	Нижний бассейн, приплотинная часть	17,0	49,2	-	21,7	-	10,0

Таблица 3  
Результаты радиологических исследований донных отложений бассейна Загорской ГАЭС (Бк/кг)

№ пп	Места отбора проб	Cs-137		K-40		Ra-226		Th-232		A <sub>эфф</sub>	
		2005	2006	2005	2006	2005	2006	2005	2006	2005	2006
1	Бассейн, образованный верховой плотиной	<3	<2	570	310	32	27	104	17	229	75
2	Нижний бассейн Загорской ГАЭС, приплотинная часть	<2,4	<2	380	440	52	25	25	28	125	98
	Контрольный уровень	30,0		-		50,0		-		270,0	

Гидробиологическое обследование верховой р. Куньи и бассейна, образованного верховой плотиной, показало, что высшая водная растительность в реке развита очень слабо, занимает небольшие участки вдоль берега и представлена, в основном, тростником и рогозом (табл. 4).

Фитопланктон здесь также развит слабо и представлен, в основном, диатомовыми водорослями. Условиями, препятствующими его развитию, являются значительные скорости течения, узкое русло, отсутствие отмелей.

В буферном водоеме скорости течения снижаются за счет расширения русла. Наблюдается заиление и активное зарастание мелководных участков, что уменьшает активный объем водоема. Видовой состав высшей водной растительности шире чем на речном участке: произрастают тростник, рогоз, стрелолист, уруть, рдесты.

В фитопланктоне явно увеличивается численность зеленых и сине-зеленых водорослей, которые являются показателями загрязнения вод органическими веществами. В дальнейшем это может привести к развитию цветения воды и ухудшению ее качества по органическим и биогенным показателям.

### **II зона: Зона выклинивания нижнего бассейна ЗГАЭС — очистные сооружения**

Данный участок характеризуется измененными гидрохимическими характеристиками по сравнению с речными условиями. В зоне выклинивания еще чувствуется влияние р. Куньи, несколько повышен уровень содержания тяжелых металлов. Определенный вклад оказывают очистные сооружения, расположенные на левом берегу нижнего бассейна ЗГАЭС. С недостаточно очищенными сточными водами в бассейн поступают нитраты, фосфаты и также тяжелые металлы (табл. 3). Своих максимальных значений в этой зоне в период с 1993 по 1995 г.г. достигало БПК<sub>5</sub> (до 3,5 ПДК) (рис. 3).

Превышение концентраций фосфатов в воде после очистных сооружений колеблется от 6 до 17 ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения. На период наблюдений 1992 – 1995 г.г. наблюдались высокие концентрации меди (до 60 ПДК рыб.-хоз.), в настоящее время превышения отмечаются до 7 ПДК (рис.2).

Суточные колебания уровня режима отрицательно сказываются на высшей водной растительности, которая здесь развита очень слабо и представлена тростником, рогозом, стрелолистом и рдестами.

Таблица 4

Зонирование бассейнов Загорской ГАЭС по гидробиологическим характеристикам

Участок акватории	Периоды наблюдений	Факторы воздействия	Доминирующие процессы	Их характеристики
р. Куля	2006 г.	Скоростной режим	Нет	-
Бассейн, образованный верхней плотинной	2006 г.	Загрязнение поверхностным стоком. Снижение скорости течения.	Увеличение зарастаемости. Развитие зеленых водорослей на облицовке.	Увеличение видового состава высшей водной растительности связано со снижением скорости течения в расширенной зоне. Появление на облицовке небольшого количества зеленых водорослей указывает на загрязнение вод органическими веществами.
Зона выклинивания – нижний бассейн – очистные сооружения	1992-1995 г.г.; 2000 г.; 2004-2006 г.г.	Суточные колебания уровня водного режима. Загрязнение сточными водами.	Низкая зарастаемость. Увеличение доли зеленых водорослей в фитопланктоне. Развитие перифитона в виде «плюшек» на субстрате.	Суточные колебания уровня водного режима препятствуют интенсивному развитию водной растительности. Интенсивное развитие зеленых водорослей и перифитона на иллом дне свидетельствует о значительном загрязнении вод органическими веществами.
Центральная и приплотинная часть	1992-1995 г.г.; 2000 г.; 2004-2006 г.г.	Суточные колебания уровня водного режима. Загрязнение сточными водами.	Низкая зарастаемость. Увеличение доли синезеленых водорослей в фитопланктоне.	Суточные колебания уровня водного режима препятствуют интенсивному развитию водной растительности. Снижение скорости течения в этой зоне способствует увеличению доли синезеленых водорослей в фитопланктоне, однако их количественное развитие не достигает уровня «цветения».
Нижний бьеф	1992-1995 г.г.; 2000 г.; 2004-2006 г.г.	Высокая скорость течения	Низкая зарастаемость. Изменение видового состава фитопланктона.	Высокая скорость течения ограничивает развитие водной растительности и отрицательно влияет на развитие синезеленых водорослей.



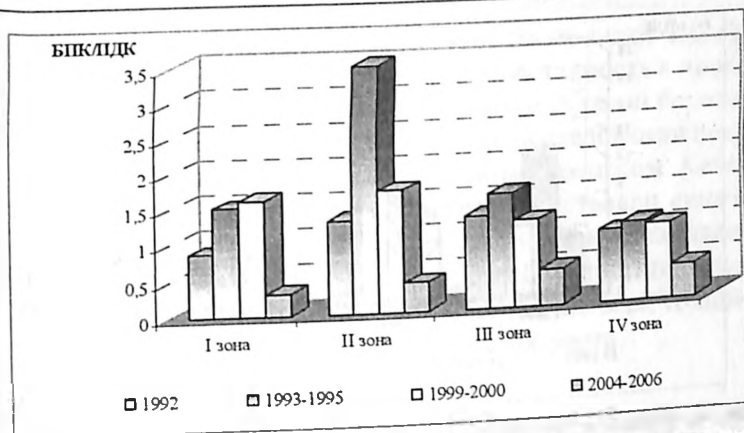


Рис. 3. Кратность превышения рыбохозяйственного норматива по БПК для зон района расположения ЗГАЭС в различные периоды наблюдений

Оценка качественного состава фитопланктона показала, что в этой зоне преобладают диатомовые и зеленые нитчатые, в небольшом количестве появляются синезеленые водоросли. Хорошо развит перифитон, представленный зелеными и диатомовыми водорослями, покрывающий «плюшками» илистые донные отложения и бетонную облицовку.

**III зона: Центральная часть нижнего бассейна, верхний бассейн — приплотинная часть нижнего бассейна**

В нижнем и верхнем бассейнах станции при ее работе происходят процессы перемешивания воды, в связи с чем, в данной зоне наблюдаются несколько повышенные концентрации взвешенных веществ. В то же время при интенсивном перемешивании улучшаются процессы аэрации воды, снижаются концентрации БПК<sub>5</sub>, нитратов, фосфатов. Здесь по сравнению со II зоной превышение нормативных значений для водоемов рыбохозяйственного назначения составляет для фосфатов 1,5 – 3 раза (рис. 4), для БПК<sub>5</sub> — 1,2 – 1,6 раза (рис. 3).

В приплотинной части нижнего бассейна ГАЭС создаются благоприятные условия для седиментации взвешенных форм тяжелых металлов и аккумуляции их донными отложениями. В период наблюдений 1992 – 1995 г.г. предельно допустимые концентрации для водоемов рыбохозяйственного назначения превышены по марганцу в 1,7 – 5 раз, а за последние годы данный норматив превышен не был (рис. 5). По меди снижение концентраций в приплотинной зоне также существенно: с 40 – 60 ПДК во II зоне до 10 – 15 ПДК в III зоне (рис. 2).

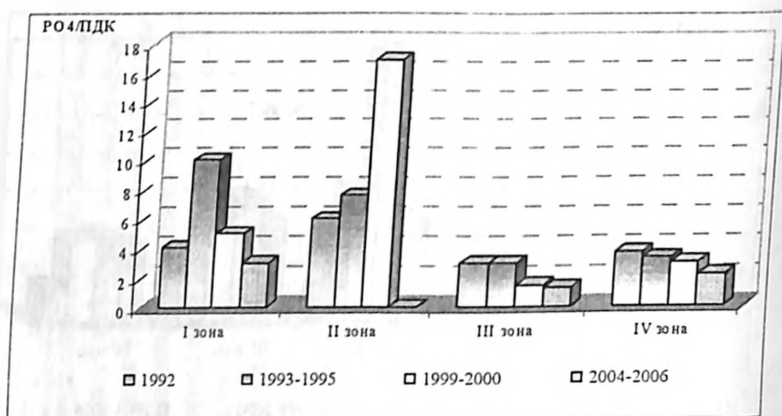


Рис. 4. Кратность превышения рыбохозяйственного норматива по фосфатам для зон района расположения ЗГАЭС в различные периоды наблюдений

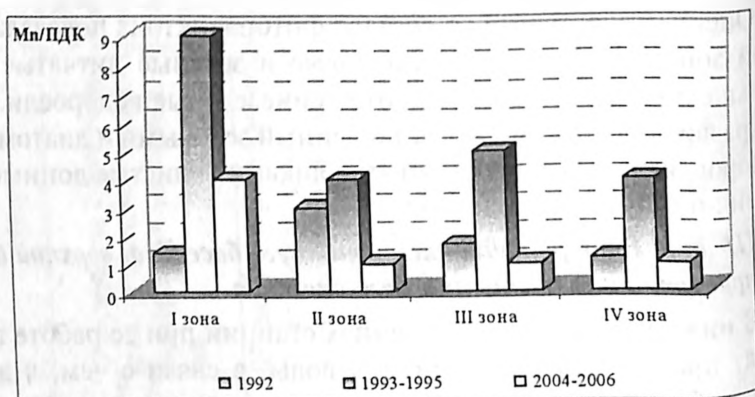


Рис. 5. Кратность превышения рыбохозяйственного норматива по марганцу для зон района расположения ЗГАЭС в различные периоды наблюдений

В то же самое время опасных уровней загрязнения донных отложений тяжелыми металлами также не наблюдается (табл. 4).

Согласно санитарно-гигиеническому обследованию, в бассейнах ГАЭС обнаружен рост кишечной палочки, что связано с поступлением недостаточно очищенных сточных вод с очистных сооружений.

В центральной и приплотинной части нижнего бассейна высшая водная растительность развита очень слабо. Отдельными куртинами в прибрежной зоне встречаются аир, частуха подорожниковая, горец земноводный, тростник обыкновенный, камыш озерный, на некотором удалении от берега на глубине отмечены несколько видов рдестов. Интенсивному развитию водной растительности

тельности в этой зоне препятствует постоянное колебание уровня режима. В последние годы зарастаемость в приплотинном участке снизилась в результате отсыпки галькой береговой зоны.

Проведенные гидробиологические исследования показали, что в водоеме преобладают продукционные процессы. Качественный состав фитопланктона, в основном, представлен синезелеными, диатомовыми и зелеными водорослями. Как показывают наблюдения, развитие синезеленых водорослей не достигает уровня «цветения», так как постоянное перемешивание всей толщи воды отрицательно сказывается на процессе их роста.

#### *IV зона: Нижний бьеф*

Данная зона является результирующей по оценке состояния водной среды района размещения Загорской ГАЭС.

Гидрохимический режим бассейнов ГАЭС и режим работы станции повлияли на динамику изменения основных показателей гидрохимического режима нижнего бьефа: снизилось поступление взвешенных веществ (с 40 – 60 мг/л до 10 – 30 мг/л), за счет насыщения воды кислородом при работе ГАЭС снизилось значение БПК<sub>5</sub> (с 1,5 ПДК в 1992г. до 0,5 ПДК в 2005г.), не выявлено превышений ПДК по нитратам; по фосфатам значение ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения составляет от 2 до 3 ПДК, но уровень данного загрязняющего вещества снижается в среднем на 40 – 60% по сравнению с зонами I и II (рис. 4).

В нижнем бьефе высшая водная растительность развита слабо и представлена тростником обыкновенным и осокой. Это обусловлено высокими скоростями течения, отсутствием мелководий.

В фитопланктоне происходит перестройка качественного состава, так как высокий скоростной режим оказывает угнетающее влияние на состояние синезеленых водорослей, попадающих сюда из водоема. Основу фитопланктона составляют диатомовые водоросли.

Общая оценка состояния каждой зоны сделана на основе экспертного комплексирования частных качественных и количественных оценок состояния водной среды (табл. 5).

Согласно этому, состояние зон оценивается как:

I зона: удовлетворительное, со слабо выраженной тенденцией ухудшения состояния водной среды водоема, образованного верховой плотиной;

II зона: удовлетворительное, стабильное;

III зона: удовлетворительное, стабильное;

IV зона: удовлетворительное, стабильное с выраженной тенденцией улучшения состояния водной среды.

Таблица 5

Комплексная оценка экологического состояния различных зон и предложения по рекультивации и мониторингу

Зона	Компоненты природной среды	Неблагоприятные процессы	Тенденция развития процессов (1992 – 2006 г.г.)	Комплексная оценка состояния зоны	Предложения по рекультивации и мониторингу зоны
I зона: р. Кунья – бассейн, образованный верховой плотиной	<b>Воды</b>  <b>Донные отложения</b>  <b>Гидробионты</b>	Загрязнение вод нефтепродуктами, тяжелыми металлами Загрязнение тяжелыми металлами Развитие высшей водной растительности, зеленых и сине-зеленых водорослей в водоеме	Снижение уровня загрязнения по нефтепродуктам, рост по тяжелым металлам Снижение уровня загрязнения по меди и цинку, рост по свинцу Активизация зарастания и заиления мелководий, активизация водорослей вплоть до цветения воды Накопление органических и биогенных элементов в донных отложениях	Удовлетворительное, со слабо выраженной тенденцией ухудшения состояния водной среды буферного водоема	Источник загрязнения – воды реки, вышележащий бассейн. Рекомендуется проинформировать природоохранные органы района. Рекомендуется отсыпка мелководных участков буферного водоема гравием для снижения зарастания и заиления. Контроль за динамикой загрязнения вод и донных отложений в период половодья и летней межени
II зона: Зона выклинивания нижнего бассейна	<b>Воды</b>  <b>Донные отложения</b>  <b>Гидробионты</b>	Загрязнение биогенами и тяжелыми металлами Загрязнение тяжелыми металлами	Снижение уровня загрязнения по биогенам и тяжелым металлам Снижение уровня загрязнения по меди и цинку, рост по свинцу	Удовлетворительное, стабильное	Мероприятия не требуются.  Контроль за динамикой загрязнения вод – 1 раз в год.

Научно-технический и производственный сборник

III зона. Центральная часть нижнего бассейна, верхний бассейн – приплотинная часть нижнего бассейна	<b>Воды</b>  <b>Донные отложения</b> <b>Гидробионты</b>	Повышение содержания взвесей, загрязнение биогенами и тяжелыми металлами Загрязнение тяжелыми металлами Развитие сине-зеленых водорослей Присутствие бактерий группы кишечной палочки (БГКП)	Снижение уровня загрязнения по биогенам и тяжелым металлам,  Снижение уровня загрязнения по меди и цинку, рост по свинцу Умеренный рост доли сине-зеленых водорослей, но уровень цветения вод не достигается Слабый рост показателей БГКП	Удовлетворительное, стабильное	Для предотвращения загрязнения бассейнов ГАЗС БГКП требуется повышение эффективности работы очистных сооружений Контроль за динамикой загрязнения вод и донных отложений – 1 раз в год
IV зона: Нижний бьеф.	<b>Воды</b>  <b>Донные отложения</b> <b>Гидробионты</b>	Загрязнение биогенами и тяжелыми металлами Загрязнение тяжелыми металлами	Снижение общего уровня загрязнения  Снижение общего уровня загрязнения	Удовлетворительное, стабильное с выраженной тенденцией улучшения состояния водной среды	Мероприятия не требуются. Контроль за динамикой загрязнения вод – 1 раз в год.

Безопасность энергетических сооружений

В зависимости от тенденций развития техно-природных процессов в каждой зоне рекомендованы мероприятия, повышающие экологическую стабильность эксплуатации ЗГАЭС I в целом. Минимизирован состав мониторинга района станции.

*Таким образом, многолетние исследования в районе размещения Загорской ГАЭС позволяют сделать следующие выводы:*

основными факторами воздействия на состояние водной среды служат: увеличение объемов воды при создании бассейнов, замедление скоростей течения в нижнем бассейне, интенсивное перемешивание воды на локальных участках бассейнов и значительные колебания уровней воды в бассейнах ГАЭС;

последствиями воздействия этих факторов являются: улучшение качества воды в бассейнах и нижнем бьефе ГАЭС, снижение трофии бассейнов, улучшение состояния гидробионтов и ихтиофауны, а также улучшение санитарно-гигиенической обстановки в бассейнах;

анализ характеристик состояния водной среды в пространстве и времени позволил выделить на изучаемом участке четыре экологических зоны: р. Кунья — бассейн, образованный верховой плотиной; зона выклинивания нижнего бассейна ЗГАЭС — очистные сооружения, центральная часть нижнего бассейна; верхний бассейн — приплотинная часть нижнего бассейна; нижний бьеф. При этом, оценки экологического состояния зон различаются с явной тенденцией улучшения по направлению к нижнему бьефу.

Полученные конкретные характеристики водной среды района размещения станции, выведенные общие закономерности влияния ЗГАЭС-I на окружающую природную среду во времени и пространстве могут быть использованы при разработке экологических прогнозов по ЗГАЭС-II.

## **ВЛИЯНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗГАЭС НА ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНЫЙ ПОКРОВ ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ**

*Мелихова А.Г., инженер (ОАО «НИИЭС»)*

Строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений вызывают существенные изменения экосистем прилегающих территорий. Наблюдения за состоянием почвенно-растительного покрова в зоне влияния верхнего и нижнего бассейнов Загорской ГАЭС по системе мониторинга проводилось в течение 15 лет с разной периодичностью, определяемой основными этапам их строительства и введения в эксплуатацию.

Фоновая растительность фитоценозов района исследования представлена ельниками с разной степенью участия березы, дуба, осины на хорошо дренированных почвах по высоким элементам рельефа, ельниками с березой и ольхой на оглеенных почвах по понижениям, ольховниками с березой, елью и кустарниковыми ивами, лещиной, малиной по балкам и оврагам. В луговых фитоценозах доминировали мезофильные злаки (ежа, овсяница луговая, тимофеевка луговая, мятлик луговой и др.), по пониженным элементам рельефа — щучково-осоковые, на заболоченных участках — осоково-рогозово-ситниковых сообщества.

На основе экологических особенностей доминирующих на исследуемой территории видов растений, их сопряженности с уровнем грунтовых вод и приуроченности к элементам рельефа для зоны подтопления были составлены обобщенные гидрогенные экологические ряды, проанализирована возможная динамика почвенно-растительного покрова в изменяющихся гидрологических условиях зоны влияния водоемом ЗГАЭС и составлен прогноз изменения растительности и почв.

При оценке степени влияния водоемов на почвенно-растительный покров учитывались экологические ограничения и требования к его трансформации, разрабатываемые на основе экспертных оценок для ЗГАЭС.

К негативным процессам, наблюдающимся в зоне влияния ЗГАЭС, относится подтопление и вызываемое им заболачивание сильно подтопленных территорий.

Границы зоны подтопления верхнего водоема проходят по руслам р. Вакша и руч. Гардель, так как в эти водотоки идет разгрузка фильтрационного потока. Нижним бассейном подтапли-

ваются участки Федоровской поймы, небольшие участки около г. Краснозаводска, дер. Дубки и пос. Богородское. Критическим для территории зоны является излив воды.

Сеть мониторинга представлена 4-мя экологическими профилями и 10-ю модельными площадками, охватывающими все типы растительности и элементы рельефа как существующей, так и прогнозируемой зоны сильного, умеренного и слабого подтопления (рис.1).

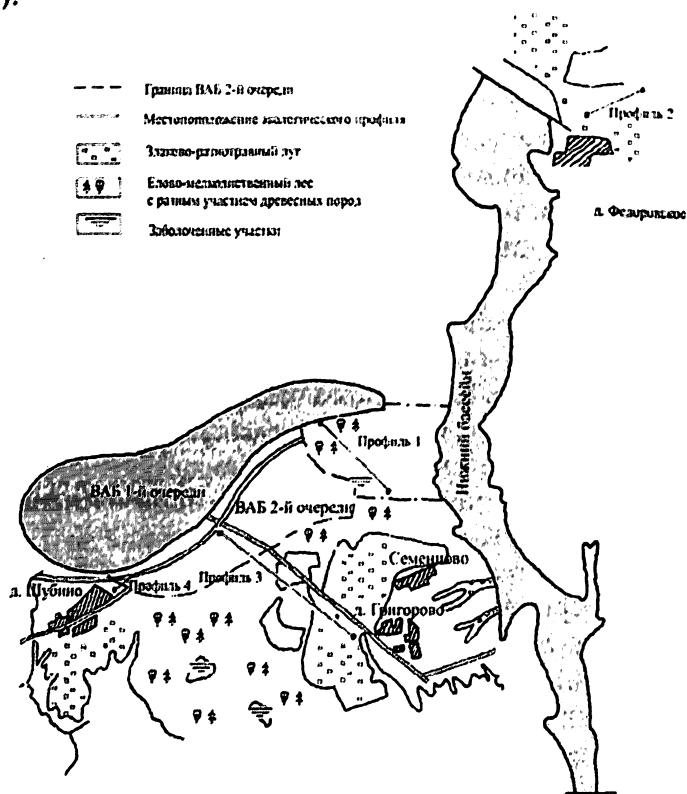


Рис. 1. Сеть мониторинга

В течение 15 лет проводилось маршрутное обследование прибрежных ландшафтов зоны влияния ЗГАЭС: наблюдения за динамикой флористического состава фитоценозов, обилия, проективного покрытия, жизненного состояния доминирующих видов растений, их экологической приуроченностью, сменой аспектов сообществ во времени и пространстве.

В настоящее время по данным космической съемки 2006 г., предоставленной и маршрутным обследованиям по профилям и модельным площадкам сети мониторинга можно выделить зону сильного подтопления, в которую входят участки, расположенные

в зоне влияния верхнего бассейна в понижении профиля 1, и в 2-х локальных понижениях прибрежной территории, а также участки расположенные в зоне влияния нижнего бассейна напротив очистных сооружений и в Федоровской пойме.

**Зона влияния верхнего бассейна**

Наблюдения за состоянием почвенно-растительного покрова зоны влияния верхнего бассейна проводились на профилях 1, 2 и 4, а также и на девяти модельных площадках.

Наиболее интенсивное воздействие со стороны бассейна наблюдалось в фитоценозах пониженных элементов рельефа, расположенных в подзоне сильного подтопления в непосредственной близости к водоему (профиль 1) (рис. 2.). Изменения растительности в этих сообществах во времени происходили достаточно быстро. Пространственные изменения были связаны с локализацией процессов подтопления.

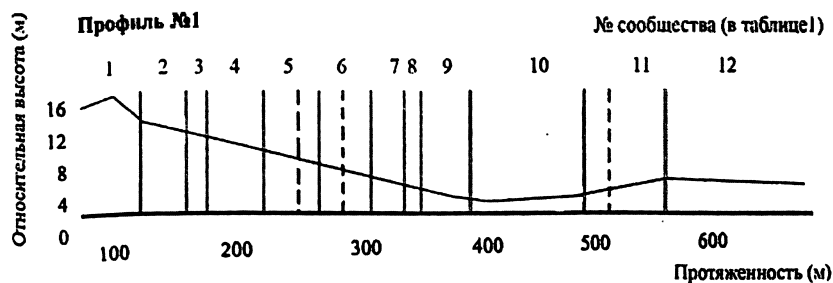


Рис. 2.

Изменения почвенно-растительного покрова профиля 1 показаны в табл. 1.

На профиле 1 в 1992г. было выделено 12 фитоценозов, отличающихся по составу древесных растений и доминирующих видов травянистого яруса с четкими границами, отмеченными на топоснове. Растительные сообщества профиля представляли собой елово-осиново-березово-ольховые леса с разными сочетанием и долей участия этих пород в древостое. Общее состояние деревьев 1 и 2 ярусов было хорошим или удовлетворительным за исключением участка 10, где на площади 34 м<sup>2</sup> наблюдался выход воды на поверхность, сухостой ольхи, березы и кустарников. Во втором ярусе отмечались единичные экземпляры дуба, клен, рябина, в подлеске - лещина, крушина, клен, малина, поросль ольхи. Травянистый ярус был представлен элементами неморальных лесов (сньгъ, зеленчук, копытень, майник, кислица, вороний глаз) и сорными растениями (крапива).



## Изменение почвенно-растительного покрова профиля 1

№	Растительность				Почвы				
	1992	1999	2005	2006	1992	1999	2006		
1	Ольхово-осиновый лес	Ольховый лес с подростом лещины	Ольховый лес с лещиной и рябиной во 2-м ярусе	Осиново-березовый лес с разной степенью участия ели, ольхи, рябиной, лещиной и ивой во 2-м ярусе, осоками, ситниками по понижениям и мезофильным разнотравьем в травяном покрове.	Дерново-подзолистые, оглеенные	Дерново-подзолистые, оглеенные	Дерново-подзолистые, оглеенные		
2	Осиновый лес с елью, дубом	Сырой ольховый лес с угнетенной осиной и подростом лещины	Осиново-березовый лес с примесью ели и ольхи, рябиной, лещиной и ивой во 2-м ярусе						
3	Елово-осиново-ольховый лес	Сырой ольховый лес с примесью осины, ели, подростом лещины							
4	Елово-ольховый лес	Малинник с примесью осины, рябины, лещины, подростом березы							
5	Разреженный ельник							Осиновое мелколесье с примесью клена, лещины, ивы, рябины	
6	Ольхово-осиново-еловый лес							Рогозовое болото заокочкаренное, с дернинами ситника, рогоза, щучки, отдельными кустами ивы по западной границе и сухостоем ольхи	
7	Сырой ельник с осиной								
8	Осиново-березово-еловый лес								
9	Сырой ельник с примесью ольхи и осины								Осиново-березовый лес с рябиной, ивой и лещиной во 2-м ярусе
10	Рогозово-ситниковое болото, сухой сучастой деревьев								
11	Осиново-еловый лес								
12	Мелколесье			Угнетенный осиновый лес с подростом ивы, лещины.					
			Мелколесье (осина, рябина, ива)						
					Болотные				
				Дерново-подзолистые	Дерново-подзолистые, оглеенные				

К 1999 году в сообществах профиля произошло сокращение обилия древесного яруса и снижение бонитета и жизненности деревьев, в первую очередь осины, ели, березы. Появились сухостойные деревья. Доминирующей древесной породой стала ольха. На больших площадях наблюдалось разрастание малины, обилие ивы. В 1999-2002 годах года появился подрост клена. На площади около 2000м<sup>2</sup> образовалось рогозовое болото с большой поверхностью водного зеркала. В травостое произошло резкое сокращение неморальных видов и увеличение обилия сорнотравья и гидрофильных растений. Общее количество фитоценозов сократилось до 8. Отмечается, что за последние 4 года темпы изменений растительного покрова фитоценозов замедлились, почвы практически не изменились, а площадь рогозового болота начала сокращаться за счет зарастания ивой и мелкоколосьем по западной границе. Это говорит о достижении динамического равновесия, стабилизации процессов изменения почвенно-растительного покрова профиля и начале восстановления фоновой растительности (рис. 3).



а



б

Рис. 3. Растительные сообщества профиля 1: а — общий вид ; б — рогозовое болото, зарастающее по западной границе.

На площадках 6, 7, 9, расположенных вблизи водоема, в подзоне сильного подтопления на пониженных элементах рельефа также начинают формироваться сообщества кустарников и мелкоколосья с мезофильным травяным покровом и подростом осины, дуба, березы, ели. Это также говорит о динамическом равновесии, стабилизации и уменьшении негативных процессов. Позитивные

изменения, наблюдаемые в фитоценозах зоны сильного подтопления верхнего бассейна связаны с организацией прибрежной территории, созданием дренажной системы и уменьшением фильтрации воды из водоема.

В зоне умеренного подтопления верхнего бассейна 1-й очереди и в пределах прогнозируемой зоны подтопления водохранилища 2-й очереди в 1993 г был заложен профиль 2 протяженностью 1880 м (рис. 4).

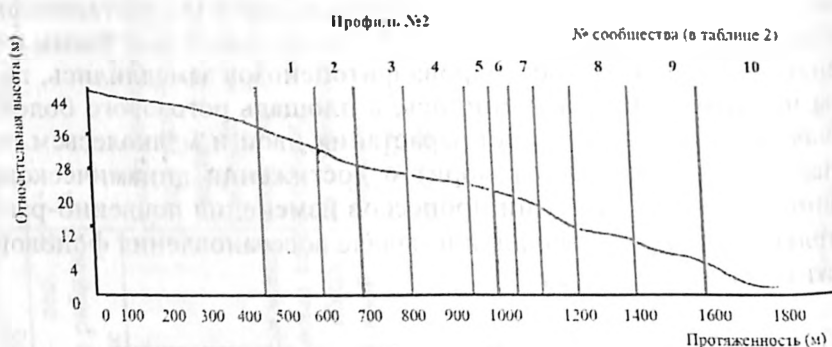


Рис. 4.

Растительные сообщества профиля представлены лесными, луговыми и агрофитоценозами. Доминирующими являются елово-осиново-березовые леса с разной степенью участия древесных видов с подростом дуба, клена, рябиной и лещиной во втором ярусе и элементами широколиственного и бореального разнотравья в травянистом покрове. По пониженным элементам рельефа наблюдаются сырые ольховые леса с подростом березы, крушиной и бузиной в кустарниковом ярусе и сорнотравьем в травянистом ярусе.

Изменения почвенно-растительного покрова на профиле 2 показаны в табл. 2.

На протяжении всего периода наблюдений изменения видового состава древесного яруса не наблюдается, однако формула древостоя в течение 7 лет изменялась в сторону увеличения участия березы, ольхи, осины и уменьшения участия ели. В травянистом покрове происходило замещение бореальной растительности влаголюбивыми и сорными видами. В настоящее время отмечено хорошее состояние ели, наличие подроста дуба, клена, увеличение элементов широколиственного и бореального разнотравья в травянистом покрове (рис.5).



Рис 5. Растительные сообщества профиля 2

В подзоне умеренного подтопления все изменения происходят на уровне флюктуаций, с последующей стабилизацией и тенденций к восстановлению утраченных структур травянистого яруса. Наиболее значительные изменения происходят по пониженным элементам рельефа.

Профиль 4 был заложен в 1999 г. на участке, примыкающем к западной части верхнего бассейна у дер. Шубино. На этом профиле и площадках 1, 4, 5 после наполнения верхнего водоема до НПУ наблюдалось сильное подтопление от уреза воды до автомобильной дороги, которая служила барьером для дальнейшего развития процесса. Заболоченные участки с обилием рогаза и ивы были отмечены как имеющие тенденцию к критическому развитию. После проведения дренажных работ и организации отвода воды процесс подтопления прекратился. В настоящее время по всему профилю произрастают разнотравно-злаково-бобовые фитоценозы с разной степенью доминирования видов и заково-разнотравная растительность на дерново-луговых почвах. Луговая растительность в настоящее время находится в хорошем состоянии. Обилие сорных видов значительно сократилось. Был проведен подсев ценных комоновых мезофильных злаков тимофеевки, ежи, овсяницы (рис. 6).

Анализ динамики растительного покрова зоны влияния верхнего бассейна показывает, что: наиболее интенсивное воздействие со стороны бассейна испытывают фитоценозы пониженных элементов рельефа, расположенных в подзоне сильного подтопления в непосредственной близости к водоему. Изменение растительности в этих сообще-

Таблица 2

№	Растительность				Почвы	
	1992	1999	2005	2006	1992	1999 – 2006
1	Березово-еловый лес с доминированием в травостое бореальной растительности	Березово-еловый лес с подростом клена, угнетенным дубом, сорной и гидрофильной растительностью в травостое	Березово-еловый лес с кленом, лещиной во 2-м ярусе, подростом клена, дуба, сорной растительностью в травостое	Березово-еловый лес подростом клена, дуба, с сорной и элементами бореальной растительности в травостое	Дерново-подзолистые	Дерново-подзолистые, оглеенные до средних горизонтов
2	Осиново-березовый лес с доминированием в травостое мезофильного разнотравья	Осиново-березовый лес с подростом клена и лещины, доминированием в травостое сорных и гидрофильных видов.	Осиново-березовый лес с кленом и лещиной во 2-м ярусе, доминированием в травостое сорных видов			
3	Березово-еловый лес с доминированием в травостое мезофильного разнотравья	Березово-еловый лес с примесью ольхи, элементами гидрофильного разнотравья в травостое	Березово-еловый лес с примесью ольхи, подростом ели, клена, березы, сорной растительностью в травостое	Березово-еловый лес с примесью ольхи, подростом ели, клена, березы, сорнотравьем и элементами бореальной растительности в травостое		

4	Ольховый сырой лес на пониженном участке	Ольховый сырой лес с подростом березы и гидрофильным разнотравьем	Ольхово-березовый сырой лес с сорнотравьем и гидрофильным разнотравьем			
5	Опушка леса с луговым мезофильным разнотравьем.	Разнотравно-злаковый мезофильный луг с порослью ивы	Ивовое мелколесье с подростом березы и мезофильным разнотравьем		Дерново-луговые	
6	Посадки картофеля					
7	Ольхово-еловый лес с элементами лугового мезофильного разнотравья	Ольхово-еловый лес с доминированием сорнотравья	Ольхово-еловый лес с подростом клена, гидрофильным разнотравьем и элементами широколиственного разнотравья		Дерново-подзолистые	Дерново-подзолистые
8	Елово-осиновый лес с элементами широколиственного разнотравья	Елово-осиновый лес с примесью ольхи и сорным разнотравьем	Елово-осиновый лес с элементами широколиственного разнотравья	Елово-осиновый лес с элементами широколиственного разнотравья и бореальной растительности	Дерново-подзолистые	Дерново-подзолистые
9	Мезофильный злаковый луг	Посев злаково-бобовой смеси	Посев кормовых злаков (ежа, тимopheвка, овсяница, костер)		Дерново-луговые	
10	Щучковый влажный луг с осокой, ситником, рогозом	Осоково-щучково-рогозовый заболоченный луг с пятнами ситника и порослью ивы	Осоково-щучково-рогозовый заболоченный понижение с пятнами ситника, таволги и кустарниковой ивой		Дерново-луговые	Болотно-луговые



Рис. 6. Растительные сообщества профиля 4

ствах носит качественный характер, имеет тенденцию к негативному развитию во времени и пространстве и приближаются к критическому уровню, однако при наступлении определенных стадий динамического равновесия возможна обратимость процесса в сторону восстановления фоновой растительности;

на участках зоны сильного подтопления, расположенных на расстоянии 500-2000 м от уреза воды процессы изменения растительности замедлены во времени и происходят на уровне флуктуаций с последующей стабилизацией;

в подзоне умеренного подтопления существенных изменений растительного покрова пока не наблюдается;

можно говорить о стабилизации наземных экосистем существующей зоны подтопления и тенденциях к снижению негативного воздействия со стороны верхнего бассейна;

на участках, примыкающих к западной части водоема прогнозируемого подтопления не наблюдается, так как своевременно был организован отток воды, фильтрующейся из водохранилища;

В целом можно говорить о удовлетворительном состоянии почвенно-растительного покрова зоны влияния верхнего водоема и значительном снижении негативных процессов, наблюдавшихся в течении первых десяти лет мониторинга.

***Изменение растительности в зоне подтопления нижнего бассейна***

В зоне влияния нижнего бассейна наблюдения за динамикой почвенно-растительного покрова проводились на профиле расположенном в зоне подтопления вызванной обходной фильтрацией в пойме р. Дубны (рис. 7).

Растительность профиля представлена злаково-разнотравными и разнотравно-злаковыми фитоценозами разной степени увлajнения, имеющими четкие границы (табл. 3).

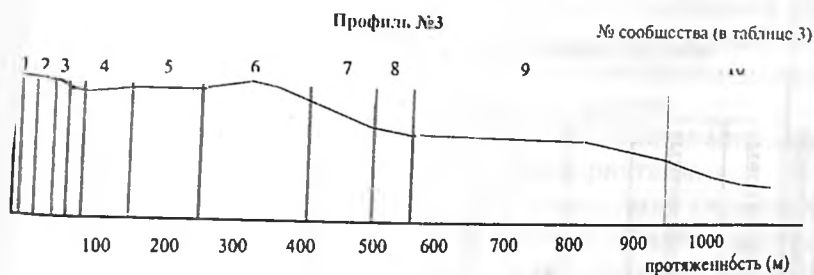


Рис. 7.

В пределах зоны подтопления была установлена дренажная система.

До 2003 года изменения растительности зоны подтопления нижнего бассейна происходили на уровне флюктуаций. Прогнозируемое негативное влияние водоема на Федоровскую пойму нивелировалось хорошо работающей дренажной системой.

В настоящее время профиль 3 находится на территории частного владения ООО Ассортимент «Нива». По всему профилю была проведена сплошная распашка земель с целью создания пастбищ по европейскому образцу и посев семян рейграса пастбищного (селекция Дании) и клевера белого (селекция Германии).

Состояние искусственных сенокосов и пастбищ вблизи ферм хорошее. Посевы развиваются интенсивно. Покрытие почвы 90-100%. Однако не все площади засеяны. На незасеянных луга по распашке интенсивно развивается пионерная сорнотравная растительность с доминированием лебеды (рис.8).



Рис. 8. Растительные сообщества профиля

В целом процесс подтопления территории, прилегающей к водоемам ЗГАЭС проходит в рамках прогноза с разной интенсивностью в зависимости от элементов рельефа, положения участка

Таблица 3

№	Растительность				Почвы					
	1992	1999	2005	2006	1992	1999	2005-06			
1	Мезофильный разнотравно-злаковый луг		Создание пастбищ посевом клевера лугового и рейграса пастбищного	Клеверово-рейграсовые пастбища	Дерново-луговые					
2	Нарушенный распахкой пониженный участок	Разнотравно-злаковый сырой луг			Болотно-луговые					
3	Закочкаренный разнотравно-злаковый сырой луг	Разнотравно-злаковый влажный луг			Лугово-болотные					
4	Мезофильный разнотравно-злаковый луг	Мезофильный разнотравно-злаковый луг, сильно стравленный перевыпасом			Дерново-луговые					
5	Закочкаренный злаковый сырой луг	Закочкаренный сырой луг с примесью осоки и подростом ивы			Дерново-луговые, оглеенные					
6	Злаково-разнотравный сильно стравленный перевыпасом луг	Злаково-разнотравный мезофильный с примесью щучки, сильно стравленный перевыпасом луг			Дерново-луговые					
7	Злаково-разнотравный сырой луг	Злаково-разнотравный сырой закочкаренный луг			Сонотравные сообщества по незасеянному распаханному почвам с доминированием лебеды					
8	Разреженный злаково-равнотравный сырой луг	Злаково-равнотравный сырой луг						Дерново-луговые, оглеенные		
9	Мезофильный злаково-разнотравный луг	Мезофильный злаково-разнотравный луг						Дерново-луговые		
10	Злаково-разнотравный сырой луг				Дерново-луговые, оглеенные					

Распаханные, задерненные луговые



относительно водоема и природоохранных мероприятий проводимых дирекцией станции. Темпы наблюдаемых негативных изменений почвенно-растительного покрова замедляются, процессы развития растительных рядов стабилизируются.

В зоне влияния верхнего бассейна особое внимание должно уделяться противифльтрационным мероприятиям.

При строительстве ЗГАЭС-2 прогнозируется сильное подтопление и заболачивание по пониженным элементам рельефа. Это приведет к негативным изменениям почвенно-растительного покрова прибрежных территорий. Для предотвращения и минимизации этих процессов необходимо проводить наблюдения по системе мониторинга на всех этапах введения станции в эксплуатацию.

Некоторые изменения прогнозируются на территории, подлежащей в рамках проекта отторжению с компенсацией ущерба.

В настоящее время в зоне подтопления водоемов ЗГАЭС не фиксируется критических (с точки зрения безопасности территории, сооружений, коммуникаций) состояний.

### **ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ И ПЛАНКТОНА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ СИСТЕМУ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ АЭС**

*Суздалева А.Л., доктор биол. наук (ОАО НИИЭС, д.б.н.),*

*Попов А.В., кандидат биол. наук (Курская АЭС, к.б.н.),*

*Кучкина М.А., кандидат биол. наук (МВТУ, к.б.н.),*

*Фомин Д.В., Минин Д.В., инженеры (ОАО НИИЭС)*

Атомные электростанции являются крупными водопользователями, но их безвозвратное водопотребление относительно невелико. Почти все воды, поступившие на АЭС, через определенное время сбрасываются во внешнюю среду. После того, как температура этих вод понизится, они могут быть повторно использованы в системе технического водоснабжения электростанции или, поступая в открытые водные системы, могут быть переданы другим водопользователям.

Вместе с тем при прохождении вод через системы техводоснабжения АЭС могут происходить заметные изменения их химического состава. С водами в эти системы постоянно засасывается значительное количество различных планктонных организмов,

а также пелагических личинок донных беспозвоночных и мальков рыб. Часть этих организмов погибает. Таким образом, работа АЭС может привести к существенной трансформации как живых, так и неживых компонентов водной среды. Объем водной массы, проходящей через систему техводоснабжения АЭС, весьма велик и сопоставим со стоком довольно крупных рек. В связи с этим, оценка степени трансформации вод при прохождении через технические узлы всегда является важным пунктом экологической экспертизы предпроектной и проектной документации. Данной проблеме уделяется значительное внимание и при проведении экологического мониторинга водоемов-охладителей действующих АЭС. Однако, несмотря на большое количество публикаций, посвященных отдельным аспектам проблемы, работ, рассматривающих весь комплекс экологических последствий, в настоящее время почти нет. По этой причине оценки, вырабатываемые при обсуждении проектов и рассмотрении воздействия уже функционирующих АЭС, часто носят фрагментарный характер. При их выработке рассматриваются только некоторые виды воздействий, например, влияние, оказываемое на организмы зоопланктона. Остальные эффекты, важность которых с экологической точки зрения не менее велика, практически не рассматриваются. При этом довольно часто расчеты, приводимые в экологических обоснованиях, строятся на основании данных, полученных еще в 40-60-х годах XX в. при исследовании американских ТЭС с прямоточной системой охлаждения. В результате вырабатываемые оценки и прогнозы не дают представления о реальном воздействии, оказываемом современными АЭС с оборотной системой водоснабжения.

В настоящей публикации предпринята попытка проанализировать основные аспекты воздействия функционирования систем технического водоснабжения АЭС на водную среду. Основой для ее написания послужили материалы, полученные в ходе многолетних исследований, проведенных на Курской, Смоленской и Калининской АЭС в 1985 – 2005 гг. [1 – 9].

Следует уточнить, что под термином «система техводоснабжения АЭС» мы подразумеваем все технические узлы, через которые движется вода от точки водозабора до места выхода отработанных вод в акваторию водоема. Таким образом, в это понятие также включаются облицованные участки водозаборных и сбросных каналов, водобойные пороги и другие технические узлы, находящиеся вне производственных зданий.

**Химический состав вод.** Все факторы, действие которых может изменить химический состав вод в системе водоснабжения АЭС, можно разделить на две основные группы.

**Первая группа** — факторы, оказывающие непосредственное воздействие на химический состав водной среды. Это все случаи попадания каких-либо химических веществ в воды при их прохождении через систему водоснабжения электростанции (от водозабора до выхода сбросного канала в водоем-охладитель):

попадание веществ из различных технических узлов АЭС;

загрязнение открытых участков водоподводящих и сбросных каналов с прилегающей территории АЭС;

загрязнение вод, происходящее при очистке системы водоснабжения от органических и неорганических отложений, образующихся на внутренней поверхности ее узлов.

**Вторая группа** факторов включает все опосредованные изменения в химическом составе водной среды. То есть изменения химизма вод, обусловленные не прямым воздействием со стороны АЭС, а различными аспектами ее воздействия, не сопровождающимися поступлением в воды каких-либо химических веществ, но в то же время косвенно вызывающими заметные изменения в составе водной среды.

Основными факторами этой группы перечислены ниже.

1. *Изменения в химическом составе вод при прохождении через АЭС, вызванные повышением температуры.* Прежде всего, это последствия накипеобразования и сдвига карбонатно-кальциевого равновесия. По этой причине значения рН в сбросных водах АЭС может повышаться. Например, в водоеме-охладителе Калининской АЭС в начальный период работы станции (1984-1989 гг.) рН в водной массе циркуляционного течения возросла с 6,5 до 8,0 [4].

2. *Изменения в химическом составе вод, обусловленные гибелью организмов, вовлеченных током воды в систему водоснабжения.* Известно, что значительная часть планктона и мальков рыб, попавших в систему, травмируется и погибает. В результате разрушения их тел в воду попадает значительное количество органических веществ [4].

3. *Изменения в химическом составе вод, вызванные образованием перифитона на внутренней поверхности водоводов* происходят вследствие двух различных процессов: *жизнедеятельности* организмов и их *отмирания*. С одной стороны, основным источником существования мощных бактериальных обрастаний, возникающих на поверхности теплообменников и других узлов и состоящих пре-

имущественно из сапрофитных микроорганизмов, является органическое вещество, поступающее из водоема-охладителя и изымаемое микроорганизмами из проходящей через систему воды [5]. С другой стороны, жизнедеятельность организмов всегда сопровождается и выделением различных веществ в воду (бактериальной слизи и др.). В конкретный момент времени может превалировать один из этих процессов. Изменения в химическом составе вод в периоды массовой гибели обитающих внутри системы водоснабжения организмов, происходят вследствие повышения температуры воды в системе до критического для перифитона уровня.

Учитывая огромную суммарную площадь внутренней поверхности систем охлаждения и значительную мощность бактериальных обрастаний, можно предположить, что в зависимости от условий эти факторы вызывают как снижение концентрации органического вещества, за счет его потребления бактериями, так и увеличение концентрации органического вещества в результате их отмирания (например, при максимальном подогреве) и попадания в воду прижизненных выделений.

Характер воздействия перечисленных выше факторов, с одной стороны, зависит от качества вод, поступающих в систему водоснабжения АЭС, с другой — от степени нагрева этих вод внутри системы. По этой причине характер трансформации органических веществ зависит как от природных факторов: гидрохимического состава вод, внутриводоемных гидробиологических процессов (например, цветения фитопланктона), гидрометеорологических условий, сезона года (прежде всего, температуры поступающей в систему воды), так и от режима работы электростанции. Комбинация этих факторов в конкретный момент времени носит различный характер, поэтому наблюдаемый результат их совокупного воздействия весьма непостоянен. Например, содержание органического вещества на сбросе из системы по сравнению с водозабором может, как возрастать, так и снижаться (табл. 1).

*4. Изменение в химическом составе вод в результате совокупного воздействия интенсивной аэрации, перемешивания и высокой температуры на выходе из системы водоснабжения.* В таких условиях интенсивность процессов окисления существенно возрастает и концентрация продуктов этих реакций (например, нитратов) увеличивается. Одновременно может отмечаться снижение содержания в воде легкоокисляющихся и летучих соединений, например, аммиачного азота.

**Безопасность энергетических сооружений**

Таблица 1

**Средние значения показателей перманганатной окисляемости (ПО) и бихроматной окисляемости (БО) на водозаборе и сбросе АЭС**

Месяц, год	ПО, мгО/л		БО, мгО/л	
	Водозабор	Сброс	Водозабор	Сброс
1	2	3	4	5
<b>В о д о е м - о х л а д и т е л ь К а л и н и н с к о й А Э С</b>				
Август, 1994	15,8±3,2	20,7±6,4	46,9±5,5	41,8±5,5
Ноябрь, 1994	8,4±1,3	10,5±1,8	26,9±4,1	31,6±8,2
Июнь, 1995	16,5±2,3	25,2±3,7	29,4±2,5	36,5±4,0
Октябрь, 1995	7,9±1,6	10,5±1,4	27,6±5,2	22,7±4,4
<b>В о д о е м - о х л а д и т е л ь К у р с к о й А Э С</b>				
Апрель, 1989	4,1±0,2	6,1±0,4	16,0±0,5	12,0±2,3
Октябрь 1989	6,2±0,2	5,2±0,3	20,0±3,2	48,0±7,2
Февраль, 1990	2,9±0,2	4,1±0,4	10,0±0,5	9,0±1,1
Июль, 1990	5,2±0,3	5,2±0,4	10,0±1,1	16,0±2,2
Октябрь, 1990	12,2±0,8	10,2±0,9	22,0±1,6	32,0±4,0
Март, 1991	7,6±0,2	5,5±0,3	44,0±0,3	34,0±1,9
Июнь, 1991	6,2±0,4	7,2±0,6	30,0±3,5	12,0±1,0
Август, 1991	6,6±0,7	6,5±0,7	40,0±3,6	60,0±5,5
Сентябрь, 1995	7,2±0,5	6,9±0,7	40,0±3,4	72,0±7,5
Февраль 2000	3,4±0,3	3,4±0,3	11,5±2,0	11,2±1,8
Апрель 2000	10,2±0,2	12,0±0,5	26,5±2,2	28,0±3,0
Июль 2000	5,5±0,4	4,5±0,2	28,0±2,0	27,6±2,0
Октябрь 2000	16,8±0,4	14,0±0,8	20,4±2,2	18,0±2,0
Май, 2001	8,7±0,4	12,4±0,3	32,0±3,0	32,4±3,5
Ноябрь, 2001	10,6±0,5	12,2±0,8	39,5±4,2	58,3±6,1
Июнь, 2002	12,0±0,2	12,2±0,5	48,0±2,0	48,4±3,2
Август, 2002	8,2±0,2	9,0±0,5	50,2±2,4	50,4±3,3
Ноябрь, 2002	9,4±0,3	7,6±0,6	48,0±2,0	48,0±3,7
Май, 2003	9,6±0,2	10,4±0,4	32,2±2,7	32,8±2,0
Июль, 2003	8,8±0,2	8,8±0,3	31,0±2,5	30,0±2,0
Август, 2003	5,0±0,2	5,6±0,2	26,3±2,1	27,3±2,3
Февраль, 2004	7,3±0,3	8,1±0,2	28,2±2,2	24,4±2,2
Июнь, 2004	6,1±0,3	6,1±0,2	36,3±2,7	44,5±2,8
Август, 2004	5,1±0,2	5,6±0,4	32,0±3,0	28,6±2,8
Октябрь, 2004	5,2±0,4	5,0±0,2	32,5±3,0	36,8±2,5
Март, 2005	7,2±0,1	7,5±0,2	44,0±2,0	44,4±2,2
Июнь, 2005	6,2±0,2	5,8±0,2	40,6±2,4	44,3±2,7
Август, 2005	8,9±0,2	8,5±0,3	44,2±2,6	44,2±2,2
Октябрь, 2005	5,5±0,2	5,3±0,3	40,7±3,3	36,0±2,5

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
В о д о е м - о х л а д и т е л ь С м о л е н с к о й А Э С				
Июль, 1999	10,0±0,5	11,5±0,3	29,5±2,5	24,2±1,9
Август, 1999	10,4±0,2	9,3±0,4	20,0±3,0	20,0±3,6
Ноябрь, 1999	7,2±0,2	10,0±0,2	34,5±3,5	30,0±2,8
Февраль, 2000	6,2±0,4	6,0±0,1	18,4±2,3	18,6±1,7
Апрель, 2000	12,8±0,4	14,6±0,3	31,8±2,0	30,2±2,0
Август, 2000	12,6±0,3	8,5±0,07	26,8±4,1	20,4±4,0

**Планктон.** При обсуждении вопроса о воздействии работы промышленных систем охлаждения на планктон, как правило, все внимание концентрируется на оценке процента гибели и травмирования организмов во время их прохождения через различные технические узлы. Действительно, роль этого фактора весьма важна. Например, известно, что в зависимости от состава планктонных организмов их гибель в системах техводоснабжения может составлять до 80% [10, 11]. Очевидно, что этот процесс не может не оказывать существенного влияния на состав планктона, а, учитывая, что планктонный образ жизни ведут личиночные формы многих донных организмов, то и на состав бентических сообществ. Высокий уровень смертности может наблюдаться также у мальков и личинок рыб.

Вместе с тем, как показали результаты наших многолетних исследований, проведенных на водоемах-охладителях различных АЭС, изменения в составе планктона, возникающие при прохождении вод через технические агрегаты, не исчерпываются только гибелью и травмированием организмов, засасываемых вместе с водой. Во время эксплуатации на внутренней поверхности контактирующих с водной средой технических агрегатов практически во всех случаях формируется сообщество перифитонных организмов.

Несмотря на повсеместную распространенность подобных явлений, этот экологический аспект воздействия систем охлаждения, в большинстве случаев почти не рассматривается. Такой односторонний подход к проблеме объясняется, прежде всего, тем, что целью большинства экологических исследований являлось определение «потерь», характеризующих негативные явления, связанные с функционированием технических узлов. Напротив, появление дополнительного количества каких-либо организмов после прохождения через систему водоснабжения игнорировалось. Вместе с тем этот вопрос не менее важен, так как оценка экологического состояния водоема во многом основывается на составе обнаруженных в

нем организмов. Присутствие в планктоне значительного количества организмов, смытых из перифитона системы водоснабжения, может существенно исказить результаты этих оценок.

Основными группами планктонных организмов являются бактериопланктон, фитопланктон и зоопланктон. Воздействие работы системы техводоснабжения на каждую из этих групп существенно отличается, поэтому его следует рассмотреть в отдельности.

**Бактериопланктон.** Ранее считалось, что бактериальные клетки проходят через системы охлаждения ТЭС и АЭС, не испытывая каких-либо заметных негативных воздействий [9]. Однако, как показали проведенные нами экспериментальные исследования [12], резкое повышение температуры при прохождении воды через конденсаторы, может сопровождаться гибелью определенной части бактериопланктона. Вместе с тем, общая численность бактериопланктона и, в особенности, численность гетеротрофных бактерий в районах сброса часто возрастает в несколько раз (табл. 2). Подобное увеличение численности в большинстве случаев обычно объясняют интенсификацией темпов размножения микроорганизмов в условиях повышенной температуры, не учитывая, что время генерации бактерий (отрезок времени, в течение которого численность бактерий может удвоиться за счет их размножения) составляет в этих условиях не менее 4 — 6 часов [5]. Учитывая то, что время прохождения воды через агрегаты станций при нормальном режиме работы АЭС не превышает 1 — 2 часов, невозможно предположить, что многократное увеличение численности микроорганизмов в сбросных водах происходит только за счет их размножения в воде. Более вероятное объяснение заключается в том, что это является результатом жизнедеятельности сообщества микроперифитона. По мере развития бактериальной пленки на внутренней поверхности водоводов, часть микроорганизмов отрывается и с течением воды выносится из системы. Такое предположение подтверждается результатами, полученными при исследовании водоема-охладителя Читинской ГРЭС [13], а также материалами изучения биологических помех, возникающих при эксплуатации систем охлаждения ТЭС и АЭС [14]. Согласно этим данным, одним из основных компонентов биологических образований теплообменных аппаратов являются именно бактерии. Характерной особенностью является то, что общая численность бактерий в перифитоне увеличивается на сбросе из системы охлаждения (по сравнению с другими участками) в 4,5 раза, а количество гетеротрофных бактерий — в 48 раз. По-видимому,

Таблица 2  
Средние значения общей численности бактериопланктона ( $10^6$  клеток/мл) и численности гетеротрофных бактерий ( $10^6$  КОЭ/мл).

Месяц, год	Общая численность		Численность гетеротрофов	
	Водозабор	Сброс	Водозабор	Сброс
В о д о е м - о х л а д и т е л ь К у р с к о й А Э С				
Февраль, 1990	0,3±0,02	2,5±0,03	0,8±0,07	51,6±4,8
Июль, 1990	2,8±0,02	12,6±1,20	24,7±4,5	248,9±12,9
Март, 1991	1,0±0,02	2,0±0,02	2,2±0,14	32,5±2,9
Август, 1991	3,0±0,01	10,0±1,19	60,4±5,7	120,5±5,8
Сентябрь, 1995	6,1±0,05	16,5±1,31	30,1±2,0	59,2±5,6
Октябрь, 1999	55,5±1,7	57,4±4,2	30,6±2,8	160,7±9,1
Февраль, 2000	12,1±1,2	9,6±2,0	6,2±3,5	30,7±2,9
Май, 2001	2,31±0,07	1,76±0,04	1,1±0,07	10,7±0,95
Ноябрь, 2001	4,15±0,06	5,15±1,06	1,9±0,08	7,1±0,66
Июнь, 2002	5,1±0,32	11,9±0,16	--	--
Август, 2002	1,2±0,02	2,1±0,05	5,2±0,47	69,2±4,0
Ноябрь, 2002	1,4±0,03	4,9±0,05	--	--
Май, 2003	3,15±0,05	9,77±0,07	6,0±0,58	185,5±12,0
Июль, 2003	4,83±0,04	6,32±0,04	6,6±0,43	165,9±10,5
Август, 2003	5,18±0,11	8,09±0,06	--	--
Февраль, 2004	0,6±0,03	2,2±0,10	4,7±0,30	26,5±2,2
Июнь, 2004	1,5±0,03	3,8±0,12	9,6±0,36	42,5±2,5
Август, 2004	2,6±0,04	28,5±1,27	22,0±0,90	740,0±28,0
Октябрь, 2004	1,3±0,02	2,6±0,18	8,2±0,33	62,2±4,9
Март, 2005	1,1±0,02	1,2±0,03	4,7±	32,2±0,29
Июнь, 2005	2,1±0,02	5,0±0,06	9,2±0,42	112,0±6,5
Август, 2005	3,3±0,04	25,1±0,17	6,0±0,43	96,3±6,0
Октябрь, 2005	2,5±0,03	6,3±0,22	7,4±0,19	118,4±8,4
В о д о е м - о х л а д и т е л ь К а л и н и н с к о й А Э С				
Август, 1994	6,4±0,31	8,8±0,55	12,9±1,2	162,1±9,0
Сентябрь, 1994	0,6±0,02	1,5±0,10	5,6±0,33	28,4±1,9
Июль, 1995	1,7±0,02	3,4±0,18	6,9±0,36	22,4±1,9
Октябрь, 1995	0,4±0,01	1,4±0,16	3,0±0,27	76,0±2,4
В о д о е м - о х л а д и т е л ь С м о л е н с к о й А Э С				
Июль, 1999	24,3±1,3	41,9±2,2	1,4±0,07	12,5±2,0
Август, 1999	31,4±2,9	35,0±3,2	0,6±0,01	45,0±2,2
Февраль, 2000	3,8±0,8	9,8±0,9	0,02±0,01	0,04±0,02



### Безопасность энергетических сооружений

последним обстоятельством и обусловлено резкое увеличение доли гетеротрофных бактерий в общей численности бактериопланктона в районах сбросов АЭС.

В районах сброса подогретых вод, при относительно низком уровне загрязненности бытовыми и фекальными стоками, также наблюдается высокая численность условно-патогенной микрофлоры (табл. 3). Неоднократно высказывалось мнение, что, высокая численность патогенных микроорганизмов на этих участках обусловлена явлением так называемого «вторичного роста», которое заключается в том, что бактерии, не развивающиеся в природных водоемах, находят благоприятные условия для своего развития в местах сброса подогретых вод [15, 16]. Однако, учитывая непродолжительность пребывания вод в системе охлаждения АЭС, объяснять увеличение численности микроорганизмов только этой причиной нельзя. Можно предположить, что процессы «вторичного роста» происходят не только непосредственно в воде, но и в сообществах микроперифитона, сформировавшегося на внутренней поверхности агрегатов системы охлаждения во время эксплуатации АЭС [17].

Постоянный сброс подогретых вод АЭС вызывает увеличение температуры и обуславливает возникновение мощного течения, уносящего бактериальные клетки на значительное расстояние. Таким образом, под воздействием работы системы охлаждения происходит формирование не только бактериопланктона в районе сброса, но и на участках акватории удаленных от него, куда сбросные воды поступают через какое-то время. В экологической литературе для обозначения процессов выноса и приноса в экосистему различных частиц используются термины «экспульверизация» и «импульверизация». По аналогии с этим явление, заключающееся в искусственном распростра-

Таблица 3  
Средние значения коли-индекса на водозаборе и сбросе Смоленской АЭС

Месяц, год	Коли-индекс, клеток/л	
	Водозабор	Сброс
Июль, 1999	110	1250
Август, 1999	40	>2400
Октябрь, 1999	50	240
Ноябрь, 1999	20	50
Декабрь, 1999	10	10
Февраль, 2000	<10	10

нении по акватории водоема-охладителя планктонных организмов, развившихся на поверхности технических агрегатов АЭС, можно назвать «биотехнопульверизацией» [6].

**Фитопланктон.** На организмы фитопланктона попадание в промышленные системы водоснабжения оказывает негативное воздействие. Возможно, что механические воздействия и тепловой стресс приводят к гибели некоторой части водорослей. По нашим наблюдениям некоторые крупноразмерные виды перидиниевых водорослей, отмеченные в районах водозабора Курской и Смоленской АЭС, не были обнаружены в пробах, одновременно взятых из сбросных вод. Большинство клеток фитопланктона в пробах из районов водосбросов не имело видимых повреждений. Вместе с тем, прохождение через агрегаты АЭС заметно сказывалось на их физиологическом состоянии. Об этом, в частности, свидетельствует резкое снижение интенсивности фотосинтеза в местах сброса подогретых вод [18, 7].

Также как и в случае с бактериопланктоном, в формировании фитопланктона водоемов-охладителей заметную роль играют процессы биотехнопульверизации. В отличие от внутренних частей системы охлаждения, на поверхностях стенок открытых участков сбросных каналов в сообществе перифитона важным компонентом являются водоросли. Их клетки также по мере роста отрываются от субстрата и разносятся течением по значительной акватории. Об этом, в частности, свидетельствуют данные, характеризующие распределение различных экологических групп диатомовых водорослей в Десногорском водохранилище, нижняя часть которого служит водоемом-охладителем Смоленской АЭС (табл. 4).

Таблица 4

*Распределение экологических групп диатомовых водорослей в различных частях Десногорского водохранилища в летний период 1999 г.*

Участок акватории	Процент видов различных групп диатомовых водорослей		
	Планктонные формы	Планктоперифитонные формы	Перифитонные формы
Районы выхода сбросных каналов	12	35	53
Середина нижней части Десногорского водохранилища	16	52	32
Середина верхней части Десногорского водохранилища	49	38	13

Наибольший процент перифитонных видов диатомовых отмечен в пробах, отобранных поблизости от выходов обоих сбросных каналов АЭС. Аналогичное повышение количества в воде перифитонных водорослей в районах выходов сбросных каналов отмечались на других водоемах-охладителях [19].

**Зоопланктон.** Многочисленные литературные данные свидетельствуют о том, что значительный процент представителей зоопланктона травмируется при прохождении вод через промышленные системы охлаждения [20, 21, 10]. Однако, как показывают результаты наших исследований, проведенных на водоемах-охладителях Курской, Калининской и Смоленской АЭС, далеко не во всех пробах зоопланктона из районов сброса обнаруживается заметное количество травмированных особей. Это, по-видимому, объясняется тем, что при оборотной системе водоснабжения основная водная масса циркуляционного течения периодически проходит через систему охлаждения через относительно короткий период времени. В связи с этим, виды зоопланктона, в наибольшей степени подверженные травматизму, в циркуляционных водах встречаются редко. Об этом свидетельствуют изменения в характере распределения зоопланктона, наблюдающиеся при превращении естественного водоема в водоем-охладитель АЭС [4]. Формы, становящиеся доминантами в водной массе циркуляционного течения, как правило, более толерантны к техногенным воздействиям. В связи с этим общий процент травмированных в системе водоснабжения особей зоопланктона, весьма высокий в начальный период эксплуатации водоема-охладителя, постепенно снижается. Например, в настоящее время в системе охлаждения Курской АЭС гибель зоопланктона, как правило, не превышает 45% от численности организмов на водозаборе (табл. 5). В большинстве случаев этот процент существенно ниже. В отдельные периоды гибель зоопланктона здесь составляет всего 3 – 5%, что меньше его выедания рыбами в естественных условиях. Снижение процента гибели зоопланктона по мере развития экосистем водоемов-охладителей отмечено и другими исследователями [22]. Например, если в начале эксплуатации гибель зоопланктона в системе охлаждения Змиевской ГРЭС (Украина) составляла 75 – 80%, то в последующий период она снизилась до 20%.

Процессы биотехнопulверизации в распределении зоопланктона играют несколько меньшую роль, чем у других групп планктонных организмов. Но, вместе с тем, этот фактор здесь также имеет немаловажное значение. Существенную, а в ряде случаев

Таблица 5

Процент травмированных особей планктонных ракообразных  
в районе сброса Курской АЭС

Месяц, год	%	Месяц, год	%
Октябрь 1999	12,4	Май 2003	11,9
Февраль 2000	2,3	Июль 2003	23,0
Апрель 2000	12,7	Август 2003	29,8
Октябрь 2000	21,0	Февраль 2004	3,6
Июль 2001	20,7	Июнь 2004	17,5
Июль 2000	20,7	Август 2004	12,8
Май 2001	50,0	Октябрь 2004	20,5
Ноябрь 2001	36,8	Март, 2005	5,1
Июнь 2002	33,5	Июнь, 2005	22,7
Август 2002	22,7	Август, 2005	42,0
Ноябрь 2002	6,8	Ноябрь, 2005	9,9

преобладающую группу зоопланктона континентальной и неритической зон морских водоемов, составляют планктонные личинки донных и перифитонных организмов, так называемый пелагический ларватон. Влияние работы технических систем водоснабжения на эту часть планктона носит особый характер. На внутренних поверхностях водоводов практически всегда развивается зооперифитон. Обитающие здесь беспозвоночные, выметывая своих личинок в воду, могут вызывать значительное увеличение общей биомассы зоопланктона на выходе из системы, даже в том случае, если часть собственно планктонных (эупланктонных) организмов в этих условиях погибает. Интересные наблюдения были сделаны при исследовании Севастопольской ТЭЦ [23]. При прохождении вод через систему водоснабжения этой электростанции численность личинок обрастателей (моллюсков, усоногих ракообразных и др.) увеличивалась в 200 – 300 раз. Причем, если в естественных условиях большинство из этих перифитонных организмов выметывает личинок только в теплое время года, то в условиях постоянного подогрева эти формы переходили к круглогодичному размножению. Таким образом, в результате биотехнопulверизации личинки обрастателей в массовом количестве отмечались в зимнем планктоне Севастопольской бухты.

#### Выводы

Резюмируя изложенные выше результаты исследований, можно прийти к заключению, что воздействие работы промышлен-

ных систем водоснабжения на планктон водоемов складывается как минимум из двух разнородных процессов. Во-первых, это механические и физико-химические негативные воздействия, которые испытывают планктонные организмы при прохождении через технические агрегаты. Во-вторых, это биотехнопульверизация организмов, развивающихся в сообществах перифитона на внутренних поверхностях технических узлов. Эти организмы постоянно в массовом количестве также присутствуют в планктоне водоемов, куда производится сброс вод из систем водоснабжения, и составляют его важную часть.

Таким образом, состав планктона водоемов-охладителей, в отличие от обычных водоемов, не является одним из показателей внутриводоемных процессов, а отражает сложный характер взаимодействий в природно-техногенной системе «АЭС — окружающая среда». В связи с этим, многие нормативы и методы оценки качества водной среды, разработанные на других водоемах, здесь могут найти только ограниченное применение. Их механическое использование дает искаженное представление об экологическом состоянии водоема. Например, значения общей численности бактерий в воде и, в особенности, численности сапрофитов (гетеротрофных бактерий), как правило, прямо пропорциональны уровню загрязнения водоема. Поэтому, эти показатели включены в число основных критериев оценки качества водной среды. Исходя из стандартных санитарно-микробиологических нормативов, во многих случаях воду на сбросе из систем техводоснабжения АЭС можно отнести к сильно загрязненной, что ни в коей мере не соответствует реальному уровню ее загрязнения, определенному на основе результатов гидрохимических показателей [3].

Следовательно, двойственный характер воздействия работы промышленных систем охлаждения на планктон обязательно должен учитываться при проведении экологической экспертизы и экологического мониторинга. В противном случае, игнорирование эффектов биотехнопульверизации при интерпретации данных может значительно исказить оценку ситуации, реально существующей в водоеме.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Безносков В.Н., Васенко А.Г., Егоров Ю.А., Леонов С.В., Лунгу М.Л., Побединский Н.А., Румянцева Е.А., Старко Н.В., Суздальева А.Л., Чекалин Б.С. Ретроспективный анализ и характеристика современного состояния гидробиоценозов водоема-охладителя Курской АЭС и рек

- Сейм и Реут. //Экология регионов атомных станций. 1995. Вып. 4.
2. Безносков В.Н., Кучкина М.А., Суздалева А.Л. Исследование процесса термического эвтрофирования в водосмах-охладителях АЭС. // Водные ресурсы. 2002. Т.29. 5.
  3. Суздалева А.Л., Побединский Н.А. Основные результаты исследования распределения бактериопланктона в водоеме-охладителе Курской АЭС. //Экология регионов атомных станций. Вып. 5. М.: Атомэнергопроект. 1996.
  4. Суздалева А.Л., Безносков В.Н. Изменение гидрологической структуры водоемов при их превращении в водоемы-охладители атомной (тепловой) электростанции. //Инженерная экология. 2000. 2.
  5. Суздалева А.Л. Влияние циркуляционных водных масс АЭС на распределение бактериопланктона в водоемах-охладителях //Водные ресурсы. 2001а. Т.28. 3.
  6. Суздалева А.Л. Воздействие сброса вод из систем охлаждения АЭС на планктон водоемов //Инженерная экология. 2001б. 4.
  7. Суздалева А.Л. Структура и экологическое состояние природно-техногенных систем водоемов-охладителей АЭС //Автореферат диссертации доктора биол. наук. М.: МГУ. 2002.
  8. Попов А.В., Суздалева А.Л., Горюнова С.В., Безносков В.Н. Экологические механизмы возникновения биологических помех в системах технического водоснабжения АЭС и ТЭС //Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Экология и безопасность жизнедеятельности». 2001. 5.
  9. Кучкина М.А. Особенности процессов эвтрофирования в водоемах-охладителях АЭС. Автореф. дисс. канд. наук. М.: Российский университет дружбы народов. 2004.
  10. Мордухай-Болговской Ф.Д. Проблема влияния тепловых и атомных электростанций на гидробиологический режим водоемов. //Тр. Ин-та биол. внутр. вод. Вып. 27 (30). Экология организмов водохранилищ-охладителей. Л.: Наука. 1975.
  11. Протасов А.А. Экологические и инженерные аспекты управления качеством воды в водоемах-охладителях и снижения отрицательного влияния внутриводоемных процессов на работу электростанций // Гидробиология водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций Украины. Киев: Наукова думка. 1991.
  12. Суздалева А.Л. Экспериментальное исследование термотолерантности бактериопланктона водоемов-охладителей АЭС //Водные ресурсы. 1998. Т.25. 6.
  13. Спиглазов Л.П., Серебрякова М.С. Микробиология оз.Кенон как водоема-охладителя Читинской ТЭЦ. //Экология городского водоема. Новосибирск: Изд-во Сибирск. отд. РАН. 1998
  14. Афанасьев С.А. Биологические помехи в водоснабжении электростанций. //Гидробиология водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций Украины. Киев: Наукова думка. 1991.

15. Булашев А.Я., Лоскутов Н.Ф., Лошаков Ю.Т. Влияние подогретых вод на санитарный режим водоема. //Влияние тепловых электростанций на гидрологию и биологию водоемов. Борок: ИБВВ. 1974.
16. Ленчина Л.Г. Бактериопланктон. //Гидробиология водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций Украины. Киев: Наукова думка, 1991.
17. Суздалева А.Л., Горюнова С.В., Безносков В.Н., Побединский Н.А. Проблема санитарно-микробиологического состояния термальных вод при использовании их в сельском хозяйстве. //Вестник Российского университета дружбы народов. Серия Сельское хозяйство. 1999. 5.
18. Шидловская Н.А., Суздалева А.Л., Лихачева Н.Е. Влияние сброса подогретых вод Смоленской АЭС на продукцию фитопланктона Десногорского водохранилища. //Водные экосистемы и организмы - 2. Москва: МАКС-Пресс. 2000.
19. Виноградская Т.А. Фитопланктон. /Гидробиология водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций Украины. Киев: Наукова думка. 1991.
20. Ривьер И.К. Зоопланктон Мошковического залива, подверженного влиянию подогретых вод Конаковской ГРЭС. //Симп. по влиянию подогретых вод теплоэлектростанций на гидрологию и биологию водоемов. Борок: ИБВВ. 1971.
21. Поливанная М.Ф., Сергеева О.А. Зоопланктон водоемов-охладителей тепловых электростанций Украины. //Гидрохимия и гидробиология водоемов-охладителей тепловых электростанций СССР. Киев: Наукова думка. 1971.
22. Бондаренко Т.А., Васенко А.Г., Игнатенко Л.Г., Лунгу М.Л., Старко Н.В. Экологические аспекты функционирования водохозяйственного комплекса при Курской АЭС. //Экология регионов атомных станций. Вып. 2. М.: ГНИПКИИ Атомэнергопроект, 1994.
23. Шадрин Л.А., Близинок Н.А., Ковальчук Ю.Л. Зоопланктон – экотоксикологический индикатор системы защиты от обрастания. //Биоповреждения, обрастание и защита от него: Климатические, биохимические и экотоксикологические факторы. М.: Наука. 1996.

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МАЛЫХ ГОРОДСКИХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ И ПУТИ ИХ ИНЖЕНЕРНО- ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ОБУСТРОЙСТВА

*Безносов В.Н., доктор биол.наук), Родионов В.Б. кандидат техн. наук (ОАО НИИЭС, к.т.н.), Суздалева А.А., кандидат техн.наук (ООО «Альфамед 2000»), Колесникова Е.Л., инженер (ОАО НИИЭС)*

Состояние городских водоемов и водотоков во многом определяет видеоэкологический потенциал территории и ее социальную привлекательность. Малые водные объекты, подверженные неконтролируемому загрязнению, способны существенно ухудшить санитарно-эпидемиологическую обстановку в городах. Таким образом, их состояние – это один из факторов, определяющих степень благоприятности условий жизни городского населения. Улучшение состояния малых водных объектов является первоочередной задачей обустройства городской территории [1]. Однако научная база, необходимая для успешной реализации подобных программ, разработана относительно слабо. Не существует даже общепринятого определения понятия «малый городской водный объект». В настоящей статье под данным термином понимается водоемы и водотоки, частично или полностью расположенные на урбанизированной территории, размеры которых сопоставимы с основными элементами городской застройки (зданиями, сооружениями, транспортными магистралями).

Большинство малых городских водных объектов в настоящее время находятся на такой стадии антропогенной деградации, что одних только природоохранных мер для приведения их в состояние, отвечающее требованиям комфортного проживания людей, недостаточно. Связано это с тем, что уровень антропогенного воздействия, оказываемый на расположенные в городах небольшие реки, озера и пруды, несопоставим с возможностями их экосистем к самоочищению и самовосстановлению. Реальных результатов можно достигнуть только путем их инженерно-экологического обустройства, то есть осуществления специальных инженерно-технических мероприятий по возвращению им экологически приемлемых свойств и качеств [2, 3, 4]. Однако как показывает практика, успех в этой области может быть достигнут только в том случае, если разработка проектов осуществляется на основе детальных экологических исследований, позволяющих оценить современное состояние водного объекта, а также определить цели и



возможные способы его обустройства, среди которых можно выделить следующие основные направления [5]:

*охрана* — научно обоснованный регламент хозяйственной деятельности, основанный на запретительных и разрешительных мерах. Например, это организация водоохраных зон и контроль за соблюдением их режима;

*защита* — научно обоснованные меры инженерного воздействия с целью изоляции и/или локализации источника возмущения (загрязнения, истощения, подтопления и т. п.). К числу таких мер можно отнести строительство очистных сооружений поверхностного стока, инженерное оборудование различных объектов в прибрежной зоне водоема и его водосборного бассейна, представляющих собой реальные или потенциальные источники ухудшения качества водной среды (свалки, кладбища и т. п.);

*консервация* — комплекс мероприятий, направленных на сохранение облика водного объекта, существующего в данный момент времени. Этот вид деятельности включает меры по поддержанию санитарно-гигиенических показателей и профилактические ремонтные работы гидротехнических сооружений, обеспечивающих существование данного объекта (плотин, шлюзов и др.). Консервация может применяться как для хорошо сохранившихся водных объектов, обладающих высоким видеоэкологическим потенциалом, так и для водоемов, имеющих культурно-историческое значение, но находящихся в критическом состоянии, когда дальнейшее развитие негативных тенденций приведет уже к необратимым изменениям. В последнем случае консервация водного объекта проводится, когда его восстановление в данный момент времени невозможно или нецелесообразно по экономическим или социальным причинам;

*реабилитация* — научно обоснованный комплекс мер, направленный на возвращение водным объектам экологически приемлемых свойств и качеств, обеспечивающих надлежащий уровень социальной привлекательности территории для проживания городского населения. К этой категории относятся различные проекты инженерного обустройства водных объектов, направленные на улучшение их экологического состояния, а также повышение видеоэкологического и рекреационного потенциала окружающей территории в целом;

*реставрация* — деятельность, целью которой является придание водному объекту облика, свойственного ему в конкретную историческую эпоху. Реставрация может осуществляться

только при условии наличия исторических документов, подтверждающих архитектурно-композиционный облик водного объекта. В отличие от реабилитации реставрация включает работы по восстановлению строений, гидротехнических сооружений, элементов паркового дизайна, формирующих исторический облик данного водоема;

*реконструкция* — инженерные мероприятия, целью которых является приспособление водного объекта к современным условиям с сохранением его исторически или мемориально ценных элементов. Реконструкция применяется в двух случаях. Во-первых, для обустройства частично или плохо сохранившихся водных объектов, когда достаточно обоснованные историко-архивные документы, касающиеся их, отсутствуют. В этом случае при выполнении реконструктивных работ допускается использование аналогов или приемов оформления его композиций, характерных для определенного периода существования (эпохи) данного городского водного объекта. Во-вторых, проведение реконструкции водного объекта бывает необходимо тогда, когда условия, сформировавшиеся на окружающей его территории, делают невозможным его дальнейшее существование без проведения специальных инженерных мероприятий. К числу последних можно отнести, например, подпитку водных объектов из систем водоснабжения, организацию систем искусственной циркуляции и др.;

*изоляция* — инженерное обустройство берегов водного объекта, исключающее или ограничивающее доступ к нему населения;

*ликвидация* — комплекс инженерно-технических мероприятий, целью которых является уничтожение нежелательного водоема или водотока, как поверхностного водного объекта.

Несмотря на кажущуюся простоту, оценка состояния малого городского водного объекта и, соответственно, выбор способа его инженерно-экологического обустройства на практике часто вызывает определенные затруднения. Связано это с тем, что помимо экологического аспекта проблемы, практически всегда здесь присутствует еще ряд других: медицинский, культурно-исторический, технико-эксплуатационный, социально-психологический. Очевидно, что в зависимости от выбранной точки зрения будет существенно отличаться и выбор путей улучшения экологического состояния водных объектов. Так, основной целью мероприятий экологической реабилитации каких-либо природных объектов является восстановление ранее существовавших естественных экосистем. Подобный взгляд иногда высказывается при об-

суждении проектов восстановления и сохранения водных объектов, расположенных на урбанизированных территориях. Однако в отношении малых городских водоемов и водотоков данный принцип по целому по ряду причин неприменим. Во-первых, большинство городских водоемов имеет искусственное происхождение — это пруды, создававшиеся людьми для удовлетворения своих нужд. Исходных естественных экосистем в них как таковых никогда не существовало. Более того, без периодического проведения специальных мероприятий (расчистки, ремонта водосливов и др.) многие городские пруды прекратили бы свое существование.

Во-вторых, важнейшим фактором формирования исторического облика малых городских водоемов является характер их хозяйственного использования. Поэтому, например, программы реабилитации городских рек помимо мероприятий, направленных на улучшение их экологического состояния, часто предусматривают и восстановление старинных гидротехнических сооружений, например, мельничных запруд [2, 4, 6].

В-третьих, принципиальное отличие городских водоемов и водотоков от аналогичных природных водных объектов заключается в том, что они являются не частью природного комплекса (макроэкосистемы данного региона), а входят в состав определенной урбосистемы. Урбосистемы принципиально отличаются от природных экосистем. Это динамично развивающиеся природно-антропогенные системы, состоящие из архитектурно-строительных объектов и трансформированных компонентов природной среды. Урбосистемы являются средой обитания людей, проживающих в городах, и создаются именно для них. Даже сохраняющиеся на урбанизированных территориях элементы природной среды (парковые зоны и др.) предназначаются, прежде всего, для создания благоприятной среды обитания городского населения. Как правило, истинной целью мероприятий, направленных на поддержание природных элементов урбосистем, является не восстановление в них природных сообществ, а сохранение их рекреационного потенциала и видеозэкологических свойств. Для этого, например, во всех парках проводятся расчистки территории от нежелательной растительности, на берегах озер, попавших в зону городской застройки, ликвидируются заболоченные участки и т.д.

В-четвертых, основная цель мероприятий по улучшению состояния городского водного объекта заключается в создании условий, обеспечивающих его использование городским населением.

ем для удовлетворения своих нужд. При этом следует учесть, что на современном этапе характер использования почти всех городских водных объектов принципиально изменился. Например, на протяжении последних 4 — 50 лет из московских речек и прудов уже не берут воду для хозяйственных нужд и тем более для питья, не используют их для производства энергии, практически не используется и рыбохозяйственный потенциал. Изменилось даже рекреационное использование: многие из этих водных объектов сейчас уже не используются для купания, как всего несколько десятилетий назад. Следовательно, сохранение или восстановление городского водного объекта не подразумевает восстановление на нем тех видов водопользования, которые были в предшествующие исторические эпохи. В настоящее время малые городские водные объекты используются главным образом в одном направлении — рекреационном.

Таким образом, на основании изложенного выше можно сделать заключение, что на современном этапе основным критерием при оценке состояния городских водных объектов и при разработке мероприятий по их реабилитации является их рекреационная значимость. Под этим понятием мы подразумеваем не только степень соответствия состояния водного объекта санитарно-гигиеническим нормам, допускающим пребывание на нем людей, но и способность данного объекта удовлетворять эстетическим, видеоэкологическим и социально-психологическим потребностям городского населения.

Очевидно, что рекреационная значимость отдельных водных объектов может существенно различаться. Поэтому необходимым условием разработки методологии их инженерно-экологического обустройства является их ранжирование по данному критерию, то есть классификация, позволяющая отнести любой городской водный объект к определенной категории.

Предлагаемая классификация применима ко всем малым городским водным объектам (водоемам и водотокам) вне зависимости от их происхождения. При этом следует особо отметить, что, положив в ее основу рекреационную значимость, мы ни в коей мере не умаляем важность значения экологического состояния водных объектов. Водоемы, находящиеся в плохом экологическом состоянии или не отвечающие санитарно-гигиеническим нормам, не могут обладать высокой рекреационной значимостью.

Далеко не всегда программа инженерно-экологического обустройства разрабатывается в отношении существующего водного

объекта. Иногда ее целью является восстановление водоема уже исчезнувшего. Примером может служить наполнение и инженерно-экологическое обустройство высохших или спущенных прудов. Поэтому в классификации в качестве отдельных типов выделяются не только водные объекты, существующие на современном этапе, но и полностью или частично утраченные.

На основании предварительного анализа материалов, осуществляемого в ходе разработки предпроектной документации, любой малый городской водный объект можно отнести к одной и рассмотренных ниже категорий:

*1. Полностью утраченный водный объект.* К данной категории относятся объекты, восстановление которых в современных городских условиях нереально. Необходимость их включения в классификацию обусловлена тем, что решение о возможности или невозможности инженерно-экологического обустройства водного объекта должно основываться на результатах исследований. Присвоение ранее существовавшему водному объекту статуса «полностью утраченный» позволяет исключить его из дальнейших разрабатываемых программ, сосредоточив внимание на тех объектах, которые еще можно восстановить или улучшить.

*2. Временно утраченный водный объект.* К данной категории относятся объекты, в настоящее время практически не существующие, но подлежащие восстановлению путем реализации проектов реабилитации, реконструкции, реставрации.

*3. Фрагментарно сохранившийся водный объект.* К этому типу относятся городские водоемы, сохранившиеся в виде отдельных фрагментов ранее существовавших водотоков (речек и ручьев). В данном случае полностью воссоздать водоток уже нельзя. Вместе с тем, можно восстановить его отдельные фрагменты, сохранившиеся, например, в пределах территории культурно-исторических объектов и рекреационных зон. В г. Москве примерами таких объектов могут служить пруды Московского зоопарка, первоначально образовавшиеся в русле р. Пресни [7] и Чистые пруды, созданные в результате запруживания р. Рачки, когда-то протекавшей вдоль стены Белого города [8].

В некоторых случаях фрагментарно сохранившиеся участки городских малых рек, расположенные в пределах парковых территорий, можно превратить в водоемы рекреационного назначения [3, 5]. Для этого необходимо проведение следующих инженерно-технических, гидромелиоративных и экологических мероприятий:

изоляция реабилитируемого фрагмента речного русла от потока загрязненных вод, поступающих из закрытого участка реки, путем его отвода в систему городской ливневой канализации;

предварительная расчистка и заполнение образовавшегося изолированного фрагмента русла чистой водой из другого источника, создание циркуляционной системы, в которой вода движется по замкнутому контуру, и встраивание технических узлов по очистке и кондиционированию водной среды;

экологический дизайн нового водоема и его реанимация, то есть формирование биотического комплекса (создание зарослей прибрежной растительности на открытых участках контура, зарыбление, организация водопадов-аэраторов и др.), а также частичное восстановление (реконструкция) некоторых природно-ландшафтных особенностей этого участка.

Несомненно, что водоем, возникающий в результате реализации подобной программы, не является восстановленным водотоком, а представляет собой природно-техногенный водный объект, существование которого поддерживается благодаря постоянной или периодической работе циркуляционной системы и водоочистных устройств. В связи с этим, для обозначения подобных проектов нами предложен специальный термин — «имитационные водоемы» [4].

Инженерно-экологическое обустройство фрагментарно сохранившихся водных объектов может осуществляться в виде реабилитации и реконструкции их отдельных изолированных частей.

*4. Рекреационно незначимый водный объект.* Данная категория включает городские водные объекты, берега которых не используются населением в качестве мест отдыха. Наличие такого водоема и водотока на городской территории только ухудшает ее видео-экологические характеристики. Сюда же можно отнести водоемы, неблагоприятные с санитарно-гигиенической точки зрения, сильно замусоренные, загрязненные, от вод которых исходит неприятный запах. Иными словами, «рекреационно незначимый водный объект» — это такой водный объект, который люди не хотели бы иметь в районе своего проживания.

Инженерно-экологическое обустройство рекреационно незначимых водных объектов может осуществляться в виде их реабилитации. В тех же случаях, когда подобные водные объекты представляют собой опасность для здоровья населения, а проведение мероприятий по улучшению их состояния невозможно или нецелесообразно, инженерно-экологическое обустройство заклю-

чается в разработке и осуществлении проектов их ликвидации.

*5. Рекреационно малозначимый водный объект* — городской водоем или водоток, который в силу своего плохого экологического и санитарно-гигиенического состояния не может использоваться для организации рекреационных зон. Видеоэкологическую ситуацию наличие таких объектов на городской территории также не улучшает. Вместе с тем, население использует прибрежную зону, а иногда и сам водный объект, как место отдыха (иногда даже массового) или в иных целях. Во многих случаях неконтролируемое использование таких водных объектов представляет собой опасность для здоровья людей.

Для инженерно-экологического обустройства рекреационно малозначимых объектов возможна разработка проектов реабилитации и экологической защиты.

*6. Рекреационно значимый водный объект*, то есть городской водный объект, находящийся в удовлетворительном экологическом и санитарно-гигиеническом состоянии и используемый населением в рекреационных целях. Эти объекты всегда являются важным видеоэкологическим фактором, формирующим позитивное восприятие от данного участка городской территории в целом.

В отличие от предшествующей категории, отдых в прибрежной зоне подобных водных объектов не представляет собой прямой угрозы для здоровья людей. Вместе с тем, говоря об удовлетворительном состоянии рекреационно значимых водных объектов, мы отнюдь не подразумеваем отсутствие необходимости в его улучшении. Достаточно часто рекреационная значимость не свидетельствует о хорошем экологическом и санитарно-гигиеническом состоянии водного объекта. Как показывает анализ имеющихся материалов, большинство рекреационно значимых городских водоемов в условиях возрастающей антропогенной нагрузки без проведения специальных мероприятий (реабилитации, экологической защиты и охраны) быстро деградирует. В связи с этим, главная задача инженерно-экологического обустройства здесь заключается в достижении соответствия между качеством вод и характером использования данных объектов.

*7. Исторически ценный водный объект.* К данной категории мы относим все городские водные объекты, обладающие помимо рекреационного потенциала, несомненной культурно-исторической ценностью. Как показывает практика, их современное экологическое и санитарно-гигиеническое состояние может быть различным, в том числе и неудовлетворительным. Особенность программ

инженерно-экологического обустройства в данном случае заключается в том, что их целью является не реабилитация, а реконструкция или даже реставрация водного объекта в виде, который он имел в определенную историческую эпоху. Однако следует особо подчеркнуть, что в данном случае речь идет лишь о восстановлении внешнего облика, а не экосистемы водного объекта, существовавшей в ту историческую эпоху. Последнее, в подавляющем большинстве случаев практически невозможно вследствие необратимой трансформации водосборного бассейна. Вместе с тем, обеспечение хорошего (или хотя бы приемлемого) экологического состояния восстанавливаемого объекта не менее важно, чем воссоздание исторического облика. Недоучет этого фактора приводит к появлению сточных канав и накопителей нечистот с художественно оформленными берегами. В конечном счете, в результате ухудшения экологического состояния водного объекта происходит и утрата воссозданного исторического облика. Как уже указывалось выше, связано это с тем, что в условиях современного города скорость процессов самоочищения и самовосстановления водоемов и водотоков несопоставима с количеством поступающих в них загрязнителей. По этой причине хорошее экологическое состояние городских малых водных объектов может быть достигнуто только в том случае, если они представляют собой природно-техногенные или полностью техногенные системы, существование которых поддерживается работой специальных технических систем [9, 10, 11, 12]. Для обозначения предполагаемого состояния водного объекта, которое является целью его инженерно-экологического обустройства, мы предлагаем термин «историко-экологический прототип» [5], подразумевая под этим внешний вид водного объекта или его фрагмента, свойственный водоемам определенной эпохи, надлежащее экологическое состояние которого обеспечивается проведением специальных мероприятий. Таким образом, выбор историко-экологического прототипа, с одной стороны заключается в выборе желаемого исторического облика (исторического прототипа), а с другой, в разработке инженерно-экологического обустройства данного объекта, обеспечивающего сохранение этого облика в современных условиях.

В тех случаях, когда реконструкция и реставрация исторически ценных объектов в данный момент невозможна, инженерно-экологическое обустройство может заключаться в их консервации.

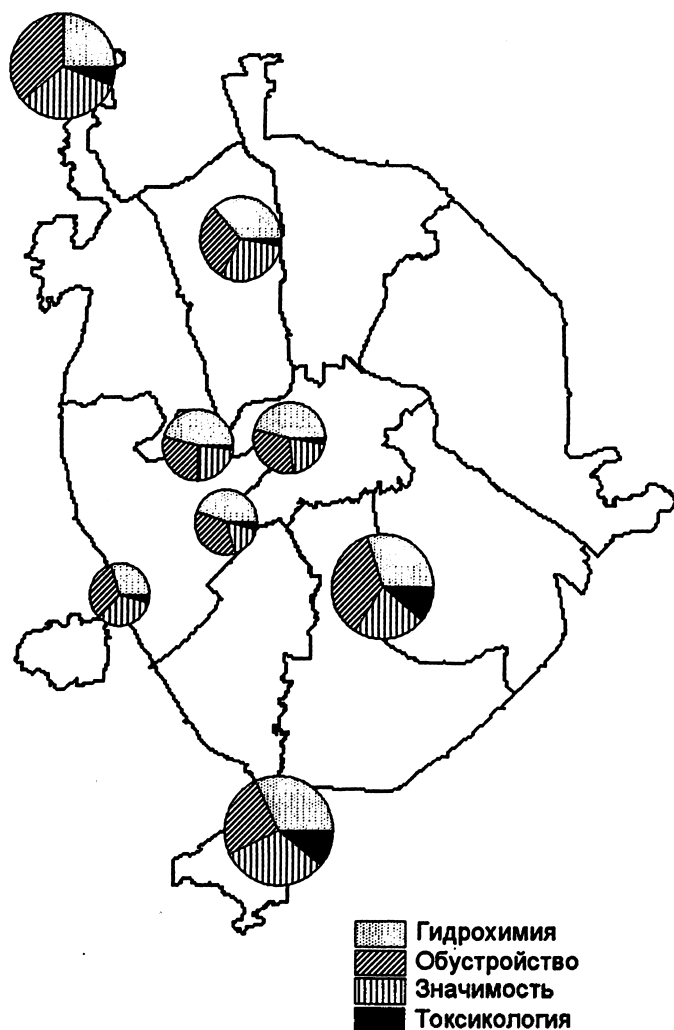


8. *Техногенный водный объект* — водные объекты, созданные для технических нужд или спонтанно возникшие как побочный продукт технической деятельности. Следует подчеркнуть, что понятие «техногенный» в данном случае не является синонимом «антропогенный», то есть возникший благодаря человеческой деятельности. К антропогенным можно отнести водоемы хозяйственно-бытового назначения и рекреационные водные объекты. Эти водные объекты целенаправленно создавались людьми для удовлетворения тех или иных потребностей. В отличие от этого, техногенный водный объект возникает как результат (технической деятельности) и как таковой изначально не предназначен для какого-либо иного вида водопользования.

В большинстве случаев контакт людей с техногенными водными объектами нежелателен. Вместе с тем, иногда они также используются населением как места отдыха, из них же осуществляется забор воды для хозяйственных целей, например, для полива огородов [5]. Инженерно-экологическое обустройство таких водных объектов должно проводиться путем разработки и осуществления проектов их изоляции. Достаточно часто существование техногенных водных объектов создает прямую угрозу для здоровья людей. Существует две основных разновидности таких объектов. Первая из них — это открытые потоки сточных вод с производственных и коммунально-бытовых объектов, проходящие через городскую территорию. Вторая — водоемы, образовавшиеся как скопления сточных вод. Они либо образуются самопроизвольно, например, в результате скопления стоков с городской территории у железнодорожных насыпей и иных подобных сооружений, либо создаются целенаправленно, как пруды для накопления и захоронения жидких отходов. Для таких водных объектов необходима разработка проектов ликвидации.

Выбор способа инженерно-экологического обустройства малого водного объекта может быть уточнен с помощью количественных показателей, характеризующих его отдельные аспекты его состояния (экологический, инженерно-технический, социальный, культурно-исторический и др.). Осуществить комплексный анализ этих разнородных параметров, можно используя методы ГИС-технологий [5]. С этой целью нами была разработана система бальной оценки комплекса различных показателей, отражающих отдельные аспекты состояния водного объекта (табл.).

На рис. 1 представлены результаты анализа данных, полученных при исследовании различных водных объектов г. Москвы.



**Рис. 1.** Комплексная оценка необходимых составляющих инженерно-экологического обустройства водных объектов

Диаметр круговой диаграммы характеризует степень необходимости инженерно-экологического обустройства конкретного объекта. Относительный размер секторов показывает, на какие именно негативные факторы следует обратить особое внимание при разработке проекта.

Предлагаемая бальная система может быть также использована для оценки общего состояния городских водных объектов ре-

гиона. На рис. 2 представлены результаты кластерного анализа всех полученных нами результатов. На дендрограмме отчетливо выделяются группы водных объектов, которые можно рассматривать как отдельные категории, вне зависимости от их происхождения и местных условий. Например, к единую группу входят столь внешне различные водные объекты как р.Жужа, техногенные водотоки г.Курчатова, пруд на Феодосийской улице и подмосковная р.Лопца. Все они находятся в плохом состоянии и нуждаются в первоочередной разработке проектов инженерно-экологического обустройства (в т.ч. проектов их ликвидации).

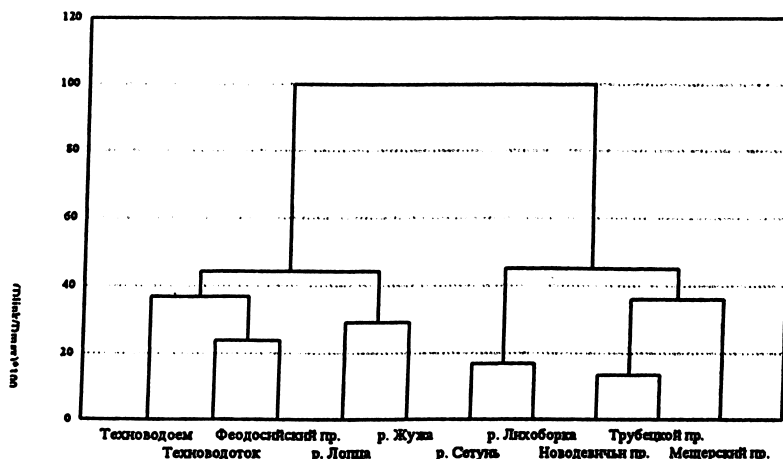


Рис. 2. Дендрограмма кластерного анализа

## ЛИТЕРАТУРА

1. О концепции по восстановлению малых рек и русловых водоемов города Москвы и первоочередных мероприятиях по реализации Концепции на период 2003 – 2005 гг. //Постановление Правительства г.Москвы от 17 июня 2003 г.
2. Родионов В.Б., Безносов В.Н., Волганик В.В., Суздалева А.Л. Реальные пути решения проблем малых рек России //Наука Москвы и регионов. Инновации, разработки, производство. 2004.
3. Безносов В.Н., Родионов В.Б., Суздалева А.А. Инженерно-экологический мониторинг и реальные пути экологического обустройства малых рек // Безопасность энергетических сооружений. Вып. 14. М.: ОАО НИИЭС. 2004.
4. Суздалева А.А., Горюнова С.В. Возможные пути решения экологических проблем малых городских рек //Системная экология. Вып.5-6. Сб. научн. трудов «Актуальные проблемы экологии и природопользования». М.: РУДН. 2004.

5. Суздалева А.А. Инженерно-экологическое обустройство и пути повышения рекреационного потенциала малых городских водных объектов М.: МГСУ. 2005..
6. Горюнова С.В., Суздалева А.А. Исследование экологического состояния р. Жужа на территории музея-заповедника «Коломенское» //Системная экология и экология человека. Вып.7. Сб. научн. трудов «Актуальные проблемы экологии и природопользования». М.: РУДН. 2005.
7. Авилова И.В., Корбут В.В., Фокин С.Ю. Урбанизированная популяция водоплавающих (Anas platyrhynchos) г. Москвы. М.: МГУ. 1994.
8. Федосюк Ю.А. Москва в кольце Садовых. М.: Московский рабочий. 1983.
9. Хендерсон-Селлерс Б. Инженерная лимнология. Л.: Гидрометеиздат, 1987.
10. Суздалева А.А., Безносов В.Н., Пшеничный Б.П. Проблема пейзажности индустриальных ландшафтов и использование устройств искусственного апвеллинга для мелиорации технических водоемов //Природообустройство и экологические проблемы водного хозяйства и мелиорации. М.: Изд-во МГУП. 1999.
11. Богданов В.М., Боровков В.С., Волшаник В.В. Очистка Большого пруда Московского Зоопарка системой замкнутого водооборота и струйно-вихревой аэрации //Чистый город. 2000. № 1 (9).
12. Волшаник В.В., Пешнин А.Г., Родионов В.Б., Юрченко А.Н., Амирова Н.Н., Доркина И.В. Инженерные пути решения проблемы улучшения экологического состояния прудов и малых рек //Безопасность энергетических сооружений. Научно-технический и производственный сборник. Вып. 12. М.: ОАО «НИИЭС». 2003.
13. Романенко В.Д., Оксюк О.П., Жукинский В.Н., Стольберг Ф.В., Лаврик В.И. Экологическая оценка воздействия гидротехнического строительства на водные объекты. Киев: Наукова думка. 1990.
14. Горюнова С.В., Безносов В.Н. Основные этапы развития чрезвычайной ситуации в прибрежной зоне морского курорта. Сб. научных трудов «Актуальные проблемы экологии и природопользования». М.: РУДН. 2004. Вып.5. Ч.2.

## СОДЕРЖАНИЕ

### I. Мониторинг и безопасность сооружений

- Блинов И. Ф.* Диагностика состояния основных сооружений ЗГАЭС и их оснований на основе мониторинга в период постоянной эксплуатации ..... 3
- Лобач А. А.* Аппарат регрессионного анализа результатов наблюдений за состоянием гидротехнических сооружений ..... 16
- Лобач А. А.* Опыт натурных исследований напряженно-деформированного состояния подпорных стен ..... 23

### II. Строительные конструкции, материалы, технологии

- Борткевич С. В., Скибин А. Н.* Исследование смеси суглинков с гравийно-галечниковым грунтом для ядра плотины Тери ..... 31
- Николаев Д. В.* Исследование массивных сборно-монолитных железобетонных перекрытий энергетических сооружений ..... 45
- Усачев И. Н., Историк Б. Л., Шполянский Ю. Б.* Научное обоснование и результаты испытаний нового ортогонального гидроагрегата на кислородной ПЭС ..... 56

### III. Гидрологическая безопасность водохранилищ и рек

- Стефанишин Д. В., Фролов А. Н.* Фильтрационные исследования глинистых грунтов экрана верхнего водоема Днестровской ГАЭС при высоких градиентах напора ..... 69
- Беликов В. В., Борисова Н. М., Остапенко В. В.* Совершенствование методов численного моделирования гидротехнических сооружений с резкими перепадами отметок дна ..... 79
- Котеров В. Н., Архипов Б. В., Беликов В. В., Солбаков В. В.* Численное моделирование переноса капельной влаги в нижнем бьефе гидроузла «Капанда» с учетом влияния разделительной стенки и воздухозаборов ГЭС ..... 89
- Куприянов В. П., Онопченко Г. Ф., Амирова Н. Н.* Гидравлические исследования Сангтудинского гидроузла ..... 97
- Беликов В. В., Кочетков В. В., Третьюхина Е. С.* Численные исследования нестационарных гидравлических режимов работы совмещенного нижнего бассейна Загорских ГАЭС-1 и ГАЭС-2 ..... 112

#### IV. Экологическая безопасность ГТС

<i>Истомина М.Н., Лебедева И.П.</i> Характер наводнений различного типа и состав защитных мероприятий .....	128
<i>Мажбиц Г.Л., Халаджиев В.П., Крапивина В.И.</i> Рыбозащитное сооружение водозабора Красноярской ГРЭС-2 .....	144
<i>Григорьева И.Л.</i> Гидроэкологические проблемы Ивановского водохранилища .....	151
<i>Кочарян А.Г., Лебедева И.П., Никитская К.Е.</i> Роль водоохранных зон в обеспечении безопасного комплексного использования водных объектов .....	161
<i>Гурьевич Т.Б., Дмитриева И.Л., Чуприна Я.Н.</i> Экологическое Зонирование реки Куньи и бассейнов Загорской ГАЭС по характеристикам водной среды .....	175
<i>Мелихова А.Г.</i> Влияние строительства и эксплуатации ЗГАЭС на почвенно-растительный покров прилегающих территорий .....	189
<i>Суздаева А.Л., Попов А.В., Кучкина М.А., Фомин Д.В., Минин Д.В.</i> Изменение химического состава воды и планктона при прохождении через систему технического водоснабжения АЭС .....	201
<i>Безносос В.Н., Родионов В.Б., Суздаева А.А., Колесникова Е.Л.</i> Оценка состояния малых городских водных объектов и пути их инженерно-экологического обустройства .....	216

## Безопасность энергетических сооружений

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

Объявляет в 2007 году прием в Аспирантуру с отрывом и без отрыва от производства по специальностям:

1. Гидротехническое строительство
2. Строительные материалы и изделия
3. Строительные конструкции, здания и сооружения
4. Гидравлика и инженерная геология
5. Электростанции и энергетические системы

Заявление о приеме в аспирантуру с указанием специальности и формы обучения направлять на имя исполнительного директора ОАО «НИИЭС» кандидата техн. наук *Бритвина Сергея Олеговича* с приложением следующих документов:

личного листка по учету кадров с фотографией, заверенного в отделе кадров по месту работы;  
автобиографии;  
характеристики-рекомендации с последнего места работы или из ВУЗа, если не прошло двух лет со времени его окончания;  
нотариально заверенной копии диплома об окончании ВУЗа;  
реферата по избранной специальности или опубликованной статьи.

Паспорт и диплом об окончании ВУЗа представляются лично поступающими в аспирантуру. Прием заявлений до 20 сентября 2007 года.

Вступительные экзамены по специальности, философии и иностранному языку проводятся с 1 октября 2007 года.

Обучение в аспирантуре платное. Форма и размер оплаты — по соглашению сторон. Аспиранты имеют возможность работать по совместительству.

Документы направлять по адресу:

125362, Москва, а/я 393, Строительный проезд д. 7а, ОАО «НИИЭС» (аспирантура).  
Телефон: (495) 493-51-32; 492-66-71. Факс: (495) 363-56-21  
Заведующая аспирантурой — *Косырева Ирина Михайловна*

Издательство ОАО «НИИЭС» предлагает приобрести Научно-технический и производственный сборник «Безопасность энергетических сооружений» (БЭС) вып. 2 — 15 по следующим расценкам:

Вып. 2 — 3 — 150 руб	Вып. 10 — 90 руб.
Вып. 4 — 120 руб.	Вып. 11 — 320 руб.
Вып. 5 — 60 руб.	Вып. 12 — 380 руб.
Вып. 6 — 120 руб.	Вып. 13 — 150 руб.
Вып. 7 — 160 руб.	Вып. 14 — 300 руб.
Вып. 8 — 60 руб.	Вып. 15 — 380 руб.
Вып. 9 — 160 руб.	

Заявки с перечнем заказываемой литературы и указанием почтового адреса, кодов ОКПО и ОКОНХ для оформления счета-фактуры принимаются по факсу (495)363-56-51, e-mail: melihova@nies.ru;  
Телефоны для справок: (495) 493-51-32, 497-21-51

Наш адрес: 125362, Москва, а/я 393, Строительный проезд, д. 7а

**Безопасность энергетических сооружений**  
**Сборник**

Научный редактор: Семенов И.В.

Корректор Капустина И.В..

Оригинал-макет и компьютерная верстка: Мелихова А.Г.

Подписано в печать 04.06. 2007  
Формат 60х90/16. Гарнитура Таймс  
Бумага офс. 1. Печать офсетная  
Объем 14,5 п.л. Тираж 1000 экз.  
Заказ 24

Лицензия ИД 06483 от 19 ноября 2001 г.  
ОАО «НИИЭС»  
125362, г. Москва, Строительный проезд, д. 7а.

Отпечатано в ООО «Галлея-Принт»  
5-я Кабельная, 26  
Телефон: 673-57-85