



# ГИДРО- ТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Ежемесячный  
научно-технический журнал

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РФ,

ОАО «РУСГИДРО»,

АССОЦИАЦИЯ «КОРПОРАЦИЯ ЕЭЭК»,

ЗАО НТФ «ЭНЕРГОПРОГРЕСС»,

НП «НТС ЕЭС»

Основан в 1930 г.

№ 6

ИЮНЬ

2012

## Содержание

### Проектирование, строительство, эксплуатация

Деев А. П., Борисевич Л. А., Фисенко В. Ф. Решение основных проблем эксплуатации гидротехнических сооружений Воткинского гидроузла . . . . . 2

Деев А. П., Фисенко В. Ф., Сольский С. В., Лопатина М. Г., Гинц А. В., Арефьева А. Н. Научное обеспечение безопасной эксплуатации грунтовых плотин Воткинской ГЭС . . . . . 8

Шарифуллин В. Н., Мардиханов А. Х. Методика прогноза уровня нижнего бьефа ГЭС в условиях суточного регулирования стока . . . . . 16

### Расчеты, исследования, эксперименты

Алимов А. Г. Совершенствование теоретических основ, методов и методологии исследования противифльтрационной эффективности защитных облицовок каналов и водоёмов . . . . . 20

Савельев К. Л., Козлов Д. В. Модель движения кромки льда в водохранилищах руслового типа в период замерзания. . . . . 28

Поздравление В. Б. Глаговскому . . . . . 34

### Российские энергетики

И. С. Завалишин (к 100-летию со дня рождения). . . . . 35

А. А. Боровой (к 100-летию со дня рождения) . . . . . 36

Н. В. Дмитриев — основатель отечественной школы специальных работ в энергетическом строительстве . . . . . 37

### За рубежом

Петров Г. Н. Водные ресурсы Центральной Азии и их использование в интересах гидроэнергетики и ирригации . . . . . 39

Радченко В. Г., Лопатина М. Г., Николайчук Е. В., Радченко С. В. Опыт возведения противофильтрационных устройств из грунтоцементных смесей . . . . . 46

Памяти Е. А. Долгинина . . . . . 55

Памяти Е. И. Чулкова . . . . . 56

### Хроника

Новости гидроэнергетики и гидротехники . . . . . 57

На обложке – Воткинская ГЭС

## Решение основных проблем эксплуатации гидротехнических сооружений Воткинского гидроузла

Деев А. П., главный инженер, Борисевич Л. А., инженер,  
Фисенко В. Ф., руководитель участка наблюдений, кандидат техн. наук  
(филиал ОАО “РусГидро” — “Воткинская ГЭС”)

Рассмотрены основные проблемы эксплуатации гидротехнических сооружений Воткинской ГЭС. Приведены мероприятия по восстановлению нормального уровня безопасности гидротехнических сооружений Воткинской ГЭС, выполненные в процессе эксплуатации.

**Ключевые слова:** земляная плотина, дренаж, хемогенное заилиение, русловые процессы, визуальные и инструментальные наблюдения, эксплуатация, научные исследования, мероприятия по повышению уровня безопасности сооружений, Воткинская ГЭС.

Воткинский гидроузел на р. Каме, возведенный для целей энергетики и судоходства, расположен в среднем течении реки, в 366 км ниже Камской ГЭС и в 68 км выше г. Сарапула. Сооружен в 1955–1965 гг. и введен в постоянную эксплуатацию в 1966 г.

В состав сооружений Воткинского гидроузла входят: здание гидроэлектростанции руслового типа, бетонная водосливная плотина (пустотелая, контрфорсная), одноступенчатый двухниточный судоходный шлюз, русловая земляная плотина № 1, правобережная пойменная земляная плотина № 2, левобережная пойменная земляная плотина № 3, левобережная пойменная земляная плотина № 4. Длина напорного фронта гидроузла — 5370 м, в том числе по бетонным сооружениям 670 м. Установленная мощность ГЭС — 1020 МВт. Средне-многолетняя выработка электроэнергии —

2280 млн. кВт·ч. Максимальный напор — 23,0 м. Объем Воткинского водохранилища: полный — 9,36 км<sup>3</sup>, полезный — 3,7 км<sup>3</sup>. Класс капитальности гидротехнических сооружений Воткинского гидроузла — II. Максимальный естественный расход воды обеспеченностью 0,1 % — 19 450 м<sup>3</sup>/с. Максимальная пропускная способность гидроузла при НПУ — 19 984 м<sup>3</sup>/с. Генплан Воткинского гидроузла представлен на рис. 1.

Водоохранилище гидроузла осуществляет сезонное регулирование стока. ГЭС, работая в энергосистеме, осуществляет суточное регулирование, участвует в покрытии пиков графиков нагрузки, несет аварийный и нагрузочный резервы энергосистемы.

Технический проект по строительству Воткинского гидроузла несколько раз претерпевал существенные изменения, касающиеся общей компоновки сооружений, а также параметров земляных плотин, здания ГЭС, водосливной плотины и судоходных сооружений. Изменения были направлены на снижение стоимости строительства, на экономию материалов и трудовых ресурсов, на сокращение сроков строительства, в частности путем уменьшения проектного объема насыпи по земляным плотинам на 248 тыс. м<sup>3</sup> за счет уменьшения ширины гребня на плотинах № 1 (русловой) и № 2 (правобережной пойменной) с 40 до 18 м; на плотине № 3 (между ГЭС и шлюзом) — до 22,2 м, на плотине № 4 (от шлюза к левому берегу) — до 29,0 м. Бетонные сооружения гидроузла выполнены сборно-монолитными, с пустотелой водосливной плотиной, в результате чего была достигнута существенная экономия по строительству ГЭС. Снижение объема бетона только по земляным плотинам составило 11,4 тыс. м<sup>3</sup> за счет уменьшения толщины плит крепления откосов и облегчения конструкций дренажа пойменных плотин.



Рис. 1. Генплан Воткинского гидроузла:

1 — здание ГЭС; 2 — водосливная плотина; 3 — русловая плотина № 1; 4 — правобережная земляная плотина № 2; 5 — земляная левобережная плотина № 3; 6 — судоходный шлюз; 7 — ограждающий мол; 8 — левобережная плотина № 4; 9 — порт; 10 — основной поселок; 11 — Прикамский район

Следует отметить хорошее качество бетонных строительных работ при сооружении водосливной грани водосливной плотины. Грамотные действия персонала по маневрированию затворами при пропуске паводка через водосливные отверстия, постоянный контроль за состоянием бетонных поверхностей водослива и выполненные ремонтные работы позволили сохранить качество бетона.

После заполнения водохранилища появились интенсивные протечки воды в подводной части здания ГЭС и водосливной плотины, видимые в потерях. Проводимые регулярные цементационные инъекции снизили протечки.

К 2001 г., после 40 лет эксплуатации, физический износ строительных конструкций машинного зала — панелей фасадов, гидроизоляции кровли машзала и трансформаторного перекрытия, заполнения световых проемов здания ГЭС — составлял более 50%. Выполнена реконструкция указанных объектов с применением современных материалов и технологий.

Особое внимание уделялось контролю и своевременному ремонту грунтовых сооружений, в частности земляной плотины № 2. Внесённые при строительстве изменения в проект дренажа земляной плотины № 2 стали одной из причин нарушения его работы. По проекту было предусмотрено два водовыпуска на ПК 42 + 95 и ПК 40 + 65. Однако в процессе строительства был выполнен только один водовыпуск на ПК 40 + 65. (Следует отметить, что плотина № 2 самая протяжённая из земляных плотин — 1840 м и расположена над старым руслом р. Камы.) Сооружение одного водовыпуска породило проблемы эксплуатации, которые возникли сразу же после строительства.

Весной 1964 г. в пределах ПК 41 + 45 — ПК 43 + 45 появились грифоны разгрузки фильтрационных вод в нижнем бьефе за плотиной, что свидетельствовало о наличии напорных вод в основании плотины и нижнем бьефе. После бурения разгрузочных скважин грифоны исчезли. Ниже началось заболачивание поймы. Весной 1965 г. на ПК 39 + 30 были обнаружены значительные просадки грунта над дренажом. При обследовании была установлена кольматация коллектора на участке между колодцами СК-5 и СК-4а. В июле — августе 1965 г. был произведён ремонт этого участка. Были организованы водопонижение, вскрытие, извлечение труб и их очистка. До 1978 г. работа дренажной системы на этом участке была нормальной.

При сооружении водовыпуска из дренажа земляной плотины № 2 вместо отводящей канавы длиной 400 м с укрепленными откосами была вырыта траншея для отвода воды из дренажа в нижний бьеф. Эта траншея к концу 70-х гг. превратилась в овраг глубиной до 7 м и шириной более 50 м, кото-

рый угрожал подмывом низового откоса плотины, обрушением опор ЛЭП 500 кВ ВотГЭС — Вятка. Для предотвращения развития этого процесса был запроектирован и в 1980 – 1982 гг. построен коллектор водоотвода длиной 450 м, а овраг отсечен от нижнего бьефа перемычкой. Образовался водоем, который в настоящее время является приемником фильтрационных вод основания и тела плотины. Водоем связан с нижним бьефом специальным водосбросом.

В 1985 г. после организации водопонижения был произведен ремонт участка дренажа на ПК 39 + 14 — ПК 39 + 26 с извлечением четырех секций коллектора, очисткой от наносов, подсыпкой основания и последующей укладкой секций коллектора. В 2004 г. была выполнена реконструкция дренажа на участке ПК 38 + 65 — ПК 40 + 65 по проекту ЗАО “Гидротех”, выполненному с учётом результатов исследовательских работ ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”. Реконструкция включала в себя разработку котлована под защитой шпунта Ларсена, укладку шунтирующего коллектора из перфорированных асбоцементных труб над существующим дренажом, отсыпку двухслойного обратного фильтра, устройство призмы пригрузки над реконструируемым участком с укладкой на откосе призмы железобетонных плит.

В 2003 г. на плотине № 2 была обнаружена кольматация дренажного коллектора. С привлечением специалистов ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” были выполнены исследовательские работы. В сентябре 2003 г. были зафиксированы выходы фильтрационных вод на земляной плотине № 2 в районе СК-3 на участке 80 м по обе стороны от подошвы низового откоса до дренажного лотка. Было решено до наступления зимы устроить самоизливающий отвод из колодца СК-3 в дренажный лоток и пригрузить песчано-гравийным грунтом обводненный участок с целью недопущения промерзания.

Обследование дренажа грунтовой плотины № 2 показало, что дренажный коллектор заилен хемогенными марганцевыми рудами по всей длине, за исключением самых верхних водораздельных и сухих участков. Мощность отложений в трубах коллектора диаметром 1 м составляла от 20 до 75 см.

Были выполнены комплекс полевых изысканий, лабораторных исследований и анализ натурных наблюдений. По результатам работ были сделаны следующие выводы. Основной причиной нарушения работы дренажных систем земляных плотин на Воткинской ГЭС (и причиной нарушения нормальной работы дренажных систем многих гидроузлов) является хемогенное заиливание дренажных коллекторов марганцеворудными отложениями. Осаждение и накопление хемогенных марганцевых руд в трубчатом дренаже плотины № 2 привели к пере-



а)



б)

**Рис. 2.** Полость дренажного коллектора до (а) и после (б) очистки от отложений и наносов

крытию полости дренажного коллектора между ПК 41 и ПК 42, вызвавшему подтопление дренажа, подъем депрессионной поверхности в теле плотины и пьезометрической поверхности в водоносном горизонте основания в интервалах ПК 40 — ПК 43 и ПК 38 — ПК 39. Такая же кольматация, но в меньших масштабах была обнаружена и на земляных плотинах № 1, 3, 4.

По результатам этих исследований с привлечением специалистов ООО «Кавитон» в 2005 – 2011 гг. была выполнена прочистка дренажных коллекторов всех земляных плотин. Нормальная работа дренажной системы была восстановлена. На рис. 2 показано состояние дренажного коллектора плотины № 2 до и после прочистки. В 2010 г. во исполнение рекомендаций ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» выполнены работы по созданию сооружения для понижения уровня в пруду между отводящим и дренажным коллекторами.

К началу 1980-х гг. проявились интенсивные нарушения крепления нижнего бьефа Воткинской ГЭС в различных местах. Причиной явилось следующее. В техническом проекте Воткинской ГЭС

рассматривались два этапа работы. Первый этап — работа Воткинской ГЭС до завершения строительства Нижнекамской ГЭС в условиях свободного нижнего бьефа Воткинской ГЭС. Предполагалось, что продолжительность первого этапа будет незначительна (до десяти лет). Второй этап — работа Воткинской ГЭС с подпором в нижнем бьефе от Нижнекамской ГЭС после ввода последней в эксплуатацию и наполнения водохранилища до НПУ. Проектное крепление в нижнем бьефе Воткинской ГЭС должно было проработать в жестких условиях первого этапа эксплуатации, а в дальнейшем эксплуатироваться в условиях подпора Нижнекамской ГЭС. Однако уже пятьдесят лет Воткинская ГЭС работает в условиях первого этапа эксплуатации.

В августе 1983 г. при осмотре было установлено повреждение левобережного откоса отводящего канала ГЭС на участке длиной 110 м. Плиты на участке осели на подмытый грунтовой откос, на остальном участке концы плит висели над дном размыва от 0,2 до 2 м глубиной в сторону берега от 0,2 до 1,5 м. Вдоль низовой части откоса образовалась промоина длиной 110 м, шириной от 3 до 6 м, глубиной до 2 м. Причина возникновения деформации в том, что крепление левобережного откоса не рассчитано на длительную эксплуатацию при низких отметках нижнего бьефа и больших скоростях потока вдоль берега. Институт «Ленгидропроект» выполнил рабочий проект «Усиление левобережного откоса отводящего канала Воткинской ГЭС». Был привлечен подрядчик ВоткингГЭСстрой, который выполнил предусмотренные проектом работы — отсыпку на размывый участок каменной призмы и закрепление ее сборными железобетонными плитами. На рис. 3 показан ремонт левобережного откоса, на рис. 4 — современное состояние левобережного откоса.



**Рис. 3.** Ремонт левобережного откоса



Рис. 4. Современное состояние крепления левого берега

В дальнейшем проявились интенсивные разрушения левого берега отводящего канала Воткинской ГЭС на всем участке до соединения с каналом шлюза. Разрушение левобережного откоса угрожало не самим сооружениям Воткинского гидроузла, а поселку лесозавода и промпредприятиям, расположенным на полуострове между отводными каналами шлюза и ГЭС. Дирекция ГЭС приняла решение выполнить инженерную защиту левого берега. По проекту института «Ленгидропроект» крепление было выполнено в виде шпунтовой стенки, бермы и откоса, укрепленных сборными железобетонными плитами. В 2005 г. работы по инженерной защите на участке до 2 км были завершены.

В ходе водолазного обследования в июле 1993 г. в створе гидроагрегата № 5 в ковше за зубом рисбермы были выявлены понижение отметки дна и отсутствие каменного заполнения ковша. Проведенная эхолотная съемка также показала понижение дна в указанном месте. Последующие водолазные обследования нашли, что размеры ямы размыва и ее глубина увеличиваются. Воткинская ГЭС обратилась в Ленгидропроект, который на основании данных гидравлических исследований и измеренных скоростей потока разработал проект укрепления дна отводящего канала ГЭС. В проекте в качестве наброски было предложено использовать стандартные фундаментные блоки ФБС 24-6-6. Размеры одного блока  $2,4 \times 0,6 \times 0,6$  м, что с некоторым запасом удовлетворяло требованиям к крупности материала заполнения зоны размыва.

Работы по ликвидации размыва дна отводящего канала Воткинской ГЭС выполнялись в два этапа. Фундаментные блоки сталкивали бульдозером со специальной баржи (рис. 5). В 1998 г. в зону размыва в районе Г5 было сброшено  $360 \text{ м}^3$  бетонных блоков, в 2000 г. в зону размыва в районе Г2 –  $299,2 \text{ м}^3$ .



Рис. 5. Ремонт зоны размыва

Ранее отмечалось, что при строительстве крепление нижнего бьефа было выполнено с учетом скорого подпора от Нижнекамской ГЭС. В полной мере это проявилось на русловой земляной плотине № 1. В процессе эксплуатации в результате резких изменений уровней нижнего бьефа, а также ледовых явлений в зимний период произошло уполаживание низового откоса плотины на отметках 71 – 66 м — перенос грунта тела плотины в русло реки. Переработка откоса на указанном участке наблюдается с 1982 г., но наиболее интенсивно она произошла в 1993 – 1995 гг. Летом 1995 г. языки подмыва на отдельных участках подходили под железобетонные плиты крепления. Возникла угроза подмыва низового откоса плотины. Ленгидропроект разработал проект крепления низового откоса сборным и монолитным железобетоном на отметках 66 – 71 м. Работы по креплению низового откоса проводились в 1996 – 1997 гг.хозспособом. В 1996 г. были выполнены отсыпка гравия  $2400 \text{ м}^3$  и упорный зуб крепления откоса из сборных железобетонных блоков ФБС 24-6-6 – 550 шт., уложены 1200 шт. сборных железобетонных плит ПД 2-6Г и  $500 \text{ м}^3$  монолитного бетона. В 1997 г. была выполнена отсыпка гравия  $2400 \text{ м}^3$ , уложено  $1188 \text{ м}^3$  сборного железобетона и  $252 \text{ м}^3$  монолитного бетона. Нормальный уровень безопасности русловой земляной плотины был восстановлен (рис. 6).

Технический надзор за состоянием гидротехнических сооружений Воткинского гидроузла осуществляет инженерно-технический персонал участка диагностики ГТС службы МО и ГТС. Результаты инструментальных наблюдений заносят в каталоги и информационно-диагностическую систему Д-2. Контроль состояния механического оборудования осуществляет группа гидротурбинного и гидромеханического оборудования производственно-технической службы. Натурные наблюдения выполняются в соответствии с «Инструкцией по эксплуатации гидротехнических сооружений Воткинской ГЭС» с



Рис. 6. Современное состояние низового откоса плотины № 1

периодичностью, определенной графиком, утвержденным главным инженером гидроэлектростанции.

Количество действующей контрольно-измерительной аппаратуры достаточно для контроля состояния сооружений в объемах, соответствующих нормативным требованиям. Состояние контрольно-измерительной аппаратуры удовлетворительное.

Не реже 1 раза в 5 лет проводится комплексное обследование гидротехнических сооружений специализированной комиссией, в которую входят ведущие учёные-гидротехники, специалисты профильных НИИ, представители ОАО «РусГидро», Ростехнадзора, МЧС, специалисты ГЭС. Последнее обследование гидротехнических сооружений Воткинской ГЭС, проведенное в июле 2010 г., показало, что они находятся в работоспособном состоянии и их дальнейшая безопасная эксплуатация обеспечена.

Для локализации повреждений и аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях Воткинской ГЭС имеется необходимый запас материалов, автотранспорта и других механизмов. Регулярно проводится обучение персонала гидроэлектростанции аварийно-спасательным и аварийно-восстановительным работам в случае возникновения чрезвычайных ситуаций. Воткинская ГЭС готова к локализации и ликвидации опасных повреждений и аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях.

Во втором квартале 2010 г. филиал ОАО «РусГидро» — «Воткинская ГЭС» приступил к выполнению комплекса работ по пересмотру «Декларации безопасности гидротехнических сооружений», срок действия которой был определен до 7 апреля 2011 г. Декларация разрабатывалась сотрудниками филиала ОАО «РусГидро» — «Воткинская ГЭС» при участии специалистов ОАО «НИИЭС».

Пересмотр «Декларации безопасности гидротехнических сооружений» проводился в соответст-

вии с Федеральным законом «О безопасности гидротехнических сооружений» № 117-ФЗ, «Положением о декларировании безопасности гидротехнических сооружений», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 6.11.1998 г. № 1303. «Декларация безопасности гидротехнических сооружений» разработана согласно Приказу МПР от 22.07.2009 г. № 221 с учетом положений Приказа от 15.12.2009 г. № 412. Этими руководящими документами определены требования к форме и содержанию Декларации, необходимые приложения, порядок согласований и утверждений этих документов.

В июле 2010 г. было проведено преддекларационное обследование гидротехнических сооружений Воткинской ГЭС специальной комиссией в составе представителей ведущих научно-исследовательских институтов по гидротехнике, проектного института, специалистов МЧС, Ростехнадзора, Воткинской ГЭС и ОАО «РусГидро». В Акте преддекларационного обследования сделан вывод о нормальном уровне безопасности ГЭС Воткинской ГЭС: «Обследование состояния гидросооружений Воткинской ГЭС показало, что гидротехнические сооружения находятся в работоспособном состоянии и их дальнейшая безопасная эксплуатация обеспечена.

Уровень безопасности ГЭС Воткинской ГЭС соответствует предъявляемым нормативным требованиям и обеспечивает нормальную эксплуатацию ГЭС.

Гидроэлектростанция готова к локализации и ликвидации опасных повреждений и аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях».

В июне 2010 г. разработан паспорт безопасности Воткинской ГЭС, согласованный с ГУ МЧС по Пермскому краю 27 июня 2010 г. Этот паспорт является обязательным приложением к Декларации.

Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» обязывает собственника (эксплуатирующую организацию) «создавать финансовые и материальные резервы, предназначенные для ликвидации аварии гидротехнического сооружения». В соответствии с «Положением о декларировании безопасности гидротехнических сооружений» сведения о финансовом обеспечении гражданской ответственности за вред, который может быть причинен в результате аварии гидротехнических сооружений, должны включаться в «Декларацию безопасности гидротехнических сооружений». Был выполнен расчёт размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии гидротехнических сооружений Воткинской ГЭС, и согласован с уполномоченными органами субъектов РФ — Республики

Башкортостан (2.02.2011 г.), Пермского края (4.02.2011 г.), Республики Удмуртии (14.02.2011 г.). Данный расчёт является обязательным приложением к Декларации.

Для получения заключения МЧС о готовности филиала ОАО “РусГидро” — “Воткинская ГЭС” к локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и о достаточности мер по защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций с привлечением специалистов ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” была разработана 3D модель гидродинамической аварии ГТС Воткинской ГЭС и передана в ГУ МЧС по Пермскому краю. В марте 2011 г. комиссией ГУ МЧС по Пермскому краю была проведена комплексная проверка филиала ОАО “РусГидро” — “Воткинская ГЭС” с проведением командно-штабного учения на тему “Готовность сил и средств филиала ОАО “РусГидро” — “Воткинская ГЭС” к ликвидации чрезвычайной ситуации при угрозе разрушения плотины № 1, вызванного выходом из работы дренажа участка тела плотины”. По результатам работы комиссии было получено Заключение МЧС о готовности филиала ОАО “РусГидро” — “Воткинская ГЭС” к локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и о достаточности мер по защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Заключение МЧС о готовности является обязательным приложением к Декларации безопасности.

В апреле 2011 г. “Декларация безопасности гидротехнических сооружений филиала ОАО “РусГидро” — “Воткинская ГЭС” со всеми приложениями была передана на экспертизу в экспертный центр ЗАО “Экспертный Центр Гидроэнергопромбезопасность”, определённый Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23.01.2009 г. № 17 для проведения экспертизы деклараций безопасности ГТС объектов энергетики. Экспертиза подтвердила нормальный уровень безопасности ГТС филиала ОАО “РусГидро” — “Воткинская ГЭС”, соответствие

разработанной декларации нормативным требованиям. 22 апреля 2011 г. Декларация безопасности гидротехнических сооружений была передана в Ростехнадзор на утверждение.

10 июня 2011 г. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору утверждена “Декларация безопасности гидротехнических сооружений Воткинской ГЭС” № 11-11(03)0043-00-ГЭС на срок 5 лет (максимально допустимый).

## Список литературы

1. *Борисевич Л. А., Фисенко В. Ф.* Русловые процессы в нижнем бьефе Воткинской ГЭС, местные деформации крепления нижнего бьефа и их влияние на уровень безопасности гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2003. № 9.
2. *Векслер А. Б., Фисенко В. Ф.* Нарушения крепления нижнего бьефа Воткинской ГЭС, возникшие в процессе эксплуатации // Гидротехническое строительство. 1997. № 2.
3. *Гинц А. В., Гольдина Т. М., Гусакова И. Н., Фисенко В. Ф.* Хемогенные отложения в дренажной системе грунтовой правобережной плотины № 2 Воткинского гидроузла // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Т. 243: Основание и грунтовые сооружения. 2004.
4. *Гинц А. В., Лопатина М. Г., Гусакова И. Н., Фисенко В. Ф.* Проблема хемогенного заиливания дренажа грунтовых плотин Воткинской ГЭС // Гидроэнергетика: Тезисы докладов научно-технической конференции. — СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2005.
5. *Гордиенко С. Г., Гусакова И. Н., Кветная И. А., Фисенко В. Ф.* Оценка фильтрационных утечек через основание грунтовых плотин Воткинской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Т. 243: Основание и грунтовые сооружения. 2004.
6. *Фисенко В. Ф., Деев А. П.* Рекомендации по организации натурных наблюдений на эксплуатируемых ГТС с учётом опыта Воткинской ГЭС // Безопасность энергетических сооружений. 2005. Вып. 15.
7. *Ясинская В. Д.* Из опыта эксплуатации гидротехнических сооружений Воткинской ГЭС // Гидротехническое строительство. 1968. № 4.
8. *Гольдин А. Л., Гордиенко С. Г., Щекочихин Ю. Д.* Состояние гидротехнических сооружений Воткинской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2003. № 9.
9. *Бритвин С. О., Иващенко И. Н., Семенов И. В.* Основные положения концепции обеспечения безопасности гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2004. № 10.

# Научное обеспечение безопасной эксплуатации грунтовых плотин Воткинской ГЭС

Деев А. П., главный инженер,

Фисенко В. Ф., руководитель участка наблюдений, кандидат техн. наук  
(филиал ОАО “РусГидро” — “Воткинская ГЭС”);

Сольский С. В., доктор техн. наук, Лопатина М. Г.,

Гинц А. В., кандидаты техн. наук, Арефьева А. Н., инженер  
(филиал ОАО “РусГидро” — ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”)

На протяжении 15 лет сотрудники ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева осуществляют научное сопровождение эксплуатации грунтовых плотин Воткинской ГЭС. За это время были выявлены основные особенности работы плотин, связанные со сложными гидрогеологическими и гидрохимическими условиями, виды их неблагоприятных проявлений, влияющих на надежность и безопасность сооружений; разработаны рекомендации и мероприятия по их устранению.

**Ключевые слова:** земляная плотина, грунтовое основание, дренаж, визуальные и инструментальные наблюдения, эксплуатация, научные исследования, организация дренажного стока, повышение уровня безопасности сооружений, Воткинская ГЭС.

Сооружения Воткинской ГЭС, введенные в постоянную эксплуатацию в 1966 г., образуют напорный фронт, включающий в себя гидроэлектростанцию, водосливную плотину, русловую и пойменные земляные плотины и судоходный шлюз. Общая длина напорного фронта — 5,340 км, в том числе по земляным плотинам — 4,798 км. В общей схеме компоновки сооружений по месту расположения, топографическим признакам и конструктивным особенностям в составе сооружений Воткинской ГЭС выделены четыре земляные плотины (рис. 1 – 2).

Русловая земляная плотина № 1 длиной 787 м перекрывает основное русло р. Камы. С левой стороны плотина примыкает к бетонной водосливной плотине, а с правой — к правобережной земляной плотине № 2. Ширина плотины по гребню состав-

ляет 18 м, ширина по подошве — 234 м. Наибольшая высота плотины — 35 м.

Правобережная пойменная земляная плотина № 2 длиной 1832 м расположена на пойме правого берега р. Камы и является продолжением земляной русловой плотины № 1. С левой стороны плотина примыкает к русловой плотине № 1, а с правой — к естественной поверхности II-й надпойменной террасы р. Камы. Ширина плотины по гребню составляет 18 м, наибольшая ширина по подошве — 227 м. Наибольшая высота плотины — 26,5 м.

Левобережная пойменная земляная плотина № 3 длиной 1319 м расположена на пойме левого берега р. Камы. С левой стороны, следуя по течению реки, плотина примыкает к судоходному шлюзу, а с правой — к зданию ГЭС. Ширина плотины по гребню составляет от 22,2 до 29,6 м, ширина по

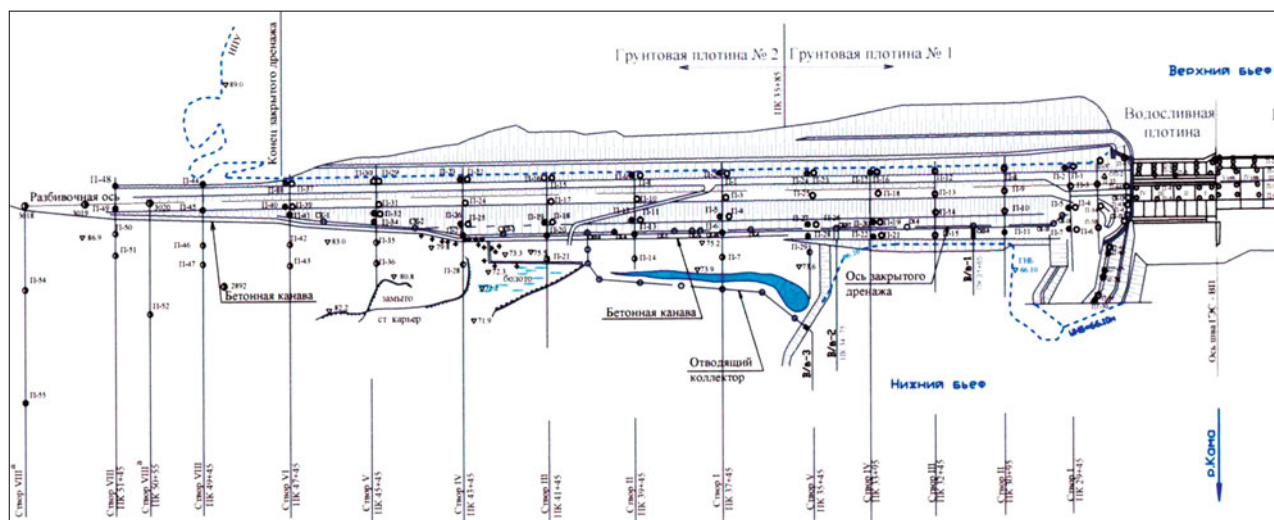


Рис. 1. План расположения русловой грунтовой плотины № 1 и правобережной пойменной грунтовой плотины № 2 Воткинской ГЭС



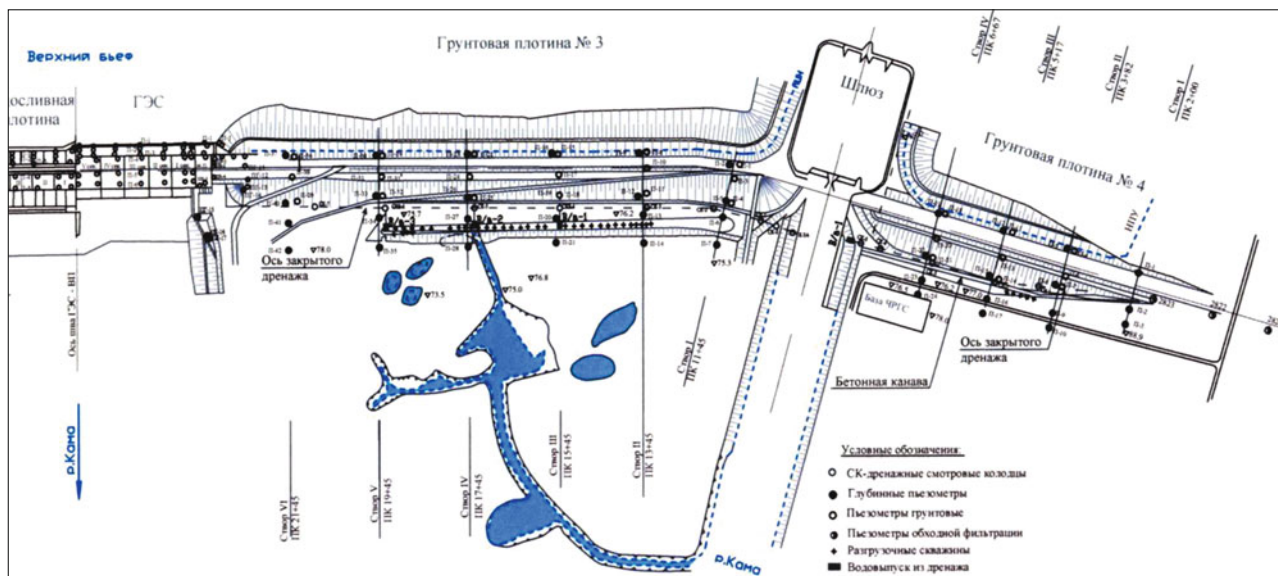


Рис. 2. План расположения левобережных пойменных грунтовых плотин № 3 и 4 Воткинской ГЭС

подошве — 226,2 м. Наибольшая высота плотины — 25,5 м.

Левобережная пойменная земляная плотина № 4 длиной 853 м замыкает собой напорный фронт на участке от судоходного шлюза до левого берега р. Камы. С правой стороны плотина примыкает к левому коренному берегу р. Камы, а с левой — к судоходному шлюзу. Ширина плотины по гребню составляет 29,5 м, наибольшая ширина плотины по подошве — 192,0 м. Наибольшая высота плотины — 21,5 м.

Плотины имеют однородный профиль, намытый из песчано-гравелистого или мелкозернистого песчаного грунта. Низовой откос плотин № 1 и 2 по высоте разделен тремя бермами, а плотин № 3 и 4 — двумя бермами и укреплен слоем гравия толщиной 0,2 м. Вдоль низового откоса плотин № 2–4 проходит облицованная бетоном водосборная дренажная канава с полуторными откосами, служащая для сбора и отвода фильтрационных вод и атмосферных осадков. Вдоль линии дренажной канавы через 10–20 м друг от друга расположены разгрузочные скважины.

Дренаж плотин принят двух типов: открытый и закрытый. Открытый тип дренажа имеет комбинированную конструкцию, состоящую из верхней наклонной части, выполненной в виде тьюфика толщиной 0,9 м, и нижней, выполненной в виде двухслойной дренажной призмы. Внешний откос наклонного дренажа плотины № 1 укреплен бетонными армированными плитами.

Закрытый тип дренажа представляет собой двухслойную дренажную призму, выполненную из гравия и крупнозернистого песка. Внутри дренажной призмы размещен дренажный коллектор, вы-

полненный из сборных труб диаметром 1 м и длиной 1–4 м.

Для наблюдения за работой дренажа предусмотрены смотровые колодцы, расположенные через 150–200 м друг от друга по длине дренажного коллектора.

Отвод дренажных вод из дренажа плотин № 1 и 4 осуществляется непосредственно в нижний бьеф по отводящим участкам дренажного коллектора, из дренажа плотины № 2 — по отводящему закрытому коллектору, а из дренажа плотины № 3 — по бетонному лотку, трасса которого проходит по старому руслу речки Сайгатка.

Для наблюдения за положением кривой депрессии в теле и основании плотин установлены соответственно поверхностные и глубинные пьезометры (147 пьезометров в 25 створах). Для наблюдения за вертикальной деформацией плотины оборудованы поверхностными и глубинными реперами (46 реперов в 17 створах). Для наблюдения за величиной расхода дренажных вод, профильтровавшихся через тело и основание плотин, девять водовыпусков дренажных коллекторов оборудованы мерными водосливами [1, 2].

Сложные гидрохимические условия основания сооружений Воткинской ГЭС в сочетании с особенностями конструкции дренажа плотин привели к формированию потока обогащенных соединениями железа и марганца напорных вод, выклинивающегося в зону повышенной аэрации, и к интенсивному образованию и отложению железомарганцевых соединений в фильтрах, дренажных отверстиях и полостях труб дренажных коллекторов.

Необходимо отметить, что эти особенности работы грунтовых плотин Воткинской ГЭС выходят за проектный режим сооружений и на протяжении

нескольких десятилетий не были выявлены при проведении наблюдений. Только в 2004 г. по результатам специализированных обследований заиливание дренажа железомарганцевыми образованиями было обозначено как основной источник неблагоприятных проявлений при эксплуатации плотин [3, 4, 8]. Массовые опробования фильтрующихся вод и исследования состава отложений, образовавшихся в полостях дренажных коллекторов, позволили выявить основные источники поступления богатых марганцем вод и механизм образования отложений, а также обозначить основные пути восстановления работы закрытого дренажа.

Основные результаты исследований, посвященные особенностям эксплуатации грунтовых сооружений в условиях железомарганцевого заиливания дренажа и выполненным опытно-фильтрационным работам, изложены в ряде статей [1, 5 – 7]. Проблемам эксплуатации и определению путей повышения надежности грунтовых сооружений, работающих в условиях железомарганцевого заиливания закрытого дренажа, посвящены три диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Положительные результаты реализации рекомендованных эксплуатационных мероприятий позволили использовать полученный опыт и разработанные технические решения для восстановления работоспособности дренажа на гидротехнических сооружениях ряда ГЭС Волжско-Камского каскада — Нижегородской, Нижнекамской и др.

Специалисты ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» при активном участии сотрудников Воткинской ГЭС за 15-летний период исследовали основные особенности работы тела и основания грунтовых плотин, элементов их дренажного обустройства и установленной контрольно-измерительной аппаратуры. Обследования грунтовых плотин выполнялись в сотрудничестве с группой наблюдений Воткинской ГЭС (руководитель В. Ф. Фисенко, инженер-гидротехник Н. В. Жидкова) по планам, согласованным с программой выполнения текущих натурных наблюдений.

В качестве исходных данных для проведения работ использовались материалы проектной документации (включая рабочие чертежи сооружений и паспорта земляных плотин); материалы эксплуатационной документации (включая журналы визуальных осмотров сооружений; материалы инструментальных наблюдений за изменением положения депрессионной поверхности в теле плотин, величин расходов дренажного стока и осадок тела и основания плотин); акты специализированных обследований сооружений и предписаний, полученные по результатам проверок, проводимых органами надзора за безопасностью гидротехнических сооружений [9].

При проведении инструментальных наблюдений использовалось как стандартное оборудование (рейки, мерные ленты, хлопущки), так и специальные средства измерения (электронная рулетка с функцией измерения температуры воды, переносные мерные водосливы с тонкой стенкой треугольного и трапецеидального профиля, мерная линейка с уровнем, переносной гидронивелир и др.). На все выявленные в процессе проведения работ дефекты или отклонения от проектного состояния сооружений составлялись схемы с подробным описанием и фотофиксацией.

Для получения более достоверных сведений о состоянии сооружений их обследования проводились как в периоды низких стояний уровней воды в водохранилище (апрель — май), так и в периоды стояния уровней воды в водохранилище вблизи нормального подпорного уровня (июнь — сентябрь). Контрольные замеры температуры фильтрующихся вод в пьезометрах, а также в разгрузочных скважинах, дренажных коллекторах и водотоках, расположенных на территории поймы, выполнялись и в зимний период (декабрь — февраль).

По результатам выполненных многолетних исследований был выявлен ряд проблем, влияющих на надежность и эксплуатационную безопасность земляных плотин Воткинской ГЭС, таких, как:

- закупорка части водоприемных отверстий и стыков между звеньями труб дренажных коллекторов железомарганцевыми образованиями, вызывающая снижение водоприемной способности коллекторов;

- образование в полостях труб дренажных коллекторов порогов из железомарганцевых отложений, перекрывающих поперечное сечение труб и снижающих транспортирующую способность коллекторов;

- зарастание дренажных отверстий и стыков между звеньями труб корнями травяной и кустарниковой растительности;

- снижение чувствительности пьезометров;

- отклонение направления движения фильтрационного потока в теле грунтовых плотин от его проектного положения, перпендикулярного оси сооружений;

- низкие величины расходов стока разгрузочных скважин, в том числе после выполнения их промывки;

- формирование зон водопроявлений на территориях поймы, примыкающих к низовым откосам земляных плотин № 2 – 4;

- образование полостей под плитами железобетонного крепления верховых откосов земляных плотин № 1 – 4 и низовых откосов земляных плотин № 1 и 3;



**Рис. 3, а.** Каскадный порог из железомарганцевых отложений, сформировавшийся в устьевом участке дренажного коллектора плотины № 3. Вид до выполнения очистки



**Рис. 3, б.** Устьевой участок дренажного коллектора плотины № 3. Вид после выполнения очистки

низкая точность измерения величин расходов дренажного стока.

В качестве основной проблемы грунтовых сооружений Воткинской ГЭС следует выделить заиливание полости дренажных коллекторов, их водоприемных отверстий и стыков между звеньями труб железомарганцевыми образованиями, вызывающее снижение их водоприемной и транспортирующей способности. По результатам исследований установлено, что основной причиной образования марганцеворудных отложений в полостях дренажных коллекторов является длительный процесс стока дренажных вод, богатых соединениями железа и марганца, через естественные или искусственные пороги в полости коллектора при минимальных глубинах воды в пределах кривой спада потока профильтровавшихся вод. Пороги могут образовываться вследствие смещения труб, выступов арматуры, скопления песчано-гравийного материала и посторонних предметов. При этом отсутствие профилактических промывок и/или очисток полости труб дренажного коллектора и отстойников смотровых колодцев от первичных отложений привело к развитию процесса формирования каскадных порогов отложений, перекрывающих сечение труб на 50 – 80 % (рис. 3, а).

Основной причиной закупорки дренажных отверстий является длительное стояние уровня дренажных вод с повышенным содержанием марганца в дренажном фильтре на уровне низа дренажных отверстий, работающих в режиме разлива. При этом закупорка дренажных отверстий первого ряда приводит к тому, что уровень воды в дренажном фильтре повышается и начинается процесс закупорки дренажных отверстий, расположенных выше.

Выполненная сотрудниками ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» опытная расчистка отводящих трубопроводов к водовыпускам В-2 и В-1 плотины

№ 3 позволила устранить подпор дренажному стоку и обнажить марганцеворудные отложения, сформировавшиеся в полости труб дренажного коллектора в виде каскадных порогов, а также показала возможность их удаления путем механического рыхления.

В соответствии с разработанными ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» рекомендациями сотрудниками ООО «Кавитон» выполнены очистки полостей дренажных коллекторов земляных плотин от железомарганцевых отложений и скопившихся в полостях труб песчано-гравийных отложений. По результатам инструментального обследования полостей дренажных коллекторов установлено хорошее качество очистки полостей труб дренажных коллекторов (рис. 3, б). Снижение уровней воды в полостях труб коллекторов и соответственно в дренажной засыпке на 60 – 80 см позволило значительно уменьшить базис разгрузки депрессионной поверхности. Несмотря на то что не были выполнены очистка обратного фильтра и расчистка водоприёмных отверстий дренажных труб, работоспособность дренажа была восстановлена практически полностью.

По результатам исследований ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» в качестве одного из профилактических мероприятий, направленных на снижение вероятности образования марганцеворудных порогов в дренажных коллекторах, была рекомендована установка в полости труб коллектора транзитных треугольных водосливов, позволяющих организовать подпорный режим движения потока с возможностью выполнения контрольных измерений транзитных расходов дренажного стока.

Опыт эксплуатации коллектора плотины № 3 с транзитными водосливами (рис. 3, в) показал, что в результате организации разгрузки фильтрационного потока под уровень воды и его организованного сброса через водослив с тонкой стенкой перед во-



**Рис. 3, в.** При отсутствии водослива с тонкой стенкой в устье участка дренажного коллектора происходит образование первичного порога



**Рис. 3, г.** При отсутствии мероприятий по очистке полости трубы на первичном пороге образуется следующий порог в виде каскада



**Рис. 3, д.** Измерительный водослив с тонкой стенкой, установленный в устье участка дренажного коллектора



**Рис. 3, е.** При сбросе воды через водослив с тонкой стенкой в полости коллектора образуются взвешенные в воде охристые и скапливающиеся у нижней щельги трубы неконсолидированные марганцевые отложения

досливами образуются лишь взвешенные в воде охристые и скапливающиеся у нижней щельги трубы неконсолидированные марганцевые отложения (рис. 3, г). Для очистки полости коллектора от взвешенных наносов достаточно лишь проведения его периодической (один раз в 3 – 5 лет) самопромывки при периодическом снятии и последующей установке подпорных сооружений на соответствующем участке дренажного коллектора.

Необходимо отметить, что на участке дренажного коллектора, где транзитный водослив установлен не был, через год произошло образование первичного порога из консолидированных железомарганцевых отложений (рис. 3, д) с дальнейшим его развитием к концу третьего года эксплуатации до порога каскадного типа (рис. 3, е).

По результатам контрольных измерений транзитных расходов дренажного стока установлено, что водоприемная способность отдельных его участков, расположенных между смотровыми колодца-

ми, значительно отличается в связи с различной степенью закупорки дренажных отверстий и стыков между секциями труб железомарганцевыми отложениями. А измеряемая на дренажном водовыпуске величина суммарного дренажного стока характеризует лишь некоторую интегральную величину стока, не позволяющую оценить фактическую водоприемную способность участков дренажного коллектора.

В соответствии с рекомендациями ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» на дренажном коллекторе плотины № 3 были дополнительно установлены три транзитных измерительных трапецеидальных водослива и два разделительных щита (рис. 4), что позволило выделить по длине коллектора ряд отдельных измерительных участков и осуществить независимое определение величин дренажного стока:

разделительные щиты, установленные на отводящих участках коллектора от смотровых колодцев

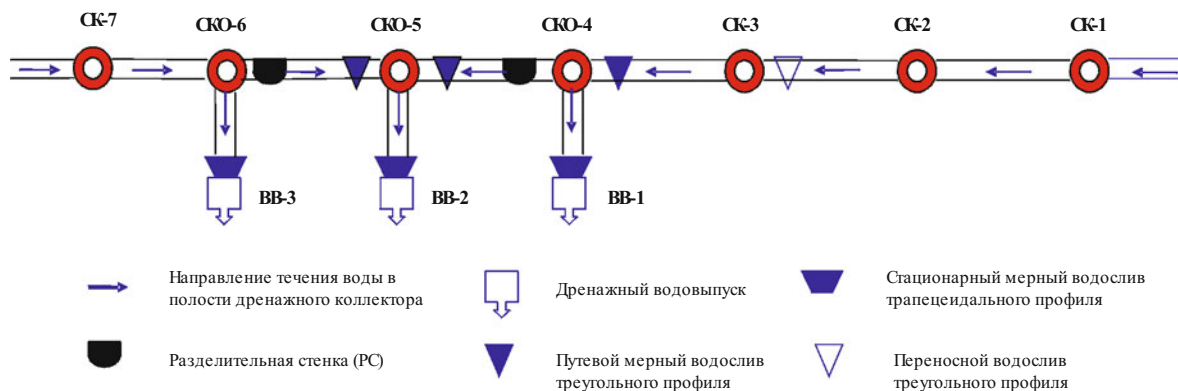


Рис. 4. Схема организации стока на отдельных участках дренажного коллектора плотины № 3

СКО-6 и СКО-4, позволяют исключить транзитный переток дренажных вод между участками коллектора; мерный водослив водовыпуска ВВ-3 позволяет определить величину дренажного стока на участке коллектора между его истоком и смотровым колодцем СКО-6;

мерный водослив, установленный на подводящем участке коллектора к СКО-5 со стороны ГЭС, позволяет определить величину дренажного стока на участке коллектора между смотровыми колодцами СКО-6 и СКО-5;

мерный водослив, установленный на подводящем участке коллектора к СКО-5 со стороны шлюза, позволяет определить величину дренажного стока на участке коллектора между смотровыми колодцами СКО-4 и СКО-5;

мерный водослив водовыпуска ВВ-2 позволяет определить суммарную величину дренажного стока водосливов, установленных на подводящих участках коллектора к СКО-5;

мерный водослив, установленный на подводящем участке коллектора к СКО-4 со стороны шлюза, позволяет определить величину дренажного стока на участке коллектора от его истока до смотрового колодца СКО-4;

мерный водослив водовыпуска ВВ-1 позволяет выполнить контрольное измерение величины дренажного стока на участке коллектора от его истока до смотрового колодца СКО-4.

Реализация схемы организации дренажного стока позволила не только осуществить контроль величин суммарного стока, измеряемого на стационарных водосливах, но и определить величины протечек через неплотности установочных пазов и дефекты бетона. Полученная разница величин дренажного стока, на транзитном водосливе в устье участка дренажного коллектора в колодце СКО-4 – 19,44 л/с и стационарном водосливе ВВ-1, расположенном в устье отводящего участка коллектора, — 14,70 л/с, наглядно характеризует величину протечек через дефекты пазов водослива и по-

верхности бетона его оголовка, выявленные при обследовании. Кроме того, по результатам измерений выявлен участок дренажного коллектора, расположенный между колодцами СК-3 и СКО-4, на котором величина дренажного стока достигает 19 л/с, что практически вдвое превышает величины дренажного стока, формирующиеся на участках между смотровыми колодцами СКО-6 — СКО-5 и СК-5 — СКО-4 – 8,70 и 7,44 л/с соответственно.

подавляющее большинство пьезометров на грунтовых плотинах Воткинской ГЭС установлено в 1963 г. Плановые ремонты и замена неисправных пьезометров производятся с момента их установки, однако к 2004 – 2006 гг. число пьезометров с повышенной инерционностью достигло почти 50 %.

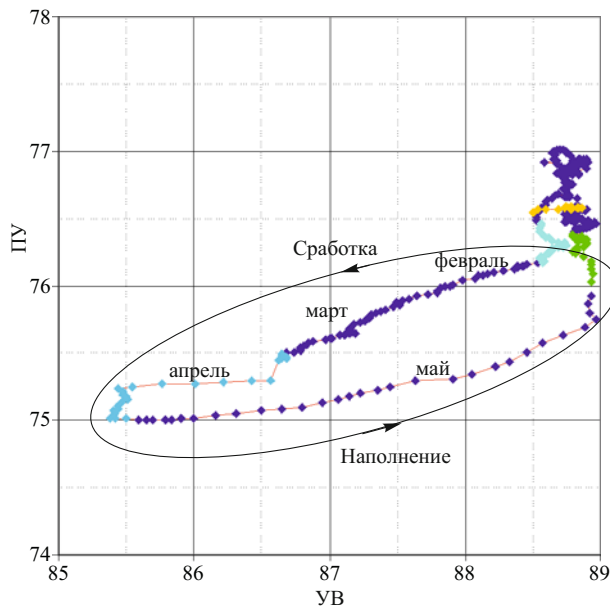
С целью оценки состояния пьезометрической сети плотины № 3 специалисты ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» выполнили визуальный осмотр пьезометров с описанием основных дефектов оголовков пьезометров и определение инерционности пьезометров методом наливов. Работоспособность пьезометров оценивалась по следующим критериям:

пьезометры с водоприемной способностью, соответствующей расчетному коэффициенту фильтрации более 1 м/сут, считаются находящимися в удовлетворительном состоянии;

пьезометры с расчетным коэффициентом фильтрации менее 0,01 м/сут (время восстановления уровня составляет более 1 сут) неисправны и требуют проведения ремонта, так как дают значительную погрешность при измерениях уровня воды в их полости;

пьезометры с промежуточным значением расчетного коэффициента фильтрации, восстановление которых произошло менее чем за 1 сут, считаются работоспособными, однако обладают повышенной инерционностью и требуют проведения периодических проверок.

По результатам выполненной оценки установлено, что в исправном состоянии находится 21 пьезометр (немного более половины из общего числа



**Рис. 5.** Результаты обработки данных автоматизированных измерений уровня воды в пьезометре ПГ-13 (в годовом разрезе)

пьезометров). Шесть пьезометров характеризуются повышенной инерционностью, а 13 пьезометров неисправны. Следует отметить, что при проведении плановых ремонтов осуществляется замена одного, максимум двух пьезометров в створе, что создает проблему обеспечения равной точности измерений, поскольку большая часть пьезометров в створе обладает повышенной инерционностью. Для повышения точности пьезометрических наблюдений ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» рекомендовало выполнять плановые работы по ремонту пьезометров с учетом их расположения в створе, а также разработать проект устройства на каждой из плотин по одному контрольному пьезометрическому створу с автоматизированным сбором информации.

В качестве положительного опыта работы пьезометров с автоматизированным сбором информации необходимо отметить результаты обработки данных, полученных по двум пьезометрам на плотине № 3, которые были оборудованы датчиками автоматического измерения уровней воды (замеры два раза в сутки). Уже первые результаты обработки данных автоматизированных измерений показали, что значения отметок уровня воды в полости пьезометра ПГ-13 в годовом разрезе образуют петлю гистерезиса, вытянутую преимущественно вдоль оси изменения отметок уровней верхнего бьефа. Нижняя ветвь петли соответствует периоду подъема уровня воды в водохранилище, а верхняя — периоду его сработки. Полученная петля гистерезиса характеризует величину запаздывания изменения уровня воды в полости пьезометра относительно уровня воды в водохранилище с учетом инерционности пьезометра, которая для пьезометра ПГ-13, согласно графику (рис. 5), составляет

около двух недель. При этом форма петли гистерезиса в общем виде определяется скоростью сработки и наполнения водохранилища, местом расположения пьезометра в створе и его инерционностью, в свою очередь, зависящей от правильности подбора фильтра и продолжительности периода эксплуатации. Получение непрерывных (ежедневных и более частых, особенно для пьезометров, испытывающих влияние уровня нижнего бьефа) данных об уровнях воды в пьезометрах позволит получить качественно иную информацию о фильтрационном режиме грунтовых сооружений по сравнению с данными ежемесячных замеров уровней воды в пьезометрах, не учитывающих величину их инерционности.

Следует отметить, что при наличии данных срочных автоматизированных наблюдений появляется возможность расчета фактических скоростей фильтрации по данному створу, получения характеристик сезонных изменений фильтрационного состояния грунтовых сооружений, уточнения выбора критериальных створов пьезометров, а также критических уровней и моментов времени года, соответствующих экстремальным положениям депрессионной поверхности.

При проведении исследований фильтрационного режима в теле и основании грунтовых плотин Воткинской ГЭС специалисты ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» использовали сочетание двух методов: традиционного метода обработки данных пьезометрических наблюдений и метода гидротермического анализа фильтрационного режима. Данные об изменении отметок уровней воды в пьезометрах при этом позволяют получить сведения о положении депрессионной поверхности, а также о преимущественном направлении разгрузки фильтрационного потока (рис. 6, а), в то время как получение данных о послойном изменении температуры воды в пьезометрах по вертикали позволяет разработать температурно-фильтрационную численную модель сооружения с выделением зон фильтрационной неоднородности грунтов.

Результаты обработки данных параллельных натурных измерений уровней воды в пьезометрах и данных послойного измерения температуры воды в полости пьезометров для выполнения гидротермического анализа фильтрационного режима плотины № 4 приведены на рис. 6, а, б.

Полученные результаты обработки данных пьезометрических наблюдений характеризуют общую направленность фильтрационного потока (см. рис. 6, а), в то время как результаты построения температурно-фильтрационной численной модели сооружения позволяют однозначно выделить зоны фильтрационной неоднородности грунтов тела плотины. Так, зоны плотины, отмеченные на

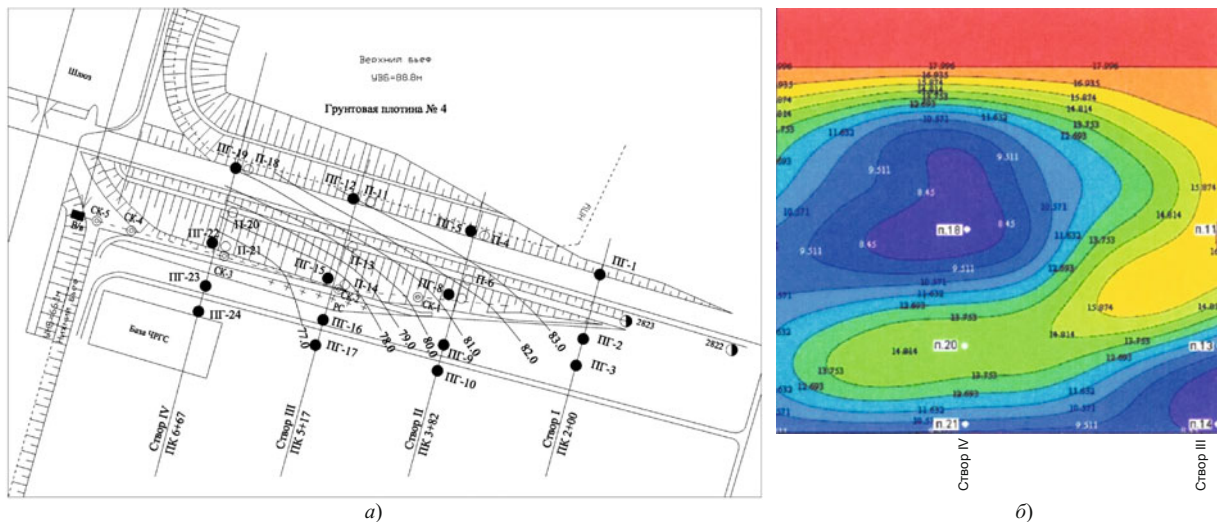


Рис. 6. План гидроизогипс в теле плотины в августе 2008 г. (а), поле температур в теле плотины ЗП № 4 в августе 2008 г. (б)

рис. 6, б сине-сиреневым цветом, имеют фактическую водопроницаемость грунтов почти на порядок меньше, чем грунты зон плотины, отмеченных желто-зеленым цветом. По результатам моделирования (рис. 6, б) было установлено, что общее направление фильтрационного потока практически параллельно оси плотины, а его разгрузка осуществляется в устьевой участок дренажа в районе дренажных колодцев СК-4 — СК-5. При этом выявленная повышенная фильтрационная нагрузка на устьевой участок дренажного коллектора объясняется значительным загрязнением фильтра дренажа на этом участке и отсутствием его загрязнения на вышерасположенных участках, что подтверждается материалами обследований дренажа.

Таким образом, путем комплексного сочетания методов пьезометрических и гидротермических наблюдений достигается значительное повышение информативности при исследовании фильтрационного режима в теле и основании плотины. При этом результаты обработки натурных данных гидрогеотермических наблюдений позволяют с достаточной степенью точности и надежности определить зоны повышенной проницаемости в теле и основании плотины, места питания подземных вод, а также уточнить направление разгрузки фильтрационного потока.

## Выводы

1. В результате выполнения комплекса работ по научному сопровождению эксплуатации грунтовых сооружений Воткинской ГЭС были выявлены следующие основные проблемы эксплуатации дренажа земляных плотин и установленной на них контрольно-измерительной аппаратуры, влияющие на надежность и безопасность сооружений:

заиливание фильтрующей засыпки и частичная закупорка дренажных отверстий железомарганцевыми отложениями, образующимися в зонах разгрузки напорных грунтовых вод, снижающие водопроницаемую способность дренажа;

образование в полостях труб дренажных коллекторов порогов из консолидированных железомарганцевых отложений, снижающих пропускную способность дренажа.

2. Выполненная в соответствии с разработанными рекомендациями очистка полостей коллекторов от железомарганцевых отложений позволила снизить уровни воды в полостях труб коллекторов и соответственно в дренажной засыпке на 60 – 80 см, что значительно уменьшило базис разгрузки депрессионной поверхности и практически полностью восстановило работоспособность дренажа.

3. В качестве эффективного средства, предотвращающего образование консолидированных железомарганцевых отложений в дренажных отверстиях и в трубах коллекторов, предложена установка в полости труб транзитных водосливов, позволяющих организовать подпорный режим движения потока дренажных вод.

4. Наблюдаются снижение чувствительности и выход из строя части пьезометров, установленных на грунтовых плотинах. Для повышения точности определения параметров фильтрационного режима в теле и основании плотин было предложено разработать проект устройства одного контрольного пьезометрического створа для каждой из плотин с автоматизированным сбором информации, а также рекомендовано при обработке данных использовать комплексное сочетание методов пьезометрических и гидротермических наблюдений.

5. Положительные результаты реализации рекомендованных к выполнению эксплуатационных мероприятий позволяют использовать полученный

опыт и разработанные технические решения по восстановлению работоспособности дренажа на гидротехнических сооружениях ряда ГЭС Волжско-Камского каскада.

### Список литературы

1. Гинц А. В., Гольдина Т. М., Гусакова И. Н., Фисенко В. Ф. Хемогенные отложения в дренажной системе грунтовой правобережной плотины № 2 Воткинского гидроузла. // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2004. Т. 243. С. 139 – 149.
2. Гусакова И. Н., Гинц А. В., Фисенко В. Ф. Оценка влияния водного режима поймы на фильтрацию в основании грунтовой плотины № 2 Воткинской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2007. Т. 246. С. 23 – 29.
3. Ясинская В. Д. Из опыта эксплуатации гидротехнических сооружений Воткинской ГЭС // Гидротехническое строительство. 1968. № 4. С. 10 – 16.
4. Холкин И. В., Чекунов А. В., Двадцатилетний опыт эксплуатации Воткинской ГЭС на р. Каме // Гидротехническое строительство. 1982. № 3. С. 38 – 42.
5. Гольдин А. Л., Гордиенко С. Г., Шекокихин Ю. Д. Состояние гидротехнических сооружений Воткинской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2003. № 9.
6. Гордиенко С. Г., Гусакова И. Н., Кветная И. А., Фисенко В. Ф. Оценка фильтрационных утечек через основание грунтовых плотин Воткинской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2004. Т. 243. С. 149 – 156.
7. Лопатина М. Г., Терский В. П. Тепловое поле земляной плотины Воткинской ГЭС как индикатор эффективности работы дренажа // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2009. Т. 255. С. 62 – 68.
8. Бритвин С. О., Иващенко И. Н., Семенов И. В. Основные положения концепции обеспечения безопасности гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2004. № 10.
9. Фисенко В. Ф., Деев А. П. Рекомендации по организации натурных наблюдений на эксплуатируемых ГЭС с учётом опыта Воткинской ГЭС // Безопасность энергетических сооружений. — М.: НИИЭС, 2005. Вып. 15.

## Методика прогноза уровня нижнего бьефа ГЭС в условиях суточного регулирования стока

Шарифуллин В. Н., доктор техн. наук (Казанский государственный энергетический университет), Мардиханов А. Х., инженер (Камская государственная инженерно-экономическая академия)

Предложена методика почасового прогноза уровня нижнего бьефа ГЭС в зависимости от исходного уровня и нового расхода воды через турбины, основанная на обработке текущей телеметрической информации. Проведены анализы статической и динамической характеристик нижнего бьефа Нижнекамской ГЭС. Разработано программное обеспечение предлагаемой методики прогноза.

**Ключевые слова:** уровень нижнего бьефа ГЭС, гидравлическая характеристика, прогноз, программное обеспечение.

Задачи оптимального планирования суточных и долгосрочных режимов работы гидроэлектростанции, решаемые автоматизированными системами диспетчерского управления ГЭС в условиях оптового рынка электроэнергии, требуют высокой точности расчетов мощности выработки электроэнергии. Одной из важнейших характеристик, от которой во многом зависит эта точность, является зависимость уровня нижнего бьефа от расхода воды через турбины. Ошибки могут возникать вследствие неточности расчетных методов, а также непостоянства основных характеристик процесса. Таким образом, разработка более точных методов имеет важное практическое значение.

Управление выработкой активной мощности на гидроэлектростанции осуществляется путем изменения расхода воды через турбины, что, в свою оче-

редь, приводит к изменению уровней в бьефах ГЭС. Значения уровней необходимы для расчета гидравлических напоров и мощностей гидроагрегатов. Уровень верхнего бьефа для ГЭС с относительно большим объемом водохранилища и с небольшим допустимым его колебанием изменяется в течение суток незначительно, в этом случае уровень часто рассматривают как постоянную величину. К примеру, допустимое колебание верхнего уровня Нижнекамской ГЭС равно 20 см, что составляет 0,3 % от его среднего значения. Следовательно, основной задачей при прогнозировании выработки активной мощности ГЭС является определение гидравлической характеристики нижнего бьефа в реальных условиях эксплуатации гидроэлектростанции. Данная работа посвящена разработке методики прогноза уровня нижнего бьефа в условиях



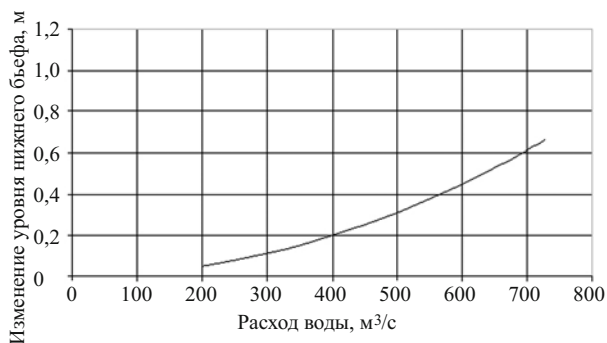


Рис. 1. Гидравлическая характеристика нижнего бьефа Нижнекамской ГЭС

суточного регулирования стока на примере Нижнекамской ГЭС.

Условия передвижения водных масс в руслах рек и водохранилищах ГЭС характеризуются неустановившимся движением воды, влиянием сложных природных условий, переменным подпором от нижерасположенной ГЭС. Учет подпора от ГЭС осложняется тем, что на определенный момент отсутствуют данные по наклону поверхности стока воды, времени добегания волн возмущения, граничным точкам и т.д. При эксплуатации ГЭС непрерывно происходит небольшая деформация русла, что приводит к изменению гидрометрических показателей, формирующих гидравлические характеристики ГЭС. Указанные факторы должны быть учтены в методах расчета уровня нижнего бьефа.

Для прогнозирования уровня нижнего бьефа в створе гидроэлектростанции в условиях нестационарности режима ее работы используются разные инженерные методы расчета [1 – 4], среди которых следует отметить “полутеоретический” метод экспонент [1 – 2], основанный на экспоненциальном представлении переходного процесса. Главные неточности метода связаны с тем, что принимается идеализированная ступенчатая форма возмущения по расходу воды; при проведении расчета используются параметры течения, которые также могут содержать неточности; для идентификации параметров модели необходимы эксперименты. Наряду с методом экспонент используются эмпирические методы, основанные на обработке экспериментальных данных в форме уравнений регрессии [3 – 4], однако эти модели ограничены экспериментальной областью значений параметров и мало приспособлены для описания нестационарных процессов.

В данной работе предлагается эмпирический метод прогноза уровня нижнего бьефа ГЭС, который в режиме реального времени использовал бы измерительные данные для уточнения расчетной модели.

На первом этапе проведен анализ статической и динамической характеристик нижнего бьефа ГЭС.

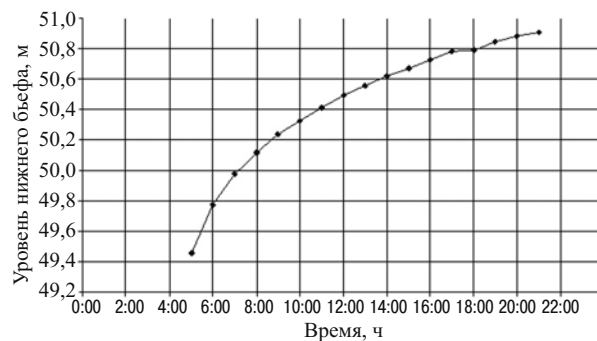


Рис. 2. Переходная характеристика нижнего бьефа Нижнекамской ГЭС

На рис. 1 приведена статическая (стационарная) характеристика нижнего бьефа Нижнекамской ГЭС, полученная фирмой “ОРГРЭС,” по которой определяется отклонение уровня нижнего бьефа для любого подпора нижележащего гидроузла в зависимости от расхода воды через турбины. По своему характеру приведенная зависимость является существенно нелинейной. Однако приведенная статическая характеристика не может использоваться при планировании суточной нагрузки, поскольку уровень нижнего бьефа в течение суток находится в нестационарном состоянии.

Фактическая зависимость уровня нижнего бьефа от расхода воды через ГЭС должна учитывать динамические свойства нижнего бьефа. Для анализа динамических свойств рассматриваемого объекта на основе данных телеметрии получена экспериментальная динамическая характеристика нижнего бьефа Нижнекамской ГЭС (рис. 2). Как следует из рис. 2, реальная кривая переходного процесса существенно отличается от теоретической, используемой в методе экспонент [1], отсутствием скачка уровня в начальный момент времени. Это можно объяснить тем, что реальная форма возмущения по расходу воды значительно отличается от ступенчатой. В соответствии с полученной кривой время переходного процесса после изменения расхода воды через турбины ГЭС составляет около 16 ч. Из этого следует, что при суточном регулировании нагрузки гидроэлектростанции процесс изменения уровня нижнего бьефа и производства электроэнергии в большинстве случаев будет протекать в динамическом режиме.

При частом изменении расходов воды через ГЭС, например при суточном регулировании нагрузки, происходит наложение динамических воздействий и связь уровня нижнего бьефа с изменением расхода воды значительно осложняется. Для суточного планирования режима ГЭС указанная гидравлическая характеристика нижнего бьефа представляет большой интерес при часовом изменении расходов, т.е. через каждый час. Такие зави-

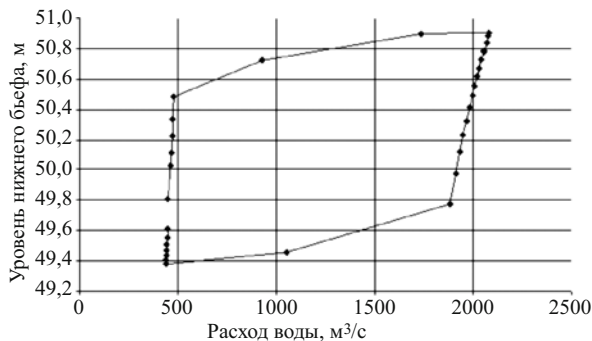


Рис. 3. Суточное изменение уровня нижнего бьефа при почасовом изменении расхода воды через турбины Нижнекамской ГЭС

симости были получены нами на основе архива телеметрических измерений. На рис. 3 представлен пример суточного эмпирического графика среднего уровня нижнего бьефа при почасовом изменении расхода воды от 380 до 2120 м<sup>3</sup>/с (квадратиками обозначены экспериментальные данные). Полученные графики имеют гистерезисный характер: нижняя ветвь кривой соответствует подъему, а верхняя — спаду уровня нижнего бьефа. Если сравнивать полученную зависимость со статической характеристикой (рис. 1), то нижняя ветвь кривой проходит ниже, а верхняя — выше стационарных значений. Следовательно, гистерезисный характер кривой, с одной стороны, объясняется влиянием, а с другой — учитывает динамическую составляющую процесса. Из полученного графика следует, что уровень нижнего бьефа в данный период и при данном расходе зависит от уровня в предыдущий период (как и у всех гистерезисных зависимостей) и что один и тот же уровень может быть связан с разными расходами воды.

В целях учета нестационарности, воздействия подпора нижерасположенной ГЭС и других воздей-

ствий внешних факторов нами разработан эмпирический метод прогноза уровня нижнего бьефа, суть которого заключается в следующем. Согласно теории и в соответствии с проведенным анализом уровень нижнего бьефа ГЭС является функцией двух переменных: расхода воды и времени переходного процесса  $z = f(Q, t)$  при дополнительном воздействии случайных возмущений. Для практических расчетов указанную функцию можно заменить совокупностью рекуррентных зависимостей, в соответствии с которыми уровень нижнего бьефа на следующий период времени можно определить с учетом планируемого расхода воды и исходного уровня бьефа:

$$z(t) = F(z(t - \Delta t), Q),$$

где  $\Delta t$  — интервал времени;  $z(t)$  — средний уровень нижнего бьефа в промежутке времени  $\Delta t$ ;  $z(t - \Delta t)$  — средний уровень за предыдущий период;  $Q$  — средний расхода воды через турбины в промежутке времени  $\Delta t$ .

При суточном планировании нагрузки важно знать, каким будет средний уровень бьефа через час при любом изменении расхода воды. Такие кривые могут быть получены на основе данных наблюдения за длительный период эксплуатации ГЭС. В качестве исходной информации для прогноза были использованы показатели телеметрии ГЭС, снимаемые через 3 мин и усредненные за каждый час в течение 30 предыдущих суток. На их основе создается основная таблица данных телеметрии  $[z(i, j), Q(i, j)]$ ,  $i = 1 \dots 24$ ,  $j = 1 \dots 30$ . По этой таблице строятся статистические кривые связи уровня с расходом воды  $z(i) = f(Q(i))$  при заданном исходном уровне  $z(i - 1) = \text{const}$ . Для этой цели весь диапазон

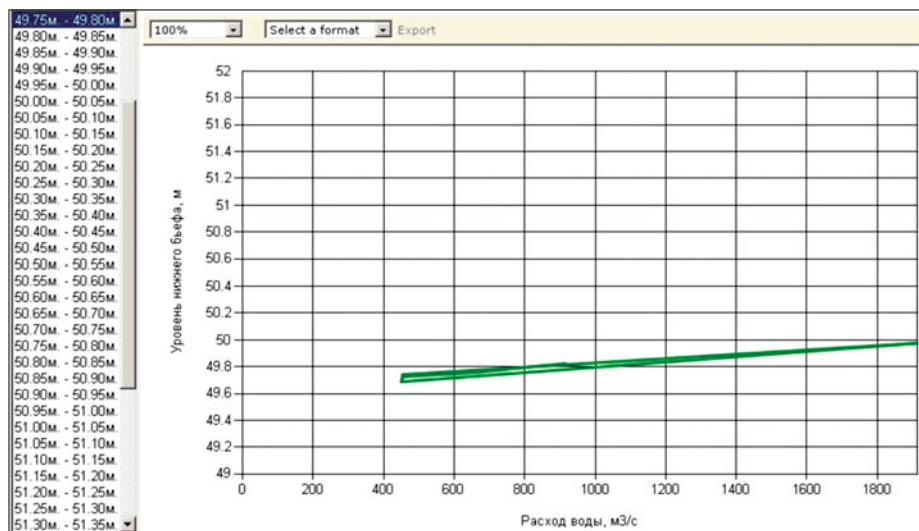


Рис. 4. Кривая прогноза уровня нижнего бьефа ГЭС на следующий час при исходном уровне в диапазоне 49,75 – 49,8 м в зависимости от нового расхода воды через турбины ГЭС

изменения уровня нижнего бьефа ГЭС разбивается на интервалы, наиболее оправданным с практической точки зрения является интервал шириной 5 см. Из основной таблицы данных делается выборка: на каждый интервал уровня нижнего бьефа предыдущего часа  $\Delta z(i-1)$  переносятся среднечасовые значения уровней и соответствующих им расходов  $[z(i), Q(i)]$ , входящих в указанный интервал. В результате получается расчетная зависимость данного интервала, которая затем используется для прогноза уровня на следующий период при известном его исходном значении. В качестве примера на рис. 4 представлена кривая прогноза уровня нижнего бьефа на следующий час при исходном уровне 49,75 – 49,8 м при установлении какого-то нового расхода воды через турбины ГЭС.

Для учета случайных изменений подпора нижней ГЭС и других внешних факторов предполагается ежедневное обновление основной таблицы исходных данных. В настоящее время большинство гидроэлектростанций России оборудовано системами телеметрии, позволяющими производить удаленные измерения и сбор информации о работе ГЭС. Это делает возможным автоматическое обновление исходных данных, что обеспечит значительное повышение точности прогноза.

По изложенной выше методике разработана программа прогноза уровня нижнего бьефа. Планируется использование этой программы в составе АСДУ Нижнекамской ГЭС. Метод прогноза и про-

грамма были опробованы путем сравнения текущих измерений с расчетными. Результаты проверки показали, что отклонения прогноза от фактических значений уровней не превышали 2 %, что на 2 % ниже допустимой в настоящее время точности расчета. Достоинствами предлагаемого метода и его программной реализации являются:

- возможность учета как нестационарности процесса, так и влияния случайных изменений подпора;
- возможность непрерывного обновления исходных данных;
- достаточно высокая точность прогноза.

Повышение точности расчета уровня нижнего бьефа на 2 % увеличивает точность расчета вырабатываемой мощности, например, Нижнекамской ГЭС около 1 %, что соответствует в среднем 2 МВт. Это значит, что при оптимальном планировании суточной нагрузки ГЭС фактическая и запланированная мощности будут отличаться на 1 %.

### Список литературы

1. *Оптимальные режимы гидроэлектростанций в энергетических системах* / Е. В. Цветков, Т. М. Алябышева, Л. Г. Парфенов / Под ред. Е. В. Цветкова. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. *Гидроэнергетика* / Под ред. В. И. Обрезкова. — М.: Энергоиздат, 1981.
3. *Грушевский М. С.* Неустановившееся движение воды в реках и каналах. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982.
4. *Асарин А. Е., Бестужева К. Н.* Водно-энергетические расчеты. — М.: Энергоатомиздат, 1986.

## Совершенствование теоретических основ, методов и методологии исследования противofильтрационной эффективности защитных облицовок каналов и водоёмов

Алимов А. Г., кандидат техн. наук, заместитель директора по науке  
(ГНУ Поволжский НИИ эколого-мелиоративных технологий)

Автором статьи разработаны экспресс-методы и методология ультразвукового контроля водопроницаемости деформационных швов и бетона мелиоративных ГТС, а также усовершенствован метод изолированных отсеков для определения потерь воды на фильтрацию из облицованных каналов, для их диагностирования при строительстве, эксплуатации и реконструкции водохозяйственных объектов. Разработанные методы и методология исследования облицовок каналов прошли экспериментально-производственную апробацию на водохозяйственных объектах Волгоградской области.

**Ключевые слова:** каналы, облицовки, деформационные швы, бетон, фильтромеры, изолированный отсек, ультразвук, экспресс-методы.

Экологические проблемы, возникшие в области мелиорации, во многом обусловлены фильтрационными потерями воды из каналов и водоёмов. Значительная фильтрация из водопроводящих сооружений в земляном русле, достигающая 40 – 50 % водозабора, вызывает нежелательные экологические последствия — подтопление, заболачивание и засоление прилегающих территорий.

Для устранения негативных явлений в каналах и водоёмах применяется противofильтрационная защита в виде различных облицовок и экранов. Однако и она не всегда обеспечивает достаточно эффективную экологическую защиту территорий вследствие водопроницаемости облицовки и деформаций грунта основания [1, 2].

Устройство противofильтрационных облицовок на каналах оросительных систем требует дополнительных капитальных затрат, поэтому особое внимание следует уделять технико-экономическому обоснованию их применения. Однако эти расчёты нельзя считать обоснованными, пока не будет установлена достоверная, увязанная с конкретными инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями, а также с качеством работ величина фильтрационных потерь. Необходимо в каждом конкретном случае определять фактические потери на фильтрацию и уточнять применяемые расчётные зависимости, основа которых — натурные измерения фильтрации из каналов [3].

Точность определения фильтрационных потерь, а следовательно, и практическая ценность получаемых экспериментальных данных зависят не только от применяемых методов и технических средств измерения, но и во многом от методики качественно-го проведения исследований.

Известны способы измерения потерь воды и определения коэффициента фильтрации через бетонную облицовку гидротехнических сооружений (ГТС), преимущественно каналов и водоёмов [4, 5], заключающиеся в использовании фильтромеров. При этих способах измеряют потери воды через монолитный или сборный бетон облицовки канала с помощью фильтромерных полостей, прижимаемых к облицовке через легко деформируемый материал. Фильтромерные полости устанавливаются вдоль откоса канала по поверхности облицовки, прижимают их к облицовке и с помощью прокладок герметично уплотняют. Внутрь полостей подают из тарированных ёмкостей воду, замеряют фильтрационный расход и определяют коэффициент фильтрации бетона, по которому в соответствии с ГОСТ 12730.5–84\* [6] устанавливают его водонепроницаемость. Фильтромеры позволяют измерять потери воды только в отдельных точках русла канала, и для определения общего объёма фильтрационных потерь (с погрешностью 13 – 19 % и более) через всю облицовку необходимо установить значительное количество приборов, число которых в работе [5] конкретно не обосновано. Поэтому эти и другие известные в настоящее время способы [7, 8] представляется сложным применить для фильтрационных испытаний противofильтрационных конструктивных элементов ГТС в связи со специфическим технологическим режимом их работы. Они отличаются значительной трудоёмкостью и стоимостью исследовательских работ.

Наиболее точным (погрешность 1 – 3 %) является способ определения потерь воды на фильтрацию из каналов с использованием изолированных водных отсеков, включающий выполнение специальных пазов на всю толщину облицовки по пери-

метру опорожненного от воды канала, установку в подготовленные пазы металлических перегородок для перекрытия канала на участке изолированного отсека, заделку пазов цементным раствором, установку в изолированном отсеке мерных реек и прибора для учёта испарения воды с водной поверхности канала, заполнение отсека водой и длительное его промачивание, замеры объёма потерь воды на фильтрацию и испарение в изолированном отсеке в условиях установившегося фильтрационного режима и расчётное определение удельного фильтрационного расхода из отсека канала, интенсивности фильтрации и коэффициента фильтрации облицовки [3, 9]. Недостатком этого способа является значительная трудоёмкость при монтаже и демонтаже металлических перегородок для создания изолированных фильтрационных отсеков на оросительных каналах в технологических окнах между поливами, что вызывает существенное удорожание и увеличение сроков проведения исследовательских работ по определению фильтрационных потерь воды из каналов.

Таким образом, одним из важных аспектов проблемы борьбы с фильтрационными потерями воды из каналов и сохранения (улучшения) исходного мелиоративного состояния орошаемых земель является разработка более совершенных экспресс-методов и методологии мониторинга противофильтрационной эффективности защитных облицовок в процессе эксплуатации.

По результатам теоретических, экспериментальных и натурных исследований автором разработаны и защищены патентами на изобретения [10, 11, 12] современные способы определения воды на фильтрацию из каналов и оценки эффективности противофильтрационных конструкций защитных облицовок.

*Способ определения потерь воды на фильтрацию из каналов (патент № 2312182) [10] заключается в следующем.* По периметру опорожнённого от воды канала на участке изолированного отсека выполняют пазы на всю толщину облицовки, свободно, без натяжения укладывают в подготовленные пазы полотнища из бутилкаучуковой или капроновой прорезиненной ткани для перекрытия канала на участке изолированного отсека и заделывают пазы цементным раствором. Через верх полотнищ в устроенные анкера-отверстия пропускают монтажные тросы, натяжением которых в перерывах между поливами при заполненном водой канале создают мягкие водонепроницаемые перегородки (рис. 1). Для фиксирования монтажных тросов в натянутом положении используют анкерные опоры, установленные на бермах канала. В изолированном отсеке устанавливают мерные рейки и прибор для учёта испарения воды с водной поверх-



**Рис. 1.** Фрагмент изолированного отсека с мягкими водонепроницаемыми перегородками из полимерных материалов на канале 4х-1 Кисловской ОС

ности, заполняют отсек водой и длительно его промачивают. В условиях установившегося фильтрационного режима осуществляют замеры объёма потерь воды на фильтрацию и испарение в изолированном отсеке и расчётным путём определяют удельный фильтрационный расход из отсека канала, интенсивность фильтрации и коэффициент фильтрации облицовки из следующих зависимостей:

$$Q_{\text{обл}} = \beta \times \frac{(\epsilon + 2m \cdot h) \cdot \Delta h [H(H\sqrt{1+m^2} + 2m\delta) + \epsilon(H+\delta)]}{T[h(h\sqrt{1+m^2} + 2m\delta) + \epsilon(h+\delta)]}; \quad (1)$$

$$q_{\text{обл}} = \alpha \times \frac{(\epsilon + 2m \cdot h) \cdot \Delta h [H(H\sqrt{1+m^2} + 2m\delta) + \epsilon(H+\delta)]}{T[h(h\sqrt{1+m^2} + 2m\delta) + \epsilon(h+\delta)](\epsilon + 2H\sqrt{1+m^2})}; \quad (2)$$

$$K_{\text{обл}} = \frac{\eta(\epsilon + 2m \cdot h) \cdot \Delta h \cdot \delta}{T[h(h\sqrt{1+m^2} + 2m\delta) + \epsilon(h+\delta)]}; \quad (3)$$

где  $Q_{\text{обл}}$  — удельный фильтрационный расход из отсека облицованного канала, л/(сут · пог. м);  $\beta$  — коэффициент соответствия размерностям,  $\beta = 8,64 \cdot 10^3$  л · с/(сут · см<sup>2</sup> · пог. м);  $\epsilon$  — средняя ширина по дну канала в отсеке, см;  $m$  — средний коэффициент заложения откосов канала в отсеке;  $h$  — средняя глубина воды в отсеке за время наблюдений, см;  $\Delta h$  — снижение уровня воды в отсеке за вычетом слоя испарившейся воды за время наблюдений, см;  $H$  — проектная глубина наполнения канала, см;  $\delta$  — средняя толщина облицовки канала в отсеке, см;  $T$  — время наблюдений, с;  $q_{\text{обл}}$  — интенсивность фильтрации из отсека облицованного канала, л/(сут · м<sup>2</sup>);  $\alpha$  — коэффициент соответствия



**Рис. 2.** Система изолированных водных отсеков с перегородками из полимерных материалов на канале 4х-1 Кисловской ОС

размерностям,  $\alpha = 8,64 \cdot 10^5 \text{ л} \cdot \text{с}/(\text{сут} \cdot \text{см} \cdot \text{м}^2)$ ;  $K_{\text{обл}}$  — осреднённый коэффициент фильтрации облицовки канала на участке отсека, см/с;  $\eta = 1,78/(1 + 0,0337t + 0,000221t^2)$  — коэффициент, учитывающий вязкость воды при различной температуре ( $t$ , °C).

Длину изолированного водного отсека принимают из выражения:

$$\alpha' H/i \geq L \geq L_{\text{м}}, \quad (4)$$

где  $L$  — длина изолированного водного отсека, м;  $L_{\text{м}}$  — минимальная длина изолированного водного отсека,  $L_{\text{м}} = 30$  м;  $\alpha'$  — коэффициент соответствия размерностям,  $\alpha' = 0,01$  м/см;  $H$  — проектная глубина наполнения канала, см;  $i$  — уклон дна канала в отсеке.

Минимальная длина  $L_{\text{м}} = 30$  м изолированного водного отсека обусловлена обеспечением высокой точности измерений данного способа (с погрешностью не более 1 %) по определению потерь воды на фильтрацию, а максимальная длина  $L \leq \alpha' H/i$  определяется из выражения (4) возможностью наполнения отсека канала.

Рассматриваемый способ определения потерь воды на фильтрацию (патент № 2312182) [10] прошёл широкое опытно-производственное внедрение (рис. 2) при обосновании эффективности применения различных противофильтрационных облицовок на каналах оросительных систем в Волгоградской области [1 – 3, 9].

Способ ультразвукового контроля водопроницаемости деформационных швов ГТС (патент № 2329354) [11], преимущественно противофильтрационных облицовок водопроводящих каналов и водоёмов, включает дефектоскопию опытных образцов швов из различных герметизирующих материалов и деформационных швов из идентичных герме-

тиков в реальных конструкциях сооружений ультразвуковым продольным профилированием путём установки излучателя и приёмника ультразвуковых колебаний (УЗК) на стыкуемых элементах, на расстоянии не более 20 мм от их торцевых кромок до осей установленных излучателя и приёмника и на одинаковом расстоянии от оси шва. При этом измеряют время и скорость распространения продольных волн УЗК в опытных образцах швов и в деформационных швах реальных конструкций сооружений, определяют водопроницаемость опытных образцов деформационных швов из различных герметиков и по результатам ультразвуковых и фильтрационных испытаний устанавливают семейство градуировочных зависимостей “скорость ультразвука — коэффициент водопроницаемости” для швов из различных герметиков, а затем по соответствующей рабочей градуировочной зависимости и выполненным натурным измерениям скорости распространения продольных волн УЗК в реальных швах определяют водопроницаемость деформационных швов ГТС, уплотнённых конкретными герметиками.

Автором настоящей статьи проведены долговременные режимные натурные фильтрационные и ультразвуковые исследования деформационных швов из различных герметиков в противофильтрационных облицовках из сборных железобетонных плит ПКН толщиной 6 см на мелиоративных системах Волгоградской области [13]. Конструкция исследованных деформационных швов выполнена по патенту на изобретение RU № 22789221 С2 [14]. По результатам исследований установлены градуировочные зависимости (5), (6) “скорость распространения УЗК ( $C_{jk}$ ) — коэффициент водопроницаемости ( $K_{\text{в}}$ )” для деформационных швов в противофильтрационных облицовках каналов из сборных железобетонных плит ПКН, которые описываются следующими уравнениями убывающих степенных функций:

для деформационных швов из тиоколовой мастики КМ-0,5

$$K_{\text{в}} = 4,5 \cdot 10^{36}/C_{jk}^{13}, \quad (5)$$

для деформационных швов из битумно-полимерной мастики (БПМ) по а. с. № 1548200 [12]

$$K_{\text{в}} = 1,348 \cdot 10^{35}/C_{jk}^{12,5}. \quad (6)$$

На рис. 3 показано корреляционное поле опытных точек и линии регрессии определения коэффициента водопроницаемости деформационных швов ( $K_{\text{в}}$ ) по формулам (5) и (6).

Максимальное отклонение расчётных значений коэффициента водопроницаемости деформационных швов ( $K_B$ ), установленных по уравнениям (5), (6) от экспериментальных (фактических) значений  $K_j$ , варьирует в пределах  $\pm (7 - 8 \%)$  и составляет в среднем 3,6 – 3,7 %.

Способ определения водонепроницаемости бетона ГТС (патент № 2331065) [12], преимущественно противодиффузионных облицовок каналов, (1-й вариант) включает измерение времени распространения ультразвуковых колебаний (УЗК) не менее чем в двадцати участках контролируемой зоны конструкции сооружения; вычисление средней скорости УЗК в каждом участке; определение базовых участков в контролируемой зоне, в которых измеренная скорость УЗК имеет максимальное, минимальное и наиболее близкое к средней скорости ультразвука значение; установку фильтромеров в намеченных участках; определение фильтрационных потерь и коэффициента фильтрации бетона ( $K_j$ ) в этих участках и расчёт  $K_j$  в любом участке контролируемой зоны конструкции из зависимости (1) с последующим определением марки бетона по водонепроницаемости по ГОСТ 12730.5–84\* [6]:

$$K_j = aC_j^\alpha, \quad (7)$$

где  $a$  — коэффициент пропорциональности, (см/с)/(м/с) $^\alpha$ :

$$a = (K_{\max}/C_{\min}^\alpha + K_n/C_n^\alpha + K_{\min}/C_{\max}^\alpha)/3; \quad (8)$$

$\alpha$  — коэффициент, характеризующий изменение зависимости коэффициента фильтрации бетона от скорости распространения в нём ультразвуковых колебаний:

$$\alpha = \lg(K_{\max}/K_{\min})/\lg(C_{\min}/C_{\max}); \quad (9)$$

$K_j$  — коэффициент фильтрации бетона на участке контролируемой зоны конструкции, см/с;  $C_{\min}$  — минимальная скорость распространения ультразвука в бетоне контролируемой зоны конструкции, м/с;  $C_n$  — значение скорости распространения ультразвуковых колебаний в бетоне контролируемой зоны конструкции, наиболее близкое к средней скорости ультразвука, м/с;  $K_{\max}$  — максимальный коэффициент фильтрации бетона в контролируемой зоне конструкции, см/с;  $K_n$  — коэффициент фильтрации бетона на участке контролируемой зоны конструкции, где скорость ультразвука имеет величину ( $C_n$ ), наиболее близкую к средней скорости ультразвука, см/с;  $K_{\min}$  — минимальный коэффициент фильтрации бетона в контролируемой зоне конструкции, см/с;  $C_j$  — скорость распространения

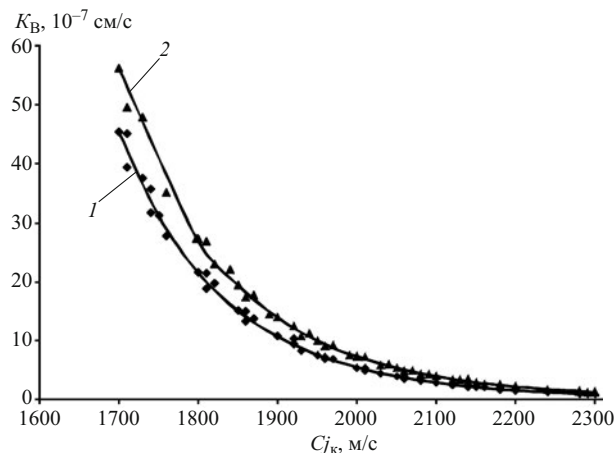


Рис. 3. График зависимости коэффициента водопроницаемости  $K_B$  от скорости распространения УЗК  $C_{jk}$  в деформационных швах:

1 — градуировочная зависимость  $K_B - C_{jk}$  для швов из тиколовой мастики КМ-0,5; 2 — градуировочная зависимость  $K_B - C_{jk}$  для швов из БПМ по [15];  $\diamond$ ,  $\blacktriangle$  — экспериментальные данные соответственно для швов из тиколовой мастики КМ-0,5 и БПМ по [15]

ультразвука в бетоне на  $j$ -м участке контролируемой зоны конструкции, м/с;  $C_{\max}$  — максимальная скорость распространения ультразвука в бетоне контролируемой зоны конструкции, м/с.

Разработанный метод (1-й вариант), включающий ультразвуковые и фильтрационные исследования непосредственно в конструкции ГТС, интегрально учитывает их реальные условия эксплуатации с возможным изменением фильтрационных характеристик при изменении давления, времени и скорости фильтрации бетона в процессе эксплуатации сооружений.

Экспериментально-производственная апробация разработанного метода (1-й вариант) контроля водонепроницаемости бетона ГТС выполнялась в 2007 г. по вышеописанной методике на участке (ПК 120+00 — ПК 155+00) Городищенской оросительной системы (МК ГОС) в Волгоградской области. По результатам исследований установлено [16]:

для монолитного бетона (состав: цемент 1, песок 2,3, щебень 3,75; В/Ц = 0,56; содержание цемента 320 кг/м $^3$ ) зависимость (7) имеет вид

$$K_j = 10,776 \cdot 10^{54}/C_j^{17,26}; \quad (10)$$

для предварительно напряжённых железобетонных плит ПКН

$$K_j = 3,05 \cdot 10^{55}/C_j^{17,4}. \quad (11)$$

Предложенный метод ультразвукового контроля водонепроницаемости бетона ГТС в процессе эксплуатации позволяет обеспечить достаточно высо-

кую точность определения коэффициента фильтрации и марки бетона по водонепроницаемости в конструкции ГТС: погрешность измерений по отношению к методу “точечных фильтромеров” варьирует в пределах  $\pm 8\%$ , что составляет в среднем  $4,8\%$  [16].

Ультразвуковой метод контроля водонепроницаемости бетона ГТС в процессе эксплуатации (2-й вариант) включает изготовление эталонных образцов цилиндрической формы из бетона того же номинального состава, по той же технологии и режиму отверждения, что и конструкции, подлежащие контролю; определение водонепроницаемости эталонных образцов воздействием напора воды со ступенчато возрастающим давлением на одну из плоскостей образца, загерметизированного по его периметру, до появления признаков фильтрации в виде отдельных капель воды; сбор и замеры объёма фильтрата; расчёт коэффициента фильтрации бетона эталонных образцов, возбуждение ультразвуковых колебаний (УЗК) в эталонных образцах и материале конструкции до начала контроля и после проведения фильтрационных испытаний; измерение времени и скорости распространения УЗК в эталонных образцах ( $C_b$ ) и в бетоне реальных конструкций сооружений ( $C_c$ ); расчёт изменения скорости УЗК ( $\Delta C_j = C_b - C_c$ ) по разности соответствующих скоростей ( $C_b - C_c$ ) распространения ультразвуковых колебаний в эталонных образцах и материале конструкции до начала контроля и после проведения фильтрационных испытаний; построение семейства градуировочных зависимостей “изменение скорости УЗК ( $\Delta C_j$ ) — коэффициент фильтрации ( $K_j$ )” для бетонов различного состава, технологии изготовления и режима отверждения. После этого по соответствующей рабочей градуировочной зависимости и установленному изменению скорости УЗК материала в натурных условиях определяют коэффициент фильтрации  $K_j$  и водонепроницаемость бетона в реальных конструкциях сооружений.

Экспериментально-производственная апробация разработанного метода (2-й вариант) контроля водонепроницаемости бетона ГТС выполнялась в 2007 г. по вышеописанной методике на участке (ПК 0+00 — ПК 2+00) соединительного канала между насосными станциями НС-1 и НС-2 Городищенской оросительной системы (ГОС) в Волгоградской области, облицованного монолитным бетоном по полиэтиленовой пленке (ГОСТ 10354–82\*). По результатам выполненных ультразвуковых и фильтрационных исследований установлена рабочая градуировочная зависимость  $\Delta C_j - K_j$ , которая описывается уравнением

$$K_j = 2,14 \cdot 10^{-21} \Delta C_j^{4,637}. \quad (12)$$

Погрешность в определении коэффициента фильтрации бетона предлагаемым методом (2-й вариант) ультразвукового контроля по отношению к методу “точечных фильтромеров” составила  $2 - 5,7\%$  (в среднем  $3,7\%$ ), что свидетельствует о высокой точности этого метода [16].

Разработанные экспресс-методы [11, 12] ультразвукового контроля водонепроницаемости деформационных швов и бетона ГТС позволяют в реальных условиях их эксплуатации исключить трудоёмкую и не всегда возможную установку фильтромеров и тем самым значительно снизить трудозатраты, стоимость и продолжительность исследовательских работ по определению фильтрационного расхода и коэффициента фильтрации противопрофильтрационных конструкций. Однако эти методы приемлемы для измерения потерь воды на фильтрацию только в отдельных точках облицованного русла канала.

Поэтому необходимо разработать методологию фильтрационных исследований защитных облицовок каналов и выполнить оценку достоверности измеренных потерь воды на фильтрацию разработанными автором точечными ультразвуковыми экспресс-методами [11, 12] путём их сопоставления со значениями, полученными методом изолированных водных отсеков [10]. С этой целью на участке МК ГОС, облицованного предварительно напряжёнными железобетонными (ж. б.) плитами ПКН со швами из тиоколовой мастики КМ-0,5 и введённого в эксплуатацию в 1973 г., было оборудовано два изолированных отсека ( $L = 30$  м) по способу [10], на которых проведены комплексные ультразвуковые и фильтрационные исследования по элементам противопрофильтрационной облицовки. Температура воды в отсеках на период исследований составляла  $20^\circ\text{C}$ , уровень грунтовых вод — на расстоянии 12 м от дна канала.

В процессе исследований выполняли ультразвуковое прозвучивание элементов противопрофильтрационной облицовки, определяли скорость УЗК в ж. б. плитах и деформационных швах и по формулам (5), (11) рассчитывали коэффициент фильтрации (водонепроницаемости) швов  $K_b$  и бетона  $K_j$ .

Фильтрационный расход из отсека канала  $Q_{\text{обл}}$  определяли суммированием потерь воды на фильтрацию через швы  $Q_{\text{ш}}$  и бетон  $Q_b$  защитной облицовки:

$$Q_{\text{обл}} = Q_{\text{ш}} + Q_b, \quad (13)$$

где



$$Q_{\text{ш}} = K_{\text{в}} B_{\text{ш}} \times \left[ L_{\text{ш}} \left( \frac{H + \delta}{\delta} \right) + \left( 2mH + \frac{H^2}{\delta} \sqrt{1 + m^2} \right) n_{\text{ш}} \right]; \quad (14)$$

$$Q_{\text{б}} = K_j (L - B_{\text{ш}} n_{\text{ш}}) \times \left[ \frac{B(H + \delta)}{\delta} + 2mH + \frac{H^2}{\delta} \sqrt{1 + m^2} \right]; \quad (15)$$

$B_{\text{ш}}$  — средняя ширина швов, см;  $L_{\text{ш}}$  — суммарная длина донных швов облицовки на участке отсека канала, см;  $n_{\text{ш}}$  — количество поперечных швов облицовки на участке отсека канала;  $Q_{\text{обл}}$ ,  $L$ ,  $K_{\text{в}}$ ,  $H$ ,  $\delta$ ,  $m$ ,  $K_j$  — см. пояснения к формулам (1) – (5), (11).

Осреднённый коэффициент фильтрации облицовки  $K_{\text{обл}}$  “по методу изолированных отсеков” [10] определяли по формуле (3), а  $K_{\text{обл}}$ , с учётом данных ультразвукового исследования экспресс-методами [11, 12] швов и бетона, устанавливали на основе формулы Н. Н. Веригина, С. В. Васильева и др. [17] для установившейся свободной фильтрации из облицованного канала:

$$K_{\text{обл}} = \frac{Q_{\text{обл}}}{L} \left[ \frac{B(H + \delta)}{\delta} + 2mH + \frac{H^2}{\delta} \sqrt{1 + m^2} \right]. \quad (16)$$

Интенсивность фильтрации облицовки  $q_{\text{обл}}$  на участке отсека канала определяли по формуле (2).

Результаты натурных и теоретических фильтрационных и ультразвуковых исследований противифльтрационной облицовки из ж. б. плит ПКН со швами из тиоколовой мастики КМ-0,5 на МК ГОС представлены в таблице.

По результатам комплексных исследований противифльтрационной облицовки из ж. б. плит ПКН со швами из тиоколовой мастики КМ-0,5 на МК ГОС (таблица) установлено следующее:

шаг ультразвукового прозвучивания швов  $\Delta l$  на участке опытных отсеков канала варьирует от 0,05 до 0,2 м, а средняя скорость УЗК при поверхностном прозвучивании — от 1644 до 1810 м/с;

расчётный коэффициент фильтрации (водопроницаемости) швов  $K_{\text{в}}$ , определённый по зависимости (5), составляет  $0,1 \cdot 10^{-6} - 12 \cdot 10^{-6}$  см/с (в сопряжении углов ж. б. плит), а его среднее значение —  $2,0 \cdot 10^{-6} - 7 \cdot 10^{-6}$  см/с;

количество участков прозвучивания бетона плит на  $1 \text{ м}^2$  облицовки изменяется в пределах от 4 до 20, а средняя скорость УЗК  $C_j$  при сквозном прозвучивании бетона — от 3480 до 3949 м/с;

расчётный коэффициент фильтрации  $K_j$  бетона ненарушенной структуры, установленный по зависимости (11) на основе данных ультразвуковых исследований, в отсеке № 1 варьирует в пределах

$0,01 \cdot 10^{-6} - 0,008 \cdot 10^{-6}$  см/с, а в отсеке № 2 —  $0,01 \cdot 10^{-6} - 0,003 \cdot 10^{-6}$  см/с;

среднее расчётное значение коэффициента фильтрации бетона, с учётом трещин и других дефектов в нём, при различной плотности его прозвучивания в отсеке № 1 составляет  $0,96 \cdot 10^{-6} - 1,09 \cdot 10^{-6}$  см/с, а в отсеке № 2 —  $0,16 \cdot 10^{-6}$  см/с;

расчётный коэффициент фильтрации облицовки в целом  $K_{\text{обл}}$  на участке отсека № 1 по данным ультразвуковых исследований составляет  $1,04 \cdot 10^{-6} - 1,4 \cdot 10^{-6}$  см/с, а  $K_{\text{обл}}$ , установленный на основе натурных фильтрационных исследований в изолированном водном отсеке № 1 по зависимости (3), равен  $1,47 \cdot 10^{-6}$  см/с;

расчётный коэффициент фильтрации облицовки в целом  $K_{\text{обл}}$  на участке отсека № 2 по данным ультразвуковых исследований равен  $0,4 \cdot 10^{-6}$  см/с, а  $K_{\text{обл}}$ , установленный по результатам натурных фильтрационных исследований в изолированном водном отсеке № 2, равен  $0,42 \cdot 10^{-6}$  см/с;

интенсивность фильтрации облицовки  $q_{\text{обл}}$  при проектном наполнении канала ( $H = 2,68$  м) по результатам ультразвуковых исследований в изолированном отсеке № 1 составляет  $24,3 - 32,8$  л/(сут  $\cdot$  м<sup>2</sup>), в отсеке № 2 —  $10,8$  л/(сут  $\cdot$  м<sup>2</sup>), а по данным натурных фильтрационных исследований  $q_{\text{обл}}$  в отсеке № 1 равна  $34,4$  л/(сут  $\cdot$  м<sup>2</sup>), в отсеке № 2 —  $11,3$  л/(сут  $\cdot$  м<sup>2</sup>);

с увеличением шага ультразвукового прозвучивания швов  $\Delta l$  от 0,05 до 0,2 м и одновременным уменьшением количества участков  $n$  УЗК исследования бетона от 20 до 4 погрешность  $\delta$  при определении коэффициента фильтрации  $K_{\text{обл}}$  и интенсивности фильтрации  $q_{\text{обл}}$  противифльтрационной облицовки, установленных по разработанным автором ультразвуковым экспресс-методам [11, 12], увеличивается от 4,8 до 29,4 % по сравнению с  $K_{\text{обл}}$  и  $q_{\text{обл}}$ , определённым на основе фильтрационных исследований методом изолированных водных отсеков [10];

противифльтрационная облицовка из ж. б. плит ПКН по ГОСТ 22930–87 [18] со швами из тиоколовой мастики КМ-0,5 на участке отсека № 2 МК ГОС после 38 лет эксплуатации имеет работоспособное состояние: осреднённый коэффициент фильтрации облицовки ( $K_{\text{обл}} = 4,2 \cdot 10^{-6}$  см/с =  $0,00036$  м/сут) соответствует требованиям СНиП 2.06.03–85 [19], а на участке отсека № 1 — ограничено работоспособное состояние:  $K_{\text{обл}} = 0,00127$  м/сут, что не соответствует требованиям СНиП 2.06.03–85, в 30 % ж. б. плит имеются трещины (0,1 – 1,5 мм), очаговые разрушения защитного слоя с обнажением арматуры и др.

**Результаты натуральных и теоретических фильтрационных и ультразвуковых исследований противофильтрационной облицовки из железобетонных плит ПКН со швами из тиколовой мастики КМ-0,5 на МК ГОС**

Номер отсека канала/длина $L$ , м	Шаг поверхностного прозвучивания швов $\Delta l$ , м / средняя скорость УЗК $C_{jk}$ , м/с	Расчётный средний коэффициент фильтрации (водопроницаемости) швов $K_v$ , $10^{-6}$ см/с	Количество участков прозвучивания бетона на $1 \text{ м}^2$ облицовки $n$ / средняя скорость УЗК бетона $C_j$ , м/с	Коэффициент фильтрации, $10^{-6}$ см/с		Интенсивность фильтрации при наполнении канала $2,68 \text{ м}$ $q_{\text{обл}}$ , л/(сут $\cdot$ $\text{м}^2$ )	Погрешность $\delta$ , %
				бетона $K_j$ (расчётный)	противофильтрационной облицовки $K_{\text{обл}}$		
1	2	3	4	5	6	7	8
1/30	0,05/1644	7 (0,3 – 12)	20/3480	1,09/0,05 – 0,008	1,40/1,47	32,8/34,4	4,8
			16/3484	1,07/0,04 – 0,007	1,38/1,47	32,3/34,4	6,1
			12/3488	1,05/0,03 – 0,006	1,35/1,47	31,6/34,4	8,2
			8/3496	1,01/0,02 – 0,005	1,30/1,47	30,4/34,4	11,6
			4/3504	0,96/0,01 – 0,004	1,23/1,47	28,8/34,4	16,3
	0,10/1687	5,4 (0,25 – 9,8)	20/3480	1,09/0,05 – 0,008	1,33/1,47	31,1/34,4	9,5
			16/3484	1,07/0,04 – 0,007	1,31/1,47	30,7/34,4	10,8
			12/3488	1,05/0,03 – 0,006	1,28/1,47	29,9/34,4	13,1
			8/3496	1,01/0,02 – 0,005	1,23/1,47	28,7/34,4	16,6
			4/3504	0,96/0,01 – 0,004	1,17/1,47	27,4/34,4	20,3
	0,15/1735	3,5 (0,15 – 6,0)	20/3480	1,09/0,05 – 0,008	1,24/1,47	29,0/34,4	15,7
			16/3484	1,07/0,04 – 0,007	1,22/1,47	28,5/34,4	17,2
			12/3488	1,05/0,03 – 0,006	1,19/1,47	27,8/34,4	19,2
			8/3496	1,01/0,02 – 0,005	1,15/1,47	26,9/34,4	21,8
			4/3503	0,96/0,01 – 0,004	1,09/1,47	25,5/34,4	25,9
1/30	0,20/1810	2,0 (0,10 – 3,5)	20/3480	1,09/0,05 – 0,008	1,18/1,47	27,6/34,4	19,7
			16/3484	1,07/0,04 – 0,007	1,16/1,47	27,1/34,4	21,2
			12/3488	1,05/0,03 – 0,006	1,14/1,47	26,7/34,4	22,4
			8/3496	1,01/0,02 – 0,005	1,08/1,47	25,3/34,4	26,5
			4/3504	0,96/0,01 – 0,004	1,04/1,47	24,3/34,4	29,4
2/30	0,20/1648	6,8 (0,3 – 11,4)	20/3949	0,16/0,01 – 0,003	0,40/0,42	10,8/11,3	5,0

**Примечания:**

1. В скобках указаны пределы изменения  $K_v$ .
2. В числителе графы 5 – осреднённый коэффициент фильтрации бетона  $K_j$  облицовки в целом, в знаменателе –  $K_j$  ненарушенной структуры.
3. В числителе граф 6, 7 приведены соответственно коэффициент фильтрации  $K_{\text{обл}}$  и интенсивность фильтрации облицовки  $q_{\text{обл}}$ , установленные ультразвуковыми экспресс-методами [11, 12], в знаменателе — методом изолированных отсеков [10].

**Выводы**

1. Существующие методы измерения потерь воды на фильтрацию через противофильтрационные конструкции с помощью фильтромеров и изолированных отсеков отличаются значительной тру-

доемкостью и чрезмерной продолжительностью испытаний, к тому же не всегда представляется возможным применить их для фильтрационных исследований защитных облицовок в связи со специфическим режимом эксплуатации ГТС.

2. Выполненные исследования позволяют рекомендовать разработанные автором экспресс-методы [11, 12] ультразвукового контроля водопроницаемости деформационных швов и бетона мелиоративных ГТС, а также усовершенствованный метод изолированных отсеков для определения потерь воды на фильтрацию из облицованных каналов [10], для их диагностирования при строительстве, эксплуатации и реконструкции водохозяйственных объектов.

3. Обоснована методология фильтрационных исследований облицовок каналов с применением разработанных автором экспресс-методов ультразвукового контроля водопроницаемости деформационных швов и бетона противофильтрационных конструкций [11, 12].

При достаточной плотности ультразвукового прозвучивания швов (шаг прозвучивания  $\Delta l = 0,05$  м) и бетона (20 точек прозвучивания на  $1 \text{ м}^2$  облицовки) разработанные экспресс-методы [11, 12] позволяют обеспечить допустимую для производственных условий точность (погрешность  $\delta = 5\%$ ) и достоверность определения потерь воды через противофильтрационные конструкции защитных облицовок каналов (таблица).

#### Список литературы

1. Алимов А. Г. Противофильтрационная защита каналов и водоёмов // Гидротехническое строительство. 2008. № 4. С. 36 – 41.
2. Алимов А. Г. Современные противофильтрационные конструкции защитных облицовок каналов и водоёмов // Гидротехническое строительство. 2008. № 7. С. 26 – 36.
3. Алимов А. Г., Гольденберг Э. И., Иванов В. М. Натурные исследования противофильтрационных одежд оросительных каналов // Гидротехника и мелиорация. 1977. № 8. С. 33 – 38.
4. А.с. № 1532645, А 1. М. кл<sup>3</sup>, Е 02 В 1 / 02. Устройство для измерения фильтрационных потерь / А. В. Ищенко, Р. Р. Галицкий, Т. С. Косенко и В. А. Рыбалкин (СССР) // Бюллетень изобретений. 1989. № 48.
5. Зоценко А. Ф. Измерение потерь воды приборами фильтромерами // Мелиорация и водное хозяйство. 1990. № 10. С. 44 – 46.
6. ГОСТ 12730.5–84\*. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости. М.: Изд. стандартов, 1986.
7. А. с. № 151137, А 1. М. кл<sup>3</sup>, G E 02 В 13 / 00. Способ определения абсолютных фильтрационных потерь на участке ирригационного канала / Г. В. Абелишвили (СССР) // Бюллетень изобретений. 1961. № 20.
8. А. с. № 918385. М. кл<sup>3</sup>, Е 02 В 3 / 16. Способ измерения потерь воды / В. М. Бойко (СССР) // Бюллетень изобретений. 1982. № 13.
9. Алимов А. Г. Эффективность и надёжность облицовок оросительных каналов // Гидротехника и мелиорация. 1982. № 4. С. 31 – 35.
10. Пат. № 2312182 (RU), С1 МПК E02B 3 / 16 (2006.01). Способ определения потерь воды на фильтрацию из каналов / А. Г. Алимов (RU) // Бюллетень изобретений. 2007. № 34.
11. Пат. № 2329354 (RU), С1 МПК E02B 3 / 16 (2006.01). Способ контроля водопроницаемости деформационных швов гидротехнических сооружений / А. Г. Алимов (RU) // Бюллетень изобретений. 2008. № 20.
12. Пат. № 2331065 (RU), С1 МПК G01N 29 / 00 (2006.01). Способ определения водонепроницаемости бетона гидротехнических сооружений в процессе эксплуатации (варианты) / А. Г. Алимов (RU) // Бюллетень изобретений. 2008. № 22.
13. Алимов А. Г. Ультразвуковой контроль водопроницаемости деформационных швов гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2008. № 8. С. 18 – 21.
14. Пат. № 2278921 (RU), С2 МПК E02B 3 (2006.01). Деформационный шов сборной облицовки каналов / А. Г. Алимов (RU) // Бюллетень изобретений. 2006. № 18.
15. А.с. № 1548200. А1 МКН<sup>3</sup>, С 09 D 123 / 04. Состав мастики для герметизации и гидроизоляции / В. В. Карпунин, А. Г. Алимов (СССР) // Бюллетень изобретений. 1990. № 9.
16. Алимов А. Г. Ультразвуковой контроль водонепроницаемости бетона мелиоративных гидротехнических сооружений в процессе эксплуатации // Гидротехническое строительство. 2009. № 5. С. 23 – 28.
17. Васильев С. В., Веригин Н. Н., Глейзер Б. А. и др. Методы фильтрационных расчётов гидромелиоративных систем. — М.: Колос, 1970.
18. ГОСТ 22930–87. Технические условия. Плиты железобетонные предварительно напряжённые для облицовки оросительных каналов мелиоративных систем. — М.: Изд. стандартов, 1987.
19. СНиП 2.06.03–85. Мелиоративные системы и сооружения / Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986.

# Модель движения кромки льда в водохранилищах руслового типа в период замерзания

Савельев К. Л., инженер (ОАО “Мособлгидропроект”),  
Козлов Д. В., доктор техн. наук (ФГБОУ ВПО МГУП)

Разработана модель движения кромки льда в водохранилищах руслового типа в период замерзания водного объекта. Верификация модели выполнена на примере процессов замерзания проектируемого водохранилища Красногорского гидроузла на р. Иртыше.

**Ключевые слова:** водохранилище, кромка льда, внутриводный лед, поверхностный лед, скорость потока, модель движения, уравнения в приближении мелкой воды, уравнение теплопроводности, приведенный коэффициент шероховатости.

Существует несколько подходов к расчету движения кромки льда в водохранилищах руслового типа и реках, в том числе метод Н. М. Абраменкова [1], и научно-практический подход Г. А. Трегуб [2, 3].

Трудность применения метода Н. М. Абраменкова заключается в том, что для расчета фазового перехода внутриводного льда в поверхностный лёд использовалась теория коагуляции частиц, предложенная для расчета слипания капель воды в атмосфере [4]. Её применение к процессу слипания частиц внутриводного льда является сомнительным. Второй подход относительно простой и основывается на теоретических зависимостях для определения расхода шуги, коэффициента покрытия льдом водной поверхности и т.д. Оба подхода подразумевают одномерный случай рассматриваемой задачи, когда ее параметры определяются как средние величины по живому сечению водохранилища руслового типа (реки или канала).

В настоящей работе предпринята попытка отойти от теории коагуляции частиц при рассмотрении процесса слипания частиц внутриводного льда и использовать предположение, что частицы льда слипаются за счет сил адгезии. При определённой концентрации внутриводного льда (критической концентрации) сила адгезии начинает превалировать над механической силой и частички льда начинают сцепляться в единое целое.

**Постановка задачи.** Рассматривается двумерная область решения задачи в продольном разрезе, представленном на рис. 1.

Предполагается, что ширина водохранилища является одинаковой вдоль рассматриваемого уча-

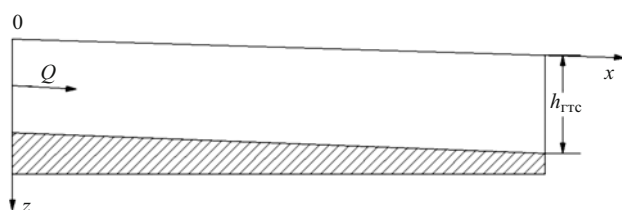


Рис. 1. Область решения задачи

стка. Начало отсчета системы координат  $xOz$  соответствует зоне выклинивания подпора. В конце расчетной области (справа) находится гидротехническое сооружение, которое поддерживает НПУ водной поверхности в верхнем бьефе. Значение НПУ соответствует глубине  $h_{гтс}$ .

Рассматривается класс водохранилищ, которые отвечают следующим условиям:

скорости потока воды являются умеренными;

с точки зрения термического режима водохранилище является мелким;

сплошной ледяной покров в водохранилище в период осенне-зимних заморозков формируется за счёт шуги, отдельно плывущих льдин.

Для расчета скорости потока и глубины водохранилища используется одномерная система дифференциальных квазистационарных уравнений в приближении мелкой воды (1) и (2), при этом коэффициент Шези определяется по формуле Маннинга:

$$\frac{\partial(h \cdot v)}{\partial t} + \frac{\partial(h \cdot v^2)}{\partial x} = -g \cdot h \cdot \frac{\partial H}{\partial x} - g \cdot n_{rg}^2 \cdot v^2 \cdot h^{-1/3}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h \cdot v)}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

где  $h$  — глубина водохранилища;  $v$  — средняя по живому сечению водохранилища скорость воды;  $t$  — время;  $g$  — ускорение свободного падения;  $H$  — уровень свободной поверхности;  $n_{rg}$  — приведенный коэффициент шероховатости русла.

На входе в расчетную область задается постоянный расход, а на выходе (около гидротехнического сооружения) — постоянный уровень свободной поверхности. Так как поток является установившимся, то для определения скоростей используется метод последовательного приближения; при этом на нулевой итерации метода задается нулевое распределение скоростей.

Для расчета температуры воды используется нестационарное двумерное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\lambda_T}{c_p \cdot \rho} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (3)$$

где  $T$  — температура воды;  $\lambda_T$  — коэффициент динамической турбулентной теплопроводности, определяется по рекомендациям [5];  $c_p$  — удельная теплоемкость воды;  $\rho$  — плотность воды.

На свободной поверхности задается условие (4), а на границе раздела вода — грунт условие (5):

$$-\lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \cdot (T_{air} - T_s) - S_e + S_R; \quad (4)$$

$$-\lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} = -S_b, \quad (5)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи водной поверхности, определяется по рекомендациям [5];  $T_{air}$  — температура воздуха;  $T_s$  — температура воды на свободной поверхности;  $S_e$ ,  $S_R$  и  $S_b$  — соответственно тепловые потоки испарения, радиационного излучения и на границе раздела вода — грунт, определяются по рекомендациям [5].

Для задания граничного условия на входе в расчетную область решается уравнение (6) совместно с условиями (4) и (5):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_T}{c_p \cdot \rho} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (6)$$

В начальный момент времени задается температура воды, равная  $0^\circ\text{C}$ .

Для расчета абсолютной концентрации внутриводного льда используется двумерное нестационарное уравнение диффузии

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{ci}}{\partial t} + \frac{\partial(v \cdot C_{ci})}{\partial x} + \omega_g \frac{\partial C_{ci}}{\partial z} = \\ = D_z \frac{\partial^2 C_{ci}}{\partial z^2} + \frac{c_p \cdot \rho \cdot \Delta T}{\sigma \cdot \Delta t}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $C_{ci}$  — абсолютная концентрация внутриводного льда;  $\omega_g$  — гидравлическая крупность частиц внутриводного льда, согласно [6] значение которой —  $0,05$  м/с;  $D_z$  — коэффициент вертикального турбулентного обмена, который согласно [7] определяется по формуле (8);  $\Delta T$  — переохлаждение воды, которое определяется по соотношению (9);  $\Delta t$  — интервал времени, за который вода переохладилась на величину  $\Delta T$ , принимается равным расчетному

шагу по времени (порядка  $10$  с);  $\sigma$  — скрытая теплота плавления льда;

$$D_z = \gamma u_* h; \quad (8)$$

$$\Delta T = \begin{cases} T_{cr} - T, & T_{cr} > T \\ 0, & T_{cr} \leq T \end{cases}, \quad (9)$$

где  $\gamma$  — константа, согласно [7] принимается равной  $0,2$ ;  $u_*$  — динамическая скорость потока, определяемая по формуле (10);  $T_{cr}$  — температура кристаллизации воды, равная  $0^\circ\text{C}$ .

$$u_* = \sqrt{ghi}, \quad (10)$$

где  $i$  — уклон свободной поверхности воды.

На свободной поверхности и на границе раздела вода — грунт задается условие

$$D_z \frac{\partial C_{ci}}{\partial z} = \omega_g \cdot C_{ci}. \quad (11)$$

Для определения концентрации внутриводного льда на входе в расчетную область можно использовать уравнение (12) с граничным условием (11) на свободной поверхности и на границе раздела вода — грунт

$$\frac{\partial C_{ci}}{\partial t} + \omega_g \frac{\partial C_{ci}}{\partial z} = D_z \frac{\partial^2 C_{ci}}{\partial z^2} + \frac{c_p \cdot \rho \cdot \Delta T}{\sigma \cdot \Delta t}. \quad (12)$$

В начальный момент времени задается нулевая концентрация внутриводного льда. Следует заметить, что влияние переохлаждения воды на процесс формирования внутриводного льда происходит за счёт температуры переохлаждения воды  $\Delta T$ , которая определяется по формуле (9).

Для расчета скорости наступления кромки льда использовалась формула

$$v_{ei} = 86,4 \frac{L}{t_{ei}}, \quad (13)$$

где  $v_{ei}$  — скорость наступления кромки льда, км/сут;  $L$  — длина водохранилища;  $t_{ei}$  — время, за которое кромка льда проходит участок водохранилища от гидротехнического сооружения до зоны выклинивания подпора.

Время определяется исходя из продолжительности накопления шуги перед кромкой льда и достижения концентрации внутриводного льда в поверхностном слое некоторого критического значения в заданном створе. Таким образом, последовательность расчета состоит из следующих этапов:

1) определяются скорость и глубина по всей длине водохранилища;

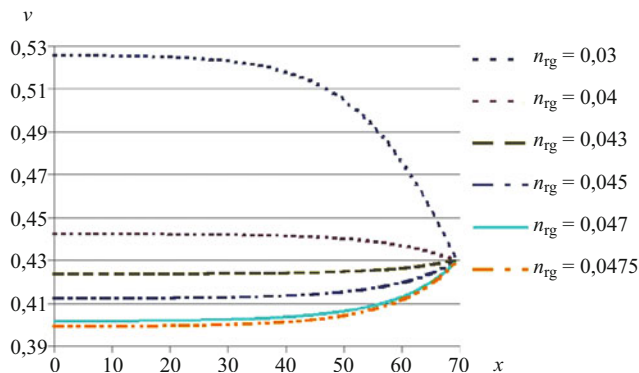


Рис. 2. Скорости воды по длине реки при различных коэффициентах приведенной шероховатости

- 2) задаются время  $t = 0$  и положение кромки льда  $x_{ei} = L$ ;
- 3) определяется температура воды на участке водохранилища при  $0 \leq x \leq x_{ei}$ ;
- 4) определяется концентрация внутриводного льда на участке водохранилища при  $0 \leq x \leq x_{ei}$ ;
- 5) определяется начальная толщина льда в створе по формуле из [8]

$$h_i = 1,77 \frac{v^2 \cdot B}{C^2}, \quad (14)$$

где  $h_i$  — начальная толщина льда;  $B$  — ширина водохранилища;  $C$  — коэффициент Шези, который определяется по формуле

$$C = \frac{R^{1/6}}{n_{rg}}, \quad (15)$$

где  $R$  — гидравлический радиус;

- б) определяется средняя концентрация внутриводного льда в верхнем слое толщиной  $h_i$  по формуле

$$\bar{C}_{ci} = \frac{1}{h_i} \int_0^{h_i} C_{ci} \cdot dz; \quad (16)$$

- 7) проверяется условие: если значение  $\bar{C}_{ci} \geq C_{ci}^*$  (где  $C_{ci}^*$  — критическая концентрация внутриводного льда, при которой частицы льда спаиваются между собой, образуя единый лед), то считается, что в створе образовалась кромка льда; при этом  $x_{ei} = x_{ei} - \Delta x$  (где  $\Delta x$  — шаг по пространству вдоль оси  $Ox$ ) иначе не изменяется;

- 8) увеличивается время  $t = t + \Delta t$  и повторяются действия с 3 по 7. Выполнение действий повторяется до тех пор, пока кромка льда не достигнет створа, где происходит выклинивание подпора, т.е. когда  $x_{ei} = 0$ .

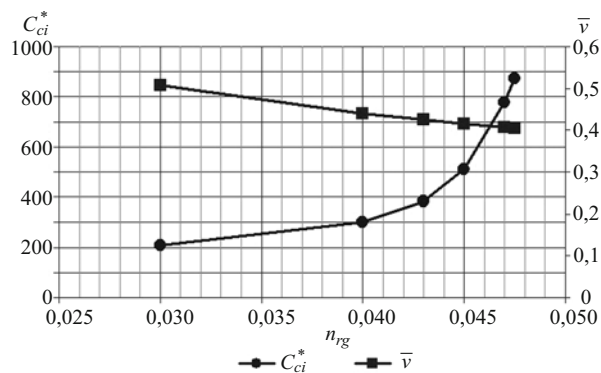


Рис. 3. Зависимость критической концентрации внутриводного льда и средней скорости воды на заданном участке реки от коэффициента приведённой шероховатости

В итоге выполнения расчетов получаем промежутки времени  $t$ , включающий в себя:

интервал времени, в котором происходит генерация шуги, когда концентрации внутриводного льда еще не достаточно для построения кромки льда (время аккумуляции  $t_{ac}$ );

интервал времени продвижения кромки льда, когда кромка начинает двигаться от гидротехнического сооружения вверх по течению и заканчивает свое движение в створе выклинивания подпора.

**Верификация модели движения кромки льда на реальном объекте.** Рассматривается участок р. Иртыш длиной 70 км, который начинается в створе в районе расположения о. Красногорский и заканчивается в створе у с. Розовка Омской области. После возведения Красногорской плотины на р. Иртыш на данном участке будет располагаться водохранилище руслового типа. Стоит задача подобрать значения  $n_{rg}$  и  $C_{ci}^*$ , чтобы расчетная скорость движения кромки льда в реке на рассматриваемом участке соответствовала средней многолетней скорости покрытия льдом водной поверхности по наблюдениям на заданном участке р. Иртыш.

В табл. 1 представлены средние многолетние продолжительности и даты начала (окончания) ледовых явлений на близлежащих к проектируемому водохранилищу водпостах. Самым вышележащим водпостом является с. Покрово-Иртышское, а нижележащим — с. Красноярка. Расстояние между данными водпостами по р. Иртыш равно 172 км. Анализируя даты начала ледостава, можно сделать вывод, что кромка льда проходит участок в 172 км в среднем за 5 дней, поэтому скорость движения кромки льда равна примерно 35 км/сут.

При заданном приведенном коэффициенте шероховатости  $n_{rg}$  значение критической концентрации внутриводного льда  $C_{ci}^*$  подбирается так, чтобы расчетная скорость движения кромки льда совпала со скоростью 35 км/сут в пределах заданной точности расчета. В данной работе предлагается

Характерные даты осенних и зимних ледовых образований на р. Иртыше

Водпост	Появление ледовых образований	Начало ледохода (шугохода)	Начало ледостава	Продолжительность, дни	
				ледохода	ледостава
с. Покрово-Иртышское (1960 – 2004 гг.)	02.11	04.11	16.11	12	157
д. Новая Станица (1980 – 2008 гг.)	06.11	07.11	16.11	10	156
г. Омск (1891 – 1998 гг.)	01.11	01.11	11.11	9	162
с. Красноярка (1958 – 2008 гг.)	03.11	04.11	11.11	7	162

полуэмпирический подход по определению  $C_{ci}^*$ , который базируется на соотношении механической энергии потока (кинетической энергии) с тепловой энергией, отводимой от поверхности воды. Записывая равенство тепловой и кинетической энергии, делая арифметические преобразования и вводя некоторые обозначения, получаем формулу для определения критической концентрации внутриводного льда

$$C_{ci}^* = A_c + \frac{B_c}{\bar{v}^2}, \quad (17)$$

где  $A_c, B_c$  — эмпирические параметры, которые зависят от метеорологических и гидрологических параметров и определяются эмпирическим путём для каждого водохранилища (реки) в отдельности;  $\bar{v}$  — средняя скорость воды в водохранилище (на рассматриваемом участке реки).

**Результаты расчета.** Вначале необходимо определить концентрацию внутриводного льда, при которой скорость движения кромки льда в реке совпадёт со скоростью 35 км/сут. Для этого был выполнен ряд расчётов. На рис. 2 представлено распределение скоростей потока по длине реки при различных коэффициентах приведенной шероховатости.

По полученным скоростям потока определяют средние скорости воды на рассматриваемом участке реки. Рассчитываются критические концентрации внутриводного льда при скорости движения кромки льда в реке, равной 35 км/сут. Полученные результаты расчёта представлены на рис. 3. По данным рис. 3 и с использованием формулы (17) определяются эмпирические коэффициенты  $A_c, B_c$ , которые представлены в табл. 2.

На следующем этапе составляется прогноз об изменении скорости движения кромки льда в водохранилище. Для этого определяются средние скорости воды на водохранилище (рис. 4). По найденным скоростям и по заданным коэффициентам  $A_c, B_c$  табл. 2 определяются критические концентрации

внутриводного льда по формуле (17). Полученные критические концентрации представлены на рис. 5. Окончательно рассчитываются скорости движения кромки льда в водохранилище, результаты расчетов представлены на рис. 6. Из рис. 5 и 6 следует, что приведённый коэффициент шероховатости должен находиться в пределах от 0,043 до 0,0475, так как при коэффициенте меньше 0,043 критическая кон-

Т а б л и ц а 2

Значения эмпирических коэффициентов  $B_c$  при заданных коэффициентах  $A_c$  и  $n_{rg}$  для определения критической концентрации внутриводного льда в водохранилище

$A_c$	$n_{rg}$					
	0,03	0,04	0,043	0,045	0,047	0,0475
209	0	–	–	–	–	–
300	23,4	0	–	–	–	–
400	49,2	19,4	2,89	–	–	–
500	75,0	38,8	20,9	–	–	–
600	101	58,2	39,0	15,7	–	–
800	–	99,9	75,0	50,1	4,00	–
920	–	120	96,7	70,8	23,8	6,67
1200	–	–	147	119	70,0	52,4
1500	–	–	–	171	119	101
1600	–	–	–	190	136	118
1650	–	–	–	197	144	126
2000	–	–	–	–	202	183
2500	–	–	–	–	284	264
2600	–	–	–	–	301	281
2750	–	–	–	–	–	305
2875	–	–	–	–	–	326
3000	–	–	–	–	–	346

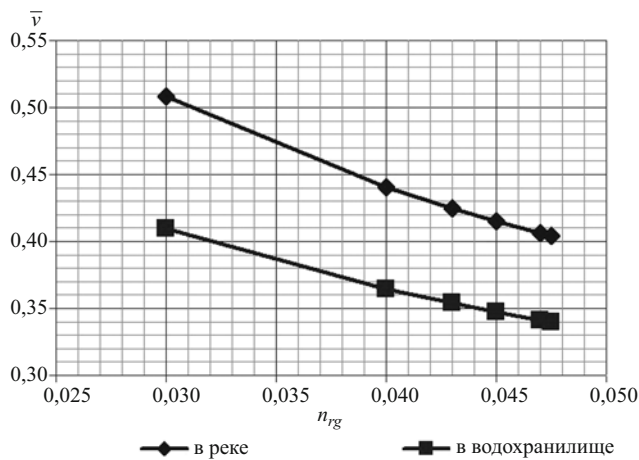


Рис. 4. Зависимость средних скоростей в водохранилище и на участке реки от коэффициента приведённой шероховатости

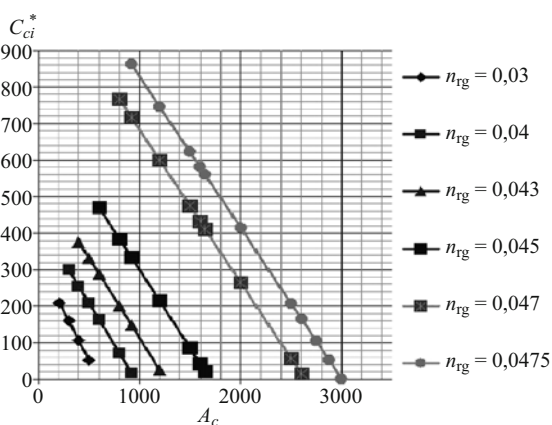


Рис. 5. Значение критической концентрации внутриводного льда в водохранилище при различных коэффициентах приведённой шероховатости

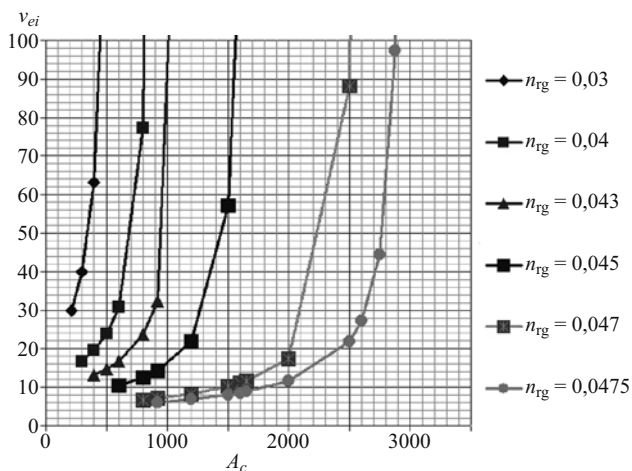


Рис. 6. Скорость наступления кромки льда в водохранилище

центрация внутриводного льда находится ниже границы ( $400 \text{ кг/м}^3$ ) области допустимых значений, а при значениях больше  $0,0475$ , наоборот, находится выше верхней границы ( $920 \text{ кг/м}^3$ ) допустимых

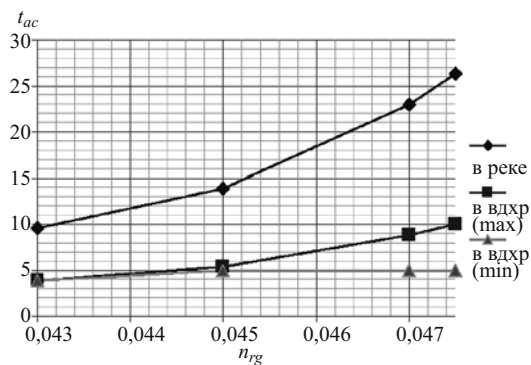


Рис. 7. Зависимость времени аккумуляции внутриводного льда от коэффициента приведённой шероховатости

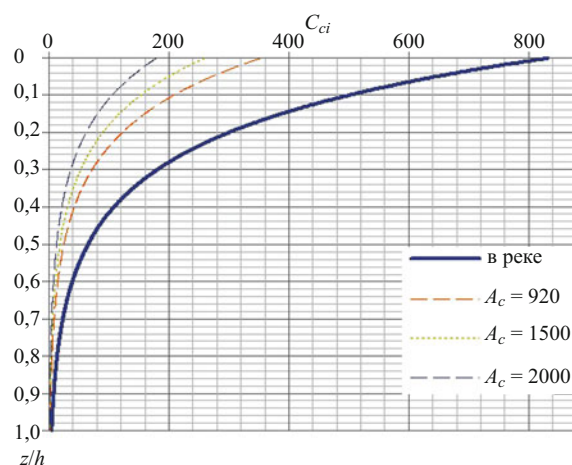


Рис. 8. Распределение концентрации внутриводного льда по глубине при  $x = 0 \text{ км}$

значений критической концентрации внутриводного льда. Также скорость наступления кромки льда в водохранилище находится в пределах от 6 до  $12,5 \text{ км/сут}$ .

На следующем этапе определяется параметр “время аккумуляции внутриводного льда”, который характеризует время, необходимое для формирования внутриводного льда, от момента образования первых ледовых явлений до момента, когда кромка льда начнет двигаться от створа проектируемой Красногорской плотины на р. Иртыш вверх по течению. На рис. 7 представлена зависимость времени аккумуляции внутриводного льда от приведенного коэффициента шероховатости, из которой следует, что движение кромки льда в водохранилище начинается раньше, чем в реке.

На рис. 7 – 12 представлено распределение концентрации внутриводного льда по глубине как в реке, так и в водохранилище при различных коэффициентах  $A_c$  на момент начала движения кромки льда в начале, в середине и в конце рассматриваемого участка реки, а также объёмный расход льда  $Q_{ci}$  и средняя по живому сечению реки (водохрани-



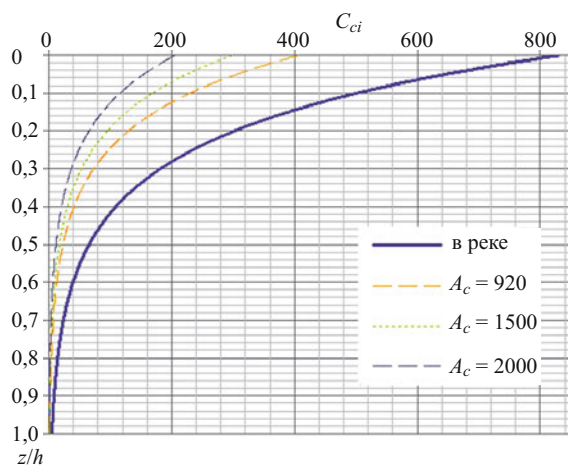


Рис. 9. Распределение концентрации внутриводного льда по глубине, при  $x = 35$  км

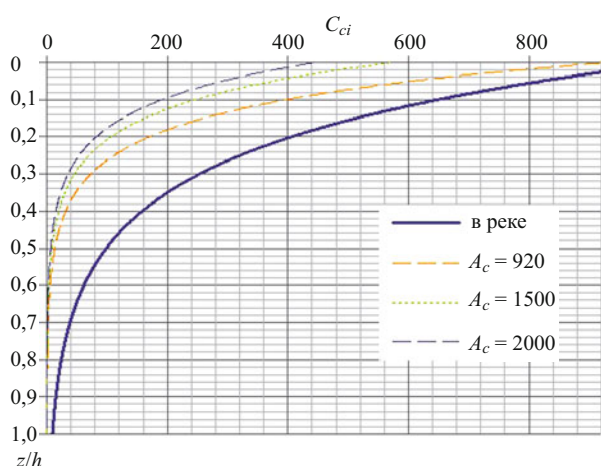


Рис. 10. Распределение концентрации внутриводного льда по глубине при  $x = 70$  км

лища) концентрация льда при приведенном коэффициенте шероховатости, равном 0,0475.

### Выводы

1. Расчеты показали, что приведенный коэффициент шероховатости в период замерзания для участка р. Иртыш в зоне Красногорского водохранилища может варьироваться от 0,043 до 0,0475.

2. Скорость наступления кромки льда в водохранилище меньше чем в реке, от 3 до 6 раз и составляет от 6,0 до 12,5 км/сут. Это объясняется тем, что расход внутриводного льда в реке больше, чем в водохранилище.

3. Продвижение кромки льда в водохранилище начинается раньше чем в реке. При приведённом коэффициенте шероховатости 0,043 раньше на 5,5 сут, а при  $n_{rg} = 0,0475$  — на 16 – 21 день.

4. Ледостав в водохранилище начинается раньше чем в реке (суммируя время аккумуляции внутриводного льда с временем прохождения кромки

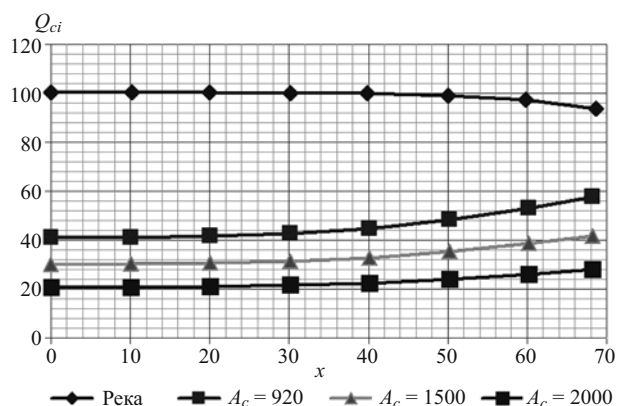


Рис. 11. Распределение объёмного расхода льда вдоль реки и водохранилища

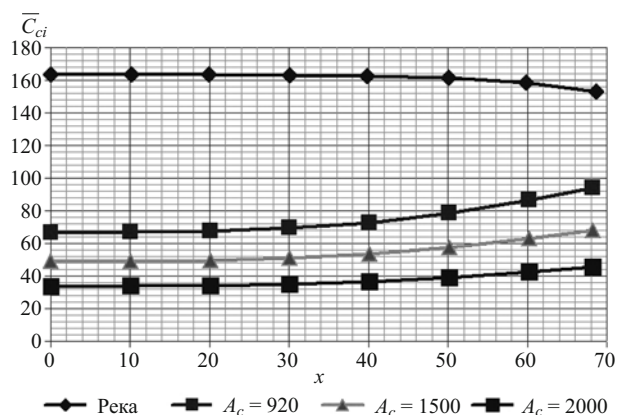


Рис. 12. Распределение средней по живому сечению абсолютной концентрации льда вдоль реки и в водохранилище

льда рассматриваемого участка реки и водохранилища):

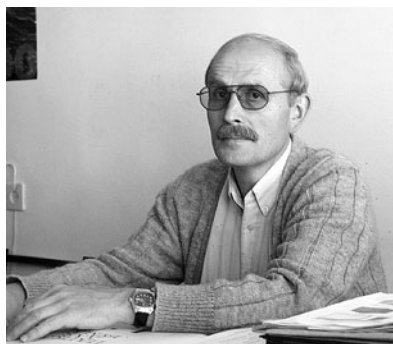
при  $n_{rg} = 0,043$  ледостав в водохранилище начнется раньше чем в реке на 1,3 сут;

при  $n_{rg} = 0,0475$  ледостав в водохранилище начнется раньше чем в реке на 7 – 17 сут.

5. На момент начала движения кромки льда на рассматриваемом участке реки и водохранилища распределение концентрации внутриводного льда по глубине в реке больше чем в водохранилище. Следует заметить, что объёмный расход льда в реке в 2 – 5 раз больше чем в водохранилище. Это объясняется тем, что время аккумуляции внутриводного льда для водохранилища меньше по сравнению с рекой, и, как следствие, в реке наблюдаются большие расходы внутриводного льда.

6. Получение универсальной методики расчёта движения кромки льда требует задания критической концентрации внутриводного льда, для определения которой необходимо знать значения коэффициентов  $A_c$ ,  $B_c$ . Функциональная зависимость данных коэффициентов от гидрологических и метеорологических параметров будет получена после выполнения ряда расчетов по вышеописанной ме-

## Поздравление Вячеславу Борисовичу Глаговскому



11 июня 2012 г. исполнилось 65 лет со дня рождения заслуженного работника ЕЭС России, первого заместителя генерального директора – научного руководителя ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”, доктора технических наук Вячеслава Борисовича Глаговского.

В. Б. Глаговский – известный специалист в области аналитических и численных методов решения задач теории упругости и консолидации, применения методов математического моделирования к задачам гидротехнического и энергетического строительства. Под его руководством осуществлялись обоснование проектирования и оценка состояния ряда крупных гидротехнических сооружений, выполнены работы по обоснованию проектирования фундаментов турбоагрегатов большой мощности тепловых станций и фундаментов реакторных отделений атомных станций.

Он более 15 лет руководит работами по расчетному обоснованию проектов опорных блоков ледостойких стационарных и плавучих нефте- и газодобывающих платформ на шельфе России. С его участием разработан ряд нормативных документов, в том числе СНиП “Основания гидротехнических сооружений”, ПИ-НАЭ “Основания реакторных отделений АЭС” и др.

В настоящее время, являясь научным руководителем института, Вячеслав Борисович ведет большую работу в ряде научных и общественных организаций, принимает активное участие в организации и проведении российских и международных совещаний. Он является членом технического комитета по расчетам Международной комиссии по большим плотинам, технического комитета Международного общества по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению, членом редколлегии журнала “Основания, фундаменты и механика грунтов”.

Вячеслав Борисович – автор научных работ, известных в России и за рубежом, имеет более 150 публикаций в журналах “Прикладная математика и механика”, “Гидротехническое строительство”, “Сейсмостойкое строительство”, “Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” и др.

В. Б. Глаговский – ветеран “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”, награжден знаком “80 лет плана ГОЭЛРО”, Почетной грамотой ОАО “ГидроОГК”.

Гидротехническая общественность, коллеги, друзья поздравляют юбиляра, желают ему крепкого здоровья и плодотворной научной и производственной деятельности на благо энергетики России.

тодике на различных водохранилищах руслового типа (участках рек) и анализа результатов расчета.

7. Предлагаемая модель является сложной для инженерных расчётов, но, с другой стороны, позволяет более детально описать ледовые процессы в верхнем бьефе гидротехнических сооружений и тем самым предоставляет более точную исходную информацию для принятия конструктивных проектных решений. Разработанная модель движения кромки льда позволяет определить распределение внутриводного льда по глубине водохранилища, что предоставляет исходную информацию для проектирования затворных сооружений и принятия решений по пропуску внутриводного льда через водосбросы гидротехнических сооружений. Ранее разработанные модели не позволяли это сделать, так как не рассматривали распределение шуги по глубине, а принимали ее значение как среднее по живому сечению водохранилища руслового типа (реки).

### Список литературы

1. *Абарменков Н. М.* Моделирование процесса замерзания шугоносных рек // Труды Среднеазиатского регионального научно-исследовательского института им. В. А. Бугаева. — М.: Гидрометеиздат. Моск. отд-ние, 1984. Вып. 101 (182).
2. *Пехович А. И., Трегуб Г. А.* Расчёт шугообразования и движения кромки ледяного покрова в нижних бьефах ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1980. Т. 143.
3. *Пехович А. И.* Основы гидроледотермики. — Л.: Энергоатомиздат, 1983.
4. *Волощук В. М., Седунов Ю. С.* Процессы коагуляции в дисперсных системах. — Л.: Гидрометеиздат, 1975.
5. *Рекомендации по термическому расчету водохранилищ: П 78-79 / ВНИИГ. Л., 1979.*
6. *Рышиа В. А.* Ледовые исследования на реках и водохранилищах. — Л.: Гидрометеиздат, 1959.
7. *Фидман Б. А.* Турбулентность водных потоков. — Л.: Гидрометеиздат, 1991.
8. *Рекомендации по расчету длины полыньи в нижних бьефах ГЭС: П 28 – 86 / ВНИИГ. Л., 1986.*

### Иосиф Сергеевич Завалишин (к 100-летию со дня рождения)



И. С. Завалишин родился в 1912 г. в Тифлисе, в семье инженера. В 1924 г. семья переехала в Москву. После окончания школы И. С. Завалишин работал клёпальщиком на заводе “Парострой”, где под руководством главного инженера В. Г. Шухова осваивал производство первых в стране цельносварных котлов. В 1938 г. с отличием окончил Инженерно-строительный институт им. В. В. Куйбышева.

С 1938 по 1941 г. И. С. Завалишин работал в институте “Гидроэнергопроект”. Внёс предложение об увеличении мощности ХрамГЭС, которое было принято и внедрено. Участвовал в изысканиях по энергетическому освоению р. Витим.

В июне 1941 г. И. С. Завалишин ушел на фронт и до мая 1945 г. воевал в действующей армии. Возводил мосты и переправы через Днепр, Вислу, Одер. Принимал участие в обороне Москвы, Сталинграда, воевал на Курской дуге, освобождал Бухарест, Варшаву, Прагу. Войну закончил в чине майора, имел восемь правительственных наград, в том числе два ордена Боевого Красного Знамени.

С 1946 по 1950 г. И. С. Завалишин работал заместителем главного инженера на строительстве Мингечаурской ГЭС в наиболее сложный период, когда приходилось преодолевать значительные трудности, связанные с крайне неблагоприятными геологическими условиями стройки.

С 1950 по 1955 г. И. С. Завалишин работал в аппарате Министерства энергетики и электрификации СССР, в Главгидроэнергострое и Главвостокгидроэнергострое в должностях заместителя начальника и начальника производственного отдела, в Главтехстройпроекте — в должности начальника технического отдела. Он внёс предложения, способствовавшие успешному окончанию строительства первой мощной ГЭС Сибири — Усть-Каменогорской и быстрому развёртыванию строительства Иркутской, Новосибирской и Бухтарминской ГЭС. Для Братской ГЭС предложил принятую и осуществлённую схему укладки бетона с помощью высокой двухъярусной эстакады и двухконсольных кранов.

С 1955 по 1957 г. И. С. Завалишин исполнял обязанности главного инженера строительства Красноярской ГЭС.

С 1957 по 1972 г. работал в институте “Гидропроект” им. С. Я. Жука в должностях заместителя начальника от-

дела, начальника отдела, главного специалиста. Именно с этим институтом связан значительный вклад И. С. Завалишина в развитие строительного комплекса СССР. Главный его проект назывался “Унификация сооружений гидроэлектростанций и методов их возведения”, в котором были впервые сформулированы основные принципы современной организации крупного строительства. Экспертная комиссия Технического совета Министерства энергетики и электрификации СССР одобрила эти принципы и отметила, что их реализация “неизбежно потребует полной реорганизации строительного дела в Министерстве”.

В 1960 г. И. С. Завалишин предложил новую конструкцию благоустроенного сборно-разборного дома для строителей, положившую начало разработке серии домов ПДУ, ГПД, УГПД и т.д.

Под руководством И. С. Завалишина был выполнен проект организации строительства Камского автозавода, где впервые было инициировано применение буронабивных свай. Он руководил отделом, составившим проект организации строительства Камского автозавода. Был инициатором применения буронабивных свай на Камском автозаводе. Предложение по сваям реализовано и дало значительный экономический эффект.



С конца 1970-х г. И. С. Завалишин занимался вопросами научной организации труда в институте “Гидропроект”. К сожалению, эта работа без увязки её с основными вопросами реорганизации строительства и проектирования не могла стать достаточно эффективной.

Последним любимым проектом И. С. Завалишина был проект города-сада. Во многом опередив свое время, как и положено инженеру подобного масштаба, он задумался над вопросами оптимального развития городских территорий, создания дружественной городской среды. Его последние работы и сегодня заслуживают внимания и в полной мере могут использоваться в проектах развития больших городов.

## Александр Александрович Боровой (к 100-летию со дня рождения)

26 мая 2012 г. исполнилось 100 лет со дня рождения выдающегося советского гидроэнергетика, заслуженного строителя России, первого заместителя председателя Госстроя СССР Александра Александровича Борового, трудовая деятельность которого была неразрывно связана со становлением и развитием советской школы гидроэнергетического и водохозяйственного строительства.

Окончив в 1936 г. Военно-инженерную академию им. В. В. Куйбышева, А. А. Боровой начал работать на строительстве московских мостов и набережных, затем в экспедиции подводных работ особого назначения и в Гипроавиапроме. С 1944 по 1948 г. принимал активное участие в восстановлении Днепровской гидроэлектростанции имени В. И. Ленина, возглавляя отдел научно-исследовательских работ.

В 1948 г. А. А. Боровой был направлен в центральный аппарат Министерства электростанций СССР, где, работая в должностях начальника Технического управления по строительству, начальника и главного инженера Главэнергопроекта, первого заместителя председателя Технического совета и начальника Главного управления по строительству и проектированию, возглавлял руководство проектно-исследовательскими и научно-исследовательскими работами в области строительства энергетических объектов, в том числе крупнейших гидроэлектростанций, высоких плотин и др.

С 1970 г. А. А. Боровой находился на ответственной работе в Госстрое СССР. Его активная творческая деятельность способствовала внедрению новейших достижений научно-технического прогресса в различных областях строительства, позволяла ему успешно осуществлять эффективное руководство технической и экономической экспертизой всех проектов крупных и сложных предприятий и сооружений. Он разработал предложения по изменению и упорядочению всей системы проектирования и строительства, которые получили широкую поддержку инженерной общественности и были внедрены в практику.

Многогранная деятельность А. А. Борового как одного из руководителей государственного комитета не ослабила его внимания к проблемам энергетики, гидротехники и водного хозяйства, в решении которых он по-прежнему принимал активное участие. С 1955 г. он возглавлял Советский национальный комитет Международной комиссии по большим плотинам (ICOLD). Одновременно был избран на пост вице-президента Международной комиссии по большим плотинам, что в значительной степени способствовало укреплению авторитета Советского Союза и росту



популярности отечественного плотиностроения за рубежом.

С 1974 г. А. А. Боровой был председателем Комиссии Совета Министров СССР по разработке мероприятий по экономическому и эффективному использованию водных ресурсов страны. Руководил гидроэнергетической секцией Научного совета по проблемам энергетики Государственного комитета по науке и технике, состоял членом Межведомственного совета по атомной энергетике. В 1975 г. А. А. Боровой был назначен в Комитет по Ленинским и Государственным премиям, в котором возглавлял строительную секцию и со-

стоял членом президиума Комитета. Он возглавлял Комиссию по премиям Совета Министров СССР за наиболее выдающиеся проекты и строительство по этим проектам, советскую часть Комиссии по сотрудничеству в области техники и экономики строительства с Францией, США и ЧССР.

А. А. Боровой является автором многочисленных научных, технических и научно-популярных работ и статей по вопросам энергетики и гидроэнергостроительства. Под его редакцией систематически издавались материалы конгрессов Международной комиссии по большим плотинам, монографические выпуски серии "Геология и плотины". С 1963 по 1970 г. он был главным редактором журнала "Гидротехническое строительство", проявив большие организаторские способности и оперативность, в результате чего основной широкопрофильный журнал советских гидротехников и гидроэнергетиков получил признание и стал распространяться не только в СССР, но и за рубежом.

Выдающийся вклад Александра Александровича Борового в разработку и реализацию новейших инженерных решений, многолетняя активная деятельность в области промышленного, гражданского и энергетического строительства отмечены высокими правительственными наградами: орденом Ленина, орденом Октябрьской Революции, двумя орденами Трудового Красного Знамени, орденом Дружбы народов, орденом "Знак Почета", государственными и ведомственными медалями. Ему присвоено почетное звание "Заслуженный строитель РСФСР", за участие в проектировании и строительстве Чарвакской гидроэлектростанции присуждена премия Совета Министров СССР.

Редколлегия журнала и гидротехническая общественность с большой теплотой вспоминают годы совместной работы с Александром Александровичем Боровым, его незаурядную способность окружать себя талантливыми людьми, быть лидером огромных коллективов. Светлая память о нем всегда будет в наших сердцах.

## Николай Владимирович Дмитриев — основатель отечественной школы специальных работ в энергетическом строительстве

Исполнилось 80 лет со дня рождения Николая Владимировича Дмитриева — инженера-гидротехника, крупного специалиста в области организации, технологии и производства специальных работ в энергетическом строительстве.

Н. В. Дмитриев родился 28 марта 1932 г. в г. Бологое в семье инженера путей сообщения. Окончив Московский энергетический институт, в 1956 г. Н. В. Дмитриев получает назначение в Государственный всеоюзный трест “Гидроспецстрой”. Здесь за 37 лет он прошел путь от производителя работ до президента акционерной фирмы “Гидроспецстрой”. Первый производственный опыт Н. В. Дмитриев приобрёл, участвуя в сооружении самой большой в СССР противофильтрационной завесы из секущихся буробетонных свай на строительстве Чурубай-Нуриной плотины, образующей водохранилище Карагандинской ГРЭС-2. Уникальные работы, конкурирующие с мировым опытом, вошли в историю отечественных достижений специальных гидротехнических работ.

Через год Н. В. Дмитриев командировается на строительство плотины Иркутской ГЭС начальником изыскательской партии Гидроспецстроя по ликвидации фильтрации из водохранилища. Здесь в 1958 – 1959 гг. под его руководством разработан и успешно реализован проект устройства первой в нашей стране инъекционной завесы, организованы первые экспериментально-производственные мастерские для изготовления нестандартного инъекционного оборудования, подобран квалифицированный состав рабочих и ИТР, проведены многократные лабораторные исследования. В условиях строительства отработывались новые составы тампонажных и обойменных растворов, была выполнена надёжная двухрядная опытно-производственная завеса, что позволило наполнить водохранилище Иркутской ГЭС до проектных отметок. Накопленный опыт позволил отработать и создать классическую схему производства надёжных инъекционных завес, в том числе и на зарубежных объектах.

В 1962 г. Николай Владимирович Дмитриев назначается главным инженером проекта инъекционных работ конторы “Гидроспецпроект” и командировается в Египет на строительство Высотной Асуанской плотины в должности начальника Управления инъекционных работ. Несмотря на сложнейшие геологические условия и ряд других больших трудностей, на Асуане была выполнена уникальная сверхглубокая инъекционная завеса, результаты и эффективность которой остаются непревзойденными в мировой практике до наших дней.

Работая на строительстве Асуанской плотины в Египте и одновременно являясь руководителем крупнейшего производственного управления, Н. В. Дмитриев заложил основы будущей производственной структуры треста “Гидроспецстрой”. За успехи в строительстве Высотной Асуанской плотины Н. В. Дмитриев был удостоен ордена “Знак Почета” и награды Объединённой



Арабской Республики (Египет) — ордена “За заслуги I степени”.

После возвращения в Москву в 1966 г. Н. В. Дмитриев назначается заместителем управляющего треста “Гидроспецстрой”. Новый этап его трудовой деятельности связан с активным участием в строительстве Братской, Красноярской, Нурекской, Байпазинской, Папанской и других ГЭС. Николай Владимирович принимает участие в решении вопросов по внедрению в производство новой техники и созданию новых технологий. В связи с увеличением объемов проектно-сметной документации, повышением от-

ветственности и расширением выполняемых функций по инициативе Н. В. Дмитриева контора “Гидроспецпроект” была преобразована в институт “Гидроспецпроект”.

В 1971 г. на строительстве производственных цехов Камского автомобильного завода (КАМАЗ) был успешно реализован опыт Н. В. Дмитриева, приобретенный им при работе в Карагандинской экспедиции. По его предложению проектные фундаменты из забивных составных свай были заменены новыми фундаментами из буробетонных (буронабивных) свай, что позволило осуществить пуск основных производственных мощностей КАМАЗа на год раньше намеченного срока. Группа гидроспецстроевцев во главе с Н. В. Дмитриевым была отмечена высокими правительственными наградами, а Государственный всеоюзный трест “Гидроспецстрой” был награжден высшей наградой страны — орденом Ленина.

С 1976 по 1993 г. Н. В. Дмитриев был бессменным начальником Всесоюзного объединения “Союзгидроспецстрой” и президентом акционерной фирмы “Гидроспецстрой”. В этот период под его руководством формируется отечественная школа по производству специальных гидротехнических работ. Силами Гидроспецстроя была разработана и фактически сформирована новая отрасль специальных гидротехнических работ, без которой в течение четырёх десятилетий не обходилось ни одно строительство крупного гидросооружения в нашей стране и за рубежом. Школа мастерства специальных работ Гидроспецстроя завоевала высокую международную репутацию. Инъекция, цементационные завесы, а позднее буровзрывные и туннельные работы успешно выполнялись Гидроспецстроем на гидротехнических объектах многих стран мира.

В тот период в нашей стране ежегодно сдавались в эксплуатацию крупные энергоблоки, что требовало выполнения огромных объёмов специальных работ, обновления существующих технологий и оборудования и, соответственно, значительного увеличения количества высококлассных специалистов. Но в программе учебных заведений для гидротехников-строителей не было сведений о ведении специальных гидротехнических работ. Молодым инженерам приходилось самостоятельно восполнять существующие в образовании пробелы и овла-

девать знаниями опытным путём. Н. В. Дмитриев организовал систематическое проведение всесоюзных совещаний и совещаний по технике безопасности с подведением итогов года. Широкое распространение имел регулярный обмен информацией о новых достижениях в этой области в нашей стране и за рубежом. Издавался сборник трудов Гидроспецстроя, технические достижения публиковались в журнале “Гидротехническое строительство” и других изданиях.

Н. В. Дмитриев развивал и укреплял деловое сотрудничество с ведущими научно-исследовательскими институтами страны. Институты, в свою очередь, в своих исследованиях и разработках опирались на богатый производственный опыт Гидроспецстроя.

В институте “Гидроспецпроект” при проектировании важнейших объектов проводили необходимые прикладные научные исследования, расчеты, модельные, лабораторные, натурные и опытные обоснования принимаемых проектных решений. Среди новшеств, разработанных и внедрённых Н. В. Дмитриевым, была организация совместного труда нескольких спецуправлений одновременно на одном объекте. В этом случае производственные спецуправления Гидроспецстроя в целях ускоренного завершения пусковых объёмов могли быть привлечены и организованы по принципу вахтового метода. Эти приёмы использовались Гидроспецстроем при организации интенсивных круглосуточных работ на ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в мае — октябре 1986 г.

Одной из первых организаций, прибывших в начале мая на ликвидацию последствий аварии на Чернобыльской АЭС, был Гидроспецстрой. В экстремальной обстановке были созданы оперативные штабы Гидроспецстроя (которые возглавлял Н. В. Дмитриев) с размещением их на Чернобыльской АЭС. В работах принимали участие сотрудники всех подразделений Гидроспецстроя. Объединение выполняло работы по бурению скважин большого диаметра для сбора загрязнённых поверхностных вод, горнопроходческие работы и устройство подфундаментной плиты с цементацией шва под аварийным реактором, устройство противоточной “стены в грунте” длиной более 2 км и вертикальный дренаж. Напряжённые работы в тяжелой радиационной обстановке были организованы вахтовым методом, круглосуточно, в четыре смены по 6 часов. Весь

коллектив под руководством Н. В. Дмитриева с полной отдачей сил обеспечивал своевременное и качественное выполнение беспрецедентных объёмов специальных гидротехнических работ, намеченных Правительственной комиссией.

В работах на Чернобыльской АЭС приняли участие 2000 гидроспецстроевцев. Николай Владимирович Дмитриев непосредственно участвовал и руководил работами с мая по июль 1986 г. в течение 47 суток, что составило самый длительный период пребывания в активной радиационно опасной зоне.

За заслуги перед страной Н. В. Дмитриев был награждён двумя орденами Трудового Красного Знамени, орденами “Знак Почёта”, Октябрьской Революции и Дружбы народов. Ему были присвоены почётные звания “Заслуженный инженер Грузинской ССР”, “Заслуженный энергетик Таджикской ССР”, “Отличник энергетики и электрификации СССР”, “Почётный энергетик СССР”. Он был дважды награждён золотыми медалями ВДНХ СССР и другими наградами.

Николай Владимирович вёл большую общественную работу. Он был членом Президиума национального комитета СССР по механике грунтов и фундаментостроению, членом Российского национального комитета Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ), членом редакционных коллегий журналов “Гидротехническое строительство”, “Основания и фундаменты”, “Энергетическое строительство”. Н. В. Дмитриев является автором более 70 опубликованных работ, включая 6 монографий и 12 изобретений, многие из которых широко используются в нашей стране и за рубежом.

Личное обаяние, широкий кругозор и интерес ко всему новому, доброжелательность и талант руководителя создавали вокруг Н. В. Дмитриева творческую, деловую атмосферу и неизменно приводили к успеху.

Н. В. Дмитриев скончался 15 декабря 1993 г.

На многочисленных построенных объектах среди фамилий знаменитых гидростроителей, отлитых золотом на граните, можно увидеть имя основателя производственной школы Гидроспецстроя и создателя отрасли специальных гидротехнических работ Николая Владимировича Дмитриева. Жизнь и трудовая деятельность этого творческого инженера и патриота — яркий пример для последователей, учеников и молодого поколения гидротехников нашей страны.

## Водные ресурсы Центральной Азии и их использование в интересах гидроэнергетики и ирригации

Петров Г. Н., кандидат техн. наук (ИВПЭРТ)

Для всех стран Центральной Азии водные ресурсы являются основой двух важнейших отраслей экономики: гидроэнергетики и орошаемого земледелия, которое в условиях аридного климата региона основывается на ирригации.

Ирригация в Центральной Азии возникла несколько тысяч лет назад [1], а максимальное развитие получила во второй половине прошлого века. К этому времени все водные ресурсы двух основных речных бассейнов региона — Амударьи и Сырдарьи, составляющие в сумме 116,48 км<sup>3</sup> [2], были уже исчерпаны. В табл. 1 приведены объемы используемых водных ресурсов в регионе [3]. В настоящее время в маловодные годы в бассейне Аральского моря наблюдается дефицит воды для орошаемого земледелия. Такая ситуация складывалась в регионе в 2001 и 2009 гг.

В отличие от орошаемого земледелия гидроэнергетика относительно новая для стран Центральной Азии отрасль, где она начала развиваться только в середине прошлого века. К настоящему времени освоена только очень небольшая часть имеющихся водных ресурсов. В двух наиболее богатых гидроэнергоресурсами странах — Таджикистане и Кыргызстане — из общих потенциальных запасов 527 ТВт · ч в год [4] вырабатывается только 15 – 18 ТВт · ч, в Кыргызстане при потенциале 246 ТВт · ч в год [5] освоено только 10 – 14 ТВт · ч.

Сегодня в странах верхнего течения — Таджикистане и Кыргызстане, не имеющих других видов энергоресурсов, развитие гидроэнергетики является жизненно необходимым, и она признана национальным приоритетом экономического развития этих стран. В то же время для стран нижнего течения — Казахстана, Туркменистана и Узбекистана, в которых наиболее развито орошаемое земледелие, важнейшей задачей является его сохранение хотя бы на достигнутом уровне.

В этих условиях между гидроэнергетикой стран верхнего течения и ирригацией стран нижнего возникли конфликты интересов или коллизия видов использования, приобретшие межгосударственный характер [6]. Этому способствовало то, что все основные ресурсы региона имеют трансграничный характер, а регулирование их стока осуществляется в зоне его формирования, в Кыргызстане и Таджикистане, с помощью расположенных там крупных

ГЭС с водохранилищами. Причем в каждом основном речном бассейне Аральского моря имеется всего по одному крупному регулирующему водохранилищу: в Сырдарьинском — Токтогульское, в Амударьинском — Нурукское.

В связи с этим намечаемое в Таджикистане и Кыргызстане строительство новых крупных ГЭС вызывает серьезные опасения и возражения со стороны стран, расположенных в нижнем течении, прежде всего Узбекистана.

В настоящее время межгосударственные конфликты между странами в области использования водноэнергетических ресурсов трансграничных рек могут решаться только в рамках международного права [7, 8]. Три базовых обязательства международного права:

- справедливое и разумное использование трансграничных вод;
- предотвращение, ограничение и сокращение трансграничного воздействия;
- сотрудничество между странами трансграничных бассейнов на основе равенства и взаимности по сути, просто утверждают принципы отношений между странами в духе доброй воли с учетом взаимных интересов.

Такие же рамочные, даже еще более общие положения закрепились в региональных соглашениях между странами Центральной Азии, заключенных после 1991 г.

В соглашении 1992 г. [9] декларируются равные права всех стран на использование водных ресурсов: “Признавая общность и единство водных ре-

Таблица 1

Динамика использования водных ресурсов в бассейне Аральского моря, км<sup>3</sup>

Страна	1980 г.	1990 г.	1995 г.	2000 г.	2007 г.
Казахстан	12,632	11,209	9,878	7,067	7,732
Кыргызстан	3,370	3,339	3,270	2,851	2,838
Таджикистан	12,557	12,847	12,444	12,745	13,426
Туркменистан	23,764	25,859	27,904	24,125	26,412
Узбекистан	72,785	61,202	59,661	49,178	54,591
Всего по БАМ	125,108	114,465	113,156	95,965	104,999

сурсов региона, Стороны обладают одинаковыми правами на использование и ответственность за обеспечение их рационального использования и охрану”.

В Нукусской декларации [10] всеми Центрально-азиатскими государствами признаются все ранее подписанные договоры и соглашения по водным ресурсам: “Мы согласны с тем, что Центрально-азиатские государства признают ранее подписанные и действующие соглашения, договора и другие нормативные акты, регулирующие взаимоотношения между ними по водным ресурсам в бассейне Арала, и принимают их к неуклонному выполнению”.

Таким образом, как международные конвенции, так и региональные соглашения только создают фундамент, обеспечивают нормативные рамки и формируют правовое поле для принятия решений по совместному использованию водноэнергетических ресурсов трансграничных рек. Сами эти решения должны вырабатываться в каждом отдельном случае с учетом конкретных условий и обстоятельств.

Обычно рассматриваются три разных подхода к решению проблемы совместного использования водноэнергетических ресурсов трансграничных рек [11]:

- принцип абсолютного территориального суверенитета и абсолютной территориальной целостности;

- доктрина ограниченного территориального суверенитета;

- принцип оптимизации общих выгод.

Принцип абсолютного суверенитета предусматривает исключительное право страны на использование формирующихся на ее территории водных ресурсов. Он восходит к так называемой доктрине Хармона, министра юстиции и генерального прокурора США, который в 1895 г., в споре между США и Мексикой относительно загрязнения р. Рио-Гранде выдвинул идею, что страны верховьев могут свободно истощать или использовать ресурсы реки в пределах своих границ без учета последствий для стран низовьев. В противоположность этому принцип абсолютной территориальной целостности запрещает государствам, находящимся выше по течению, вмешиваться в естественное течение и состояние международного водного объекта. Оба эти принципа предусматривают диктат одной стороны в отношении другой и сегодня в международной практике не применяются.

В какой-то мере к принципу абсолютного суверенитета примыкает предлагаемый странами верхнего течения Центральной Азии вариант решения проблемы, основанный на признании речной воды товаром с оплатой ее поставок со стороны стран

нижнего течения, а также вариант участия стран нижнего течения в оплате эксплуатационных издержек гидроузлов, расположенных в странах верхнего течения. Оба варианта предусматривают только учет интересов стран верховья.

Доктрина ограниченного территориального суверенитета предлагает компромисс интересов сторон при совместном использовании водно-энергетических ресурсов трансграничных рек. Этот подход наиболее широко применяется сейчас в международной практике. Но компромисс — это соглашение на основе взаимных уступок, т.е. потеря. В сегодняшних политических условиях такие уступки обычно рассматриваются как противоречащие национальным интересам. К тому же в условиях уже сформировавшихся систем гидроэнергетики и ирригации трудно найти ту исходную точку, от которой нужно начинать поиск компромисса. Если рассматривать в качестве исходного оптимальный энергетический режим, то компромисс будет заключаться только в уступках для ирригации и наоборот. В обоих случаях компромисс превращается в односторонние уступки с той или другой стороны. Поэтому доктрина ограниченного территориального суверенитета в области использования водно-энергетических ресурсов трансграничных рек Центральной Азии сегодня трудно реализуема.

Принцип оптимизации общих выгод предполагает выбор таких вариантов регулирования стока и таких режимов работы гидроэнергетики и ирригации, при которых достигается максимальная суммарная прибыль от их деятельности. Конечно, в этом случае при сегодняшней независимости всех стран-участниц неприемлемо такое решение, при котором максимизация общей прибыли будет достигаться за счет того, что одна сторона будет иметь убытки, а другая получит прибыль, превышающую их. Поэтому в данном варианте рассматривается не безусловная оптимизация, а оптимизация по Парето, при которой все решения принимаются в пространстве, где недопустимо ухудшение ситуации ни у одного участника. При всей привлекательности такого подхода возникает та же ситуация с выбором начала оптимизации, что и в предыдущем случае с компромиссом. Приняв за начало процесса оптимизации режим, необходимый для гидроэнергетики, изменения будут возможны только со стороны ирригации и наоборот. Но дело не только в этом. Решение задачи выбора режима регулирования стока при оптимизации общих выгод для случая гидроэнергетики и ирригации на самом деле не требует каких-то математических модельных расчетов. Оно однозначно определяется в пользу ирригации. Это объясняется тем, что при формальном подходе общая выработка электроэнергии на ГЭС зависит только от объема пропущенного через тур-



бины стока воды, который один и тот же для всех режимов. Поэтому и прибыль гидроэнергетики не зависит от режима регулирования стока. В результате общая оптимизация зависит только от ирригации: оптимальный для нее режим будет автоматически оптимальным и для общей системы гидроэнергетики и ирригации. Кстати, именно такой подход использовался во времена СССР. Сегодня существует представление, что ирригация в то время являлась главным приоритетом экономики. На самом деле приоритетом была не сама ирригация, а регулирование стока в ее интересах, так как при этом попутная выработка гидроэнергии была независима от режима регулирования стока. Другое дело, что в действительности для энергетики важна не только общая выработка, но и ее распределение по сезонам. Такая задача в СССР решалась уже не в рамках взаимоотношений внутри гидроэнергетики и ирригации, а в рамках общей Объединенной энергетической системы Средней Азии (ОЭС СА).

Таким образом, все рассмотренные выше подходы, основанные на прямом противопоставлении существующих гидроэнергетики и ирригации, не позволяют сегодня найти решение проблемы их взаимодействия, которое удовлетворило бы обе стороны.

В то же время эффективные решения проблемы взаимоотношения гидроэнергетики и ирригации, учитывающие в полной мере их взаимные интересы, возможны за счет расширения сферы охвата проблемы, частичного выхода за границы существующих сегодня систем гидроэнергетики и ирригации. Одно из таких решений связано с развитием самой гидроэнергетики, строительством в дополнение к уже существующим новым крупным гидроузлов с регулирующими водохранилищами. Дело в том, что существующий сегодня конфликт интересов между гидроэнергетикой и ирригацией связан не столько с присущими им свойствами, сколько с тем, что, как уже упоминалось выше, в каждом из двух основных речных бассейнов в зоне формирования стока имеется только по одному крупному регулирующему водохранилищу. В бассейне р. Сырдарья — это Токтогульское, в бассейне р. Амударья — Нурекское. Естественно, что они не могут работать одновременно в ирригационном и энергетическом режимах, что и является причиной конфликта. Строительство других гидроузлов даст возможность верхним из них работать в энергетическом режиме, нижние же будут перерегулировать сток в интересах ирригации. Эффективность такого подхода можно показать на примере строительства на р. Вахш в дополнение к существующей Нурекской ГЭС новой Рогунской. Их параметры показаны в табл. 2.

Полезная емкость водохранилища Нурекской ГЭС  $3,5 \text{ км}^3$  при среднегодовом стоке реки

$20,4 \text{ км}^3$ , поэтому Нурекская ГЭС вынужденно работает в ирригационном режиме, осуществляя наибольшие попуски воды в летний период. Электроэнергия при этом вырабатывается крайне неравномерно, и в зимний период в республике существует большой ее дефицит.

Строительство Рогунской ГЭС, расположенной выше Нурекской, позволит обеспечить такую их совместную работу в каскаде, при которой будут сохранены существующие сегодня ирригационные попуски из Нурекского водохранилища, но при этом средние расходы каскада из двух этих ГЭС будут постоянными в течение всего года. Последнее обеспечит равномерность выработки электроэнергии в течение года. Результаты такого расчета режима регулирования стока для среднесезонной водности р. Вахш, выполненного с использованием математической модели, показаны на рис. 1.

Результаты таких же модельных расчетов для лет минимальной и максимальной наблюдаемой водности р. Вахш, приведенные в табл. 3, показывают, что и в этих случаях могут быть полностью обеспечены интересы ирригации при помощи попусков из нижней Нурекской ГЭС, а также выровнен средний для обеих ГЭС расход воды в течение года, обеспечивающий равномерную выработку электроэнергии каскада из Рогунской и Нурекской ГЭС. Но сама выработка электроэнергии в многолетнем разрезе при этом не выравнивается. Для этого недостаточно полезных объемов водохранилищ. Для двух ГЭС — Рогунской и Нурекской — они составляют в сумме  $13,8 \text{ км}^3$ , т.е. всего 67 % от среднесезонного стока р. Вахш. Для устойчивой работы гидроэнергетики в многолетнем разрезе недостаточно строительства одной Рогунской ГЭС. Необходимы также другие крупные и средние гидроэлектростанции. В регионе имеются все условия для такого развития гидроэнергетики. Только в Таджикистане схемными проработками выявлена возможность строительства более 80 крупных и средних ГЭС общей мощностью 33,6 тыс. МВт [12].

Сооружение новых крупных ГЭС с регулирующими водохранилищами позволяет в принципе раз-

Т а б л и ц а 2

Параметры ГЭС, регулирующих сток бассейна р. Вахш

ГЭС	Мощность, МВт	Объем водохранилища, км <sup>3</sup>	
		полный	полезный
Нурекская (существующая)	3000	10,5	3,5
Рогунская (строящаяся)	3600	13,5	10,3

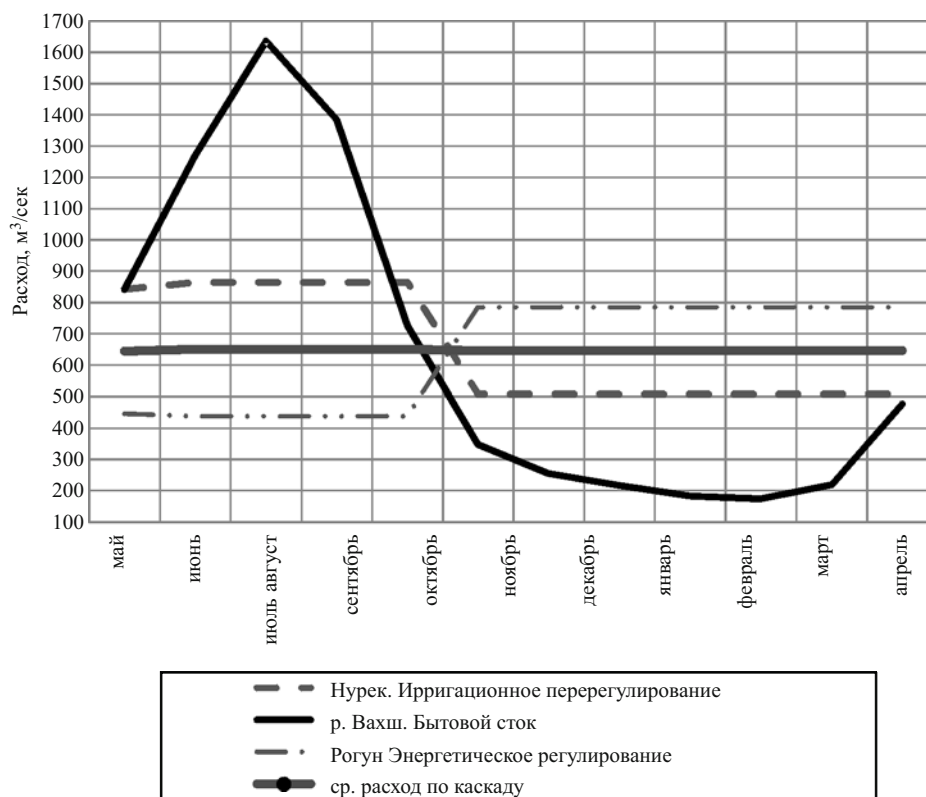


Рис. 1. Каскадное регулирование стока р. Вахш Рогунским и Нурекским водохранилищами

решить конфликт между гидроэнергетикой и ирригацией. Но такой подход имеет в основном стратегическое значение. Строительство только одной крупной ГЭС требует огромных финансовых затрат и времени. Например, строительство Рогунской ГЭС, начатое в 70-х гг. прошлого века и возобновившееся в настоящее время, предусматривает возведение ее в несколько этапов, последний из которых, позволяющий полностью реализовать регулирующие способности водохранилища, может быть завершен только через 10 и более лет. Такая же, если не более сложная, ситуация со строительством Камбаратинской ГЭС-1 в Кыргызстане, которая аналогичным образом могла бы позволить решить проблему взаимоотношений между гидроэнергетикой и ирригацией в бассейне р. Сырдарья.

В настоящее время решение проблем между гидроэнергетикой и ирригацией возможно за счет подключения к участникам процесса общей энергетики стран Центральной Азии. Как уже отмечалось ранее, общий объем вырабатываемой гидроэнергии безразличен к режимам стока, он один и тот же как при энергетическом, так и при ирригационном режиме. Проблема не в общем объеме вырабатываемой на ГЭС электроэнергии, а в ее распределении по сезонам года: при ирригационном режиме большая часть энергии вырабатывается в летний период, тогда как энергетический режим требует ее равномерной выработки или даже большего производства электроэнергии в зимний, наиболее холодный

период года. Поэтому если решить проблему перераспределения сезонных объемов электроэнергии при сохранении ее общей годовой выработки, то одновременно будет решена и проблема взаимоотношения между гидроэнергетикой и ирригацией [13].

Общая энергетика стран Центральной Азии при существующих между ними связях в виде Объединенной энергетической системы вполне может обеспечить такие сезонные перетоки энергии между гидроэнергетикой и остальной энергетикой региона. Это вполне возможно, так как гидроэнергетика составляет только порядка 20 % общей энергетики, остальная часть представлена тепловыми станциями.

Этот метод позволяет разрешить конфликт между гидроэнергетикой и ирригацией без каких-либо уступок и потерь с той и другой стороны, в то же время полностью обеспечивая их интересы. Но для реализации метода на практике необходимо конкретное определение этих интересов. Именно они будут определять сезонные перетоки электроэнергии между странами. Рассмотрим методику этих расчетов на примере наиболее сложного в регионе бассейна р. Сырдарья, в котором имеется три ГЭС, расположенные в разных странах. Их параметры показаны в табл. 4.

Метод реализуется следующим образом. Вначале для всех трех существующих гидроузлов определяются режимы работы, соответствующие национальным интересам. Расчеты этих режимов ве-

Комплексное ирригационно-энергетическое регулирование стока Рогунской и Нурекской ГЭС

Расходы воды, м <sup>3</sup> /с	Режим	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель
Режим ирригационного регулирования стока Нурекской ГЭС, средние расходы	Существующий	842,0	849,5	849,5	849,5	849,5	502,6	502,6	502,6	502,6	502,6	502,6	502,6
	Для года максимальной водности	843,79	818,40	818,40	818,40	818,40	818,40	818,40	818,40	818,40	818,40	818,40	818,40
	Для года средней водности	842,06	863,67	863,67	863,67	863,67	507,36	507,36	507,36	507,36	507,36	507,36	507,36
	Для года минимальной водности	845,41	863,23	863,23	863,23	863,23	511,46	511,46	511,46	511,46	511,46	511,46	511,46
Средние расходы по каскаду 2-х ГЭС	Для года максимальной водности	818,40	794,51	794,51	794,51	794,51	793,06	793,06	793,06	793,06	793,06	793,06	793,06
	Для года средней водности	643,95	651,00	651,00	651,00	651,00	646,31	646,31	646,31	646,31	646,31	646,31	646,31
	Для года минимальной водности	459,96	465,11	465,11	465,11	465,11	462,69	462,69	462,69	462,69	462,69	462,69	462,69

дуются последовательно: сначала для самого верхнего — Токтогульского, затем среднего — Андижанского и наконец самого нижнего — Кайраккумского гидроузла. Это хорошо известная в гидротехнике схема независимого регулирования стока каскадом водохранилищ. При этом для Токтогульской и Андижанской ГЭС национальные режимы рассчитываются как для работы гидроузлов “в чистом поле”, исходя только из естественной приточности рек Нарын и Карадарья, так как будто бы ниже этих гидроузлов нет никаких других стран и потребителей воды. В отличие от них национальный оптимальный режим Кайраккумского гидроузла рассчитывается уже не по естественному притоку реки, а исходя из тех попусков, которые рассчитаны выше для Токтогульского и Андижанского гидроузлов, скорректированных на боковую приточность и отборы воды в ирригационные каналы.

В результате последнего расчета определяется режим попусков из Кайраккумского водохранилища, т.е. объемы воды, которые могут быть использованы нижележащими странами в вегетационный период. Как показывает опыт, эти объемы и график подачи воды в вегетацию, рассчитанные только исходя из национальных интересов стран формирования стока, не будут отвечать интересам стран нижнего течения. Для обеспечения последних необхо-

димы перерегулирование стока, изменение режима работы гидроузлов.

Такое перерегулирование стока должно начинаться с самого нижнего гидроузла — Кайраккумского. Если его регулирующих возможностей окажется недостаточно, следующим подключаться к перерегулированию должен Андижанский гидроузел. Если и его возможностей будет не хватать, то только тогда — Токтогульский, расположенный выше всех по течению. Это также хорошо известная схема каскадного компенсирующего регулирования стока. Кроме всего прочего, такая схема обеспечивает самую минимальную стоимость услуг по регулированию стока, так как последняя существенно растет для верхних водохранилищ по

Т а б л и ц а 4

Параметры ГЭС, регулирующих сток бассейна р. Сырдарья

ГЭС	Мощность, МВт	Объем водохранилища, км <sup>3</sup>	
		полный	полезный
Токтогульская	1200	19,5	14,0
Андижанская	140	1,9	1,75
Кайраккумская	126	3,4	2,5

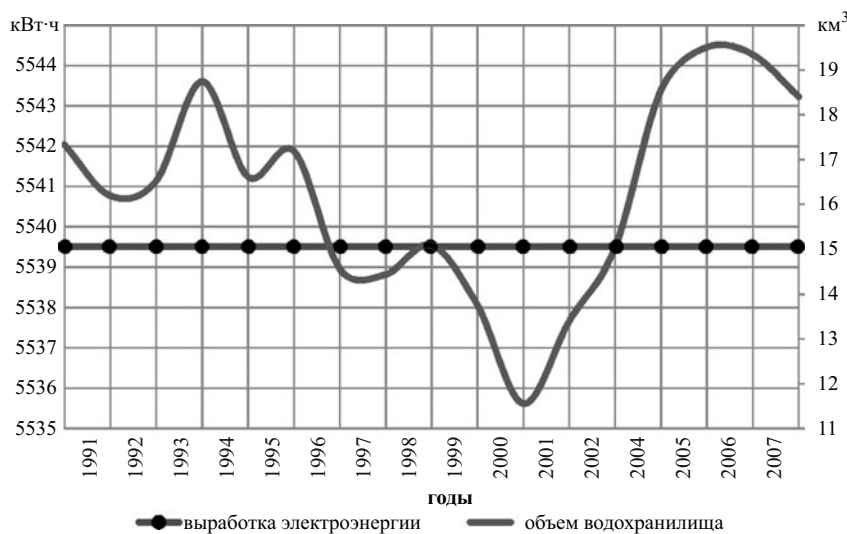


Рис. 2. Оптимальный энергетический режим работы Токтогульской ГЭС

отношению к нижним за счет повышения удельных расходов воды на выработку гидроэнергии.

То есть сначала используются все возможности наиболее дешевого Кайраккумского водохранилища, затем Андижанского и наконец самого дорогого — Токтогульского, который подключается, только если ресурсы возможностей первых двух становятся недостаточными. Это существенно удешевляет общую стоимость услуг.

Национальные интересы стран как верхнего течения, где находятся ГЭС, так и стран нижнего течения, где расположены основные массивы орошения, являются прерогативой самих государств. Но в любом случае государствам — владельцам ГЭС последние важны только как производители электроэнергии. Рассмотрим с этих позиций ситуацию самой крупной в бассейне Токтогульской ГЭС.

Критерием оптимизации работы Токтогульского гидроузла может быть только максимизация выработки электроэнергии. Но водохранилище Токтогульской ГЭС многолетнего регулирования, поэтому и максимизация ее выработки может рассматриваться прежде всего при условии ее равномерной выработки в многолетнем разрезе. Такой оптимальный энергетический режим работы Токтогульской ГЭС, рассчитанный с помощью оптимизационно-имитационной математической модели, показан на рис. 2 [14].

Интересно отметить, что оптимальный энергетический режим работы Токтогульской ГЭС не требует полного использования полезного объема водохранилища. За весь расчетный период в самый маловодный 2001 г. потребовалась его сработка до минимальной величины 11,5 км<sup>3</sup>. Остающийся при этом запас в полезном объеме составлял 6 км<sup>3</sup>, т.е. почти половину его общего объема. Это говорит о том, что при работе в национальном энергетическом режиме в Токтогульском водохранилище все-

гда может сохраняться достаточный запас воды, позволяющий обеспечить интересы ирригации даже при наступлении ряда маловодных лет.

На рис. 2 показаны годовые параметры работы Токтогульской ГЭС в оптимальном для республики энергетическом режиме. В пределах этих годовых значений могут быть установлены любые сезонные режимы, и уже на основании последних далее будут определяться объемы ежегодных компенсаций за услуги по переходу Токтогульской ГЭС от энергетического к ирригационному режиму. Аналогично могут быть рассчитаны национальные оптимальные режимы работы других ГЭС.

Оптимальные ирригационные режимы, отвечающие национальным интересам стран нижнего течения, т.е. их потребности на воду, также являются прерогативой самих этих стран. Предлагаемый метод только позволяет оптимальным образом совместить интересы и определить объемы связанных с этим взаимных компенсаций, т.е. сезонных перетоков электроэнергии между странами. Все это позволяет оптимальным образом решить проблему взаимоотношений между гидроэнергетикой и ирригацией в регионе.

К сожалению, в последнее время в Центральной Азии не только не реализуются рассмотренные выше возможности, позволяющие оптимизировать работу гидроэнергетического и ирригационного комплексов всех стран, но наблюдается существенное ухудшение ситуации. К началу 2010 г. Токтогульское водохранилище было практически полностью опорожнено, и только последовавший за этим многоводный год позволил избежать серьезного водного дефицита.

Разрыв единой энергетической системы между Таджикистаном и Узбекистаном в том же 2010 г. лишил возможности осуществлять взаимные перетоки электроэнергии между ними, в результате чего

Таджикистан был вынужден производить большие холостые сбросы воды на Нурекской и расположенных ниже ГЭС, что привело к потерям электроэнергии в 2010 г. в объеме более 5 млрд. кВт · ч.

Анализ, выполненный в настоящей статье, показывает, что решение проблем взаимоотношения между гидроэнергетикой и ирригацией в Центральной Азии может быть достигнуто только на пути развития и интеграции, в рамках сотрудничества между странами региона. Сегодня основным препятствием для этого является отсутствие необходимого доверия между ними. В этих условиях большую помощь может оказать участие других стран, прежде всего России, имеющей для этого достаточный промышленный и научный потенциал.

### Список литературы

1. *Ирригация Узбекистана*. — Ташкент: АН Узбекской ССР, 1975. Т. 1.
2. *Стратегия рационального и эффективного использования водных и энергетических ресурсов в Центральной Азии / ЕЭК ООН*, 2003.
3. *Духовный В. А.* Управление водными ресурсами Центральной Азии — на пути к водно-энергетическому согласию / Швейцарское управление по развитию и сотрудничеству (SDC), Межгосударственная координационная водохозяйственная комиссия Центральной Азии (МКВК), Международный институт управления водными ресурсами (IWMI), Научно-информационный центр МКВК (НИЦ МКВК). Ташкент, 2010.
4. *Абдуллаева Ф. С.* и др. Гидроэнергетические ресурсы Таджикской ССР. Л.: Недра, 1965.
5. *Маматканов Д. М., Бажанова Л. В., Романовский В. В.* Водные ресурсы Кыргызстана на современном этапе. Бишкек, Илим, 2006.
6. *Petrov G.* Conflict of Interests between Hydropower Engineering and Irrigation in Central Asia: Causes and Solutions. Central Asia and the Caucasus. Journal of Social and Political Studies. Volume 11, Issue 3. 2010
7. *Конвенция ЕЭК ООН* по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер. Хельсинки, 1992.
8. *Конвенция ООН* о праве несудоходных видов использования международных водотоков. Нью-Йорк, 1997.
9. *Соглашение* между Республикой Казахстан, Республикой Кыргызстан, Республикой Узбекистан и Туркменистаном о сотрудничестве в сфере совместного управления использованием и охраной водных ресурсов межгосударственных источников. Алма-Ата. 18.02. 1992.
10. *Нукусская декларация* государств Центральной Азии и международных организаций по проблемам устойчивого развития бассейна Аральского моря. Нукус. 20.09.1995.
11. *В поиске* экономических путей решения межгосударственных трансграничных конфликтов. Межгосударственная координационная водохозяйственная комиссия Центральной Азии / Научно-информационный центр. Ташкент, 2008.
12. *Petrov G.* Tajikistan's Energy Projects: Past, Present, and Future. Central Asia and the Caucasus // Journal of social and Political Studies. Sweden. 5(29). 2004.
13. *Петров Г. Н., Ахмедов Х. М.* Комплексное использование водно-энергетических ресурсов трансграничных рек Центральной Азии. Современное состояние, проблемы и пути их решения. — Душанбе: ООО «Сапфир Компани», 2011.
14. *Петров Г. Н.* Региональная интеграция и водно-энергетическая независимость. Евразийская экономическая интеграция // Научно-аналитический журнал. ноябрь 2010. № 4(9).

## Опыт возведения противofильтрационных устройств из грунтоцементных смесей

Радченко В. Г., Лопатина М. Г., кандидаты техн. наук,  
Николайчук Е. В., Радченко С. В., инженеры (ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”)

Обобщен международный опыт возведения противofильтрационных элементов из грунтоцементных смесей методом “стена в грунте” при строительстве и ремонте.

**Ключевые слова:** грунтовые плотины, стенки-диафрагмы, грунто-цемент, метод “стена в грунте”, фильтрационная прочность, надежность, безопасность.

Анализ международной практики строительства плотин из грунтовых материалов показывает, что подавляющее их количество построено в створах, где в основании плотин залегают нескальные породы, представленные сжимаемыми и проницаемыми грунтами.

В настоящее время одним из наиболее эффективных способов перекрытия фильтрационных потоков в аллювиальных и вообще в проницаемых грунтах основания или тела грунтовых плотин, наравне с традиционно применяемыми цементационными и инъекционными завесами, является устройство зубьев-стенок или стенок-диафрагм из грунтоцементной смеси, выполняемых методом “стена в грунте”. Такое техническое решение весьма эффективно, так как позволяет надежно перекрыть фильтрационный поток благодаря возможности выполнять такие стенки глубиной до 130 м и более, заполнять их материалами с низкими коэффициентами фильтрации и контролировать качество производимых работ.

Не менее эффективным является применение стенок-диафрагм при ремонте плотин, когда нарушена фильтрационная прочность либо в грунтах тела плотины, либо в грунтах основания. В этом случае такие стенки-диафрагмы возводят с гребня плотины, что позволяет эффективно бороться с разуплотнением грунтов в теле плотины, если это необходимо, и перекрывать фильтрационные потоки как в теле, так и в основании плотины.

Грунтоцементная смесь, которую так успешно применяют в настоящее время, первоначально имела название “грунтоцемент” и не сразу нашла применение в гидротехническом строительстве.

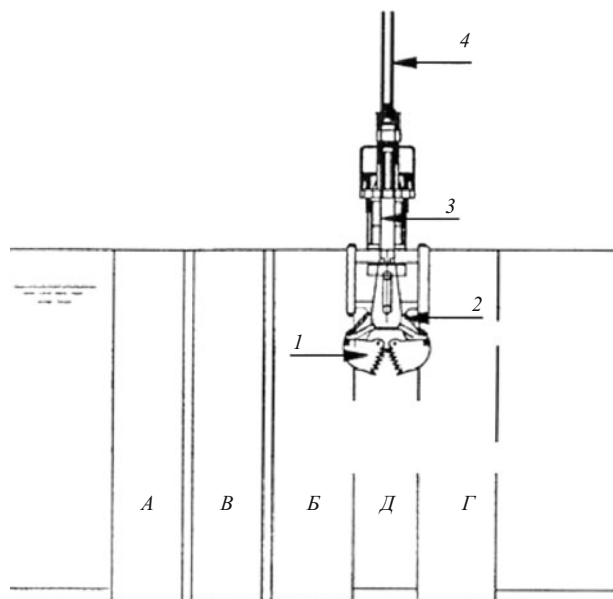
Согласно [1] грунтоцемент как материал для строительства создан в США в начале 20-х гг. прошлого столетия с целью замены гравийно-галечниковых грунтов при строительстве автодорог. Первоначальный состав грунтоцемента представлял собой смесь грунта, включавшего определенные фракции песка и гравия, портландцемент и воду. После твердения такая смесь превращалась в плотный, прочный, относительно малопроницаемый эрозионно стойкий материал. Для удобства контро-

ля качества грунтоцемента в начале 1940-х гг. в американской нормативной системе (ASTM) были разработаны несколько стандартов, регламентирующих испытания этого материала и применение его в автодорожном строительстве.

В это же время Бюро мелиорации США начало применять грунтоцемент для защиты верховых откосов грунтовых плотин вместо крепления их камнем. Были разработаны специальные рекомендации, касающиеся состава грунтоцементных смесей, технологии их приготовления, укладки и определения свойств. Постепенно крепление откосов грунтовых плотин грунтоцементными покрытиями стало широко применяться сначала в США, а затем и в других странах. Примерами могут служить такие плотины, как Утэ, Мэррит, Чени, Сан Антонио, Игл Крик и др. (США); Накусп Уотерфронтс, Сэйнт Лоуренс Ривер Шор Протекш (Канада); Нове Миини (Чехия) и т.д. [1].

По данным Бюро мелиорации состав грунтоцемента первоначально представлял собой смесь, включавшую цемент (от 7 до 14 % от веса сухого грунта, иногда с добавлением золы-уноса 2 – 6 %); песок, 85 % которого проходило сито 5 мм, а также 10 – 25 % мелких фракций, проходивших сито 0,075 мм. Количество воды обычно изменялось в пределах 10 – 13 % от общего веса сухого грунта и цемента. Прочность на сжатие через 7 суток составляла порядка 4 МПа, а через 28 суток — 6 МПа; коэффициент фильтрации  $K_f \approx 10^{-6}$  см/с [1].

В гидротехническом строительстве грунтоцементные конструкции в качестве противofильтрационных элементов начали применять прежде всего для предотвращения фильтрации в проницаемых основаниях плотин, что стало возможным благодаря внедрению в практику строительства метода “стена в грунте” в результате разработки конструкции и производства специальных установок для проходки глубоких скважин и траншей. Кроме того, к тому времени освоили тиксотропные жидкие составы, которые противодействовали обрушению грунтов стенок при проходке глубоких выемок. Первую такую “стенку в грунте” возвели в



**Рис. 1.** Общепринятая технологическая схема выполнения панелей для стенок-диафрагм (в том числе и с помощью грейфера):

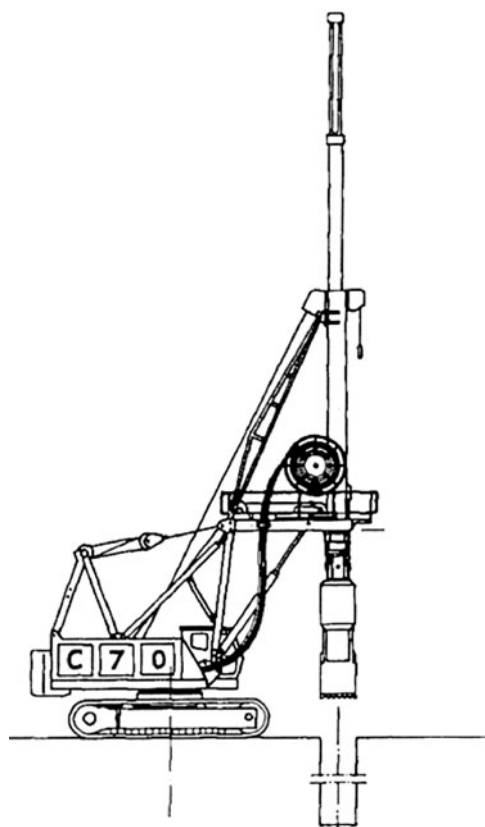
*А, Б, В, Г, Д* — очередность выемки панелей; *1* — ковш грейфера; *2* — гидравлические домкраты; *3* — опорная конструкция; *4* — тросы подвески и гидравлические шланги

Калифорнии (США) в 1948 г. В Европе этот метод стали использовать в гидротехническом строительстве с начала 1950-х гг.

Необходимо отметить, что, как и грунтоцемент, метод “стена в грунте” вначале нашел применение в гражданском строительстве. С его помощью возводили заглубленные в грунт основания опор гражданских объектов, фундаменты мостов и переходов, опоры линий электропередач, подпорные стенки, стенки туннелей и различных подземных хранилищ, а также противофильтрационные стенки. Конструктивные особенности таких сооружений и технологии их выполнения описаны в работах [2, 3].

С момента появления метода “стена в грунте” и до настоящего времени основные принципы выполнения стенок существенно не изменились. Грунтоцементные стенки выполняют поэлементно, отдельными круглыми скважинами или панелями. При этом панель может включать траншеи, выполняемые за одну, две и даже три проходки. После выемки первичной скважины (панели), заполнения ее грунтоцементной смесью и твердения очередную скважину (панель) пропускают и выполняют следующую за ней. После этого производят выемку и бетонирование пропущенной, промежуточной скважины (панели) (рис. 1).

Для проходки глубоких скважин или отдельных траншей (составляющих панели) используют следующие механизмы. Проходку круглых скважин осуществляют буровыми установками на жесткой



**Рис. 2.** Общий вид грейфера Хэлли на жесткой раме (система “Казагранде”)

раме типа “Казагранде С-60”, позволяющими бурить скважины диаметром до 1,0 – 1,2 м. Для проходки траншей применяют либо грейферы, либо гидрофрезу. Имеются грейферы различных конструкций: на жесткой раме и подвесные, с механическим или гидравлическим приводом. Известны грейферы следующих систем: “Икок Федер”, “Казагранде” (рис. 2), “Леффер” или “Бауэр” (рис. 3). Гидрофреза разработана фирмой “Солетанш” (рис. 4).

Размеры первичной траншеи в плане, разрабатываемой грейфером, зависят от размеров ковша грейфера. В настоящее время ширина может составлять от 0,65 до 3,2 м при длине одной захватки от 2,4 до 3,2 м. Для гидрофрезы размеры траншеи зависят от размеров режущего комплекса гидрофрезы (обычно ширина составляет до 1,2 м, а длина — до 2,8 м), хотя могут быть разработаны и специальные конструкции.

Начиная с 60-х гг. прошлого века противофильтрационные стенки из грунтоцемента (грунтобетона) получили широкое распространение в гидротехническом строительстве, прежде всего при их выполнении в проницаемых и сжимаемых основаниях грунтовых плотин. К их числу можно отнести такие плотины, как Маникуаган-3 [4, 5] и Кливленд (Канада), Уэст и Твин Баттес (США), Колбун [6] и Конвенто Вье (Чили), Бромбах (Германия), Сиао-

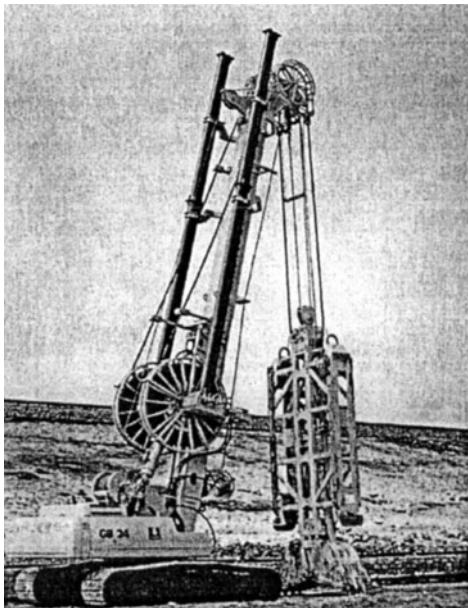


Рис. 3. Общий вид подвешенного грейфера с гидравлическим приводом (система “Бауэр”)

лонгди (Китай) [6], Даулиганга (Индия), Арминоу (Кипр) и др.

Одним из наиболее интересных примеров является возведение противодиффузионной стенки в основании плотины Маникуаган-3. Гравийно-галечниковая плотина с глинистым ядром высотой 107 м, длиной по гребню 385 м построена в 1975 г. в Канаде на сжимаемом и проницаемом аллювиальном основании мощностью 126 м (рис. 5). Под ядром по оси плотины в сложном в геологическом отношении основании выполнена двойная стенка-диафрагма из грунтобетона при ширине каждой стенки 0,6 м и с промежутком между ними 3,0 м. В плане стенка изогнута в сторону верхнего бьефа с радиусом 600 м. Верх стенки заглублен в ядро плотины на 12 м. Выше стенки в ядре располагается галерея, куда выведены приёмники большого количества КИА, предназначенной для наблюдений за поведением плотины. Выше галереи размещена полость шириной 3 м и высотой 6 м, заполненная бентонитом для локализации отрицательных последствий от перемещений жесткой противодиффузионной стенки вверх при будущих осадках аллювиального основания. Стенка-диафрагма на центральном участке при глубинах более 50 м выполнена по типу секущихся свай, а на бортовых примыканиях, где глубина менее 50 м, возведена отдельными панелями длиной по 3,3 м; при этом проходка и выемка грунта из траншей осуществлены с помощью грейфера. По данным натурных наблюдений плотина на протяжении всего срока эксплуатации работает нормально.

Еще одним примером может служить плотина Колбун высотой 116 м, построенная в 1984 г. на р.

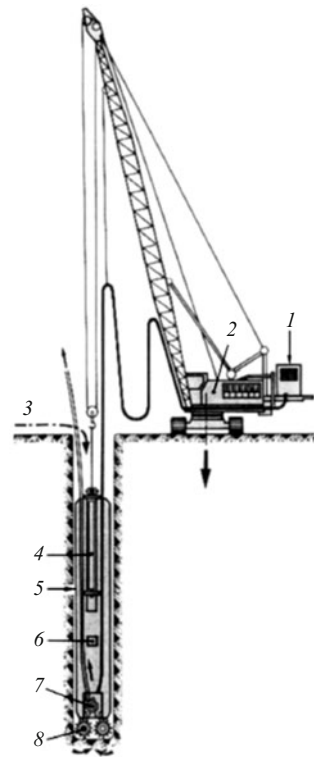


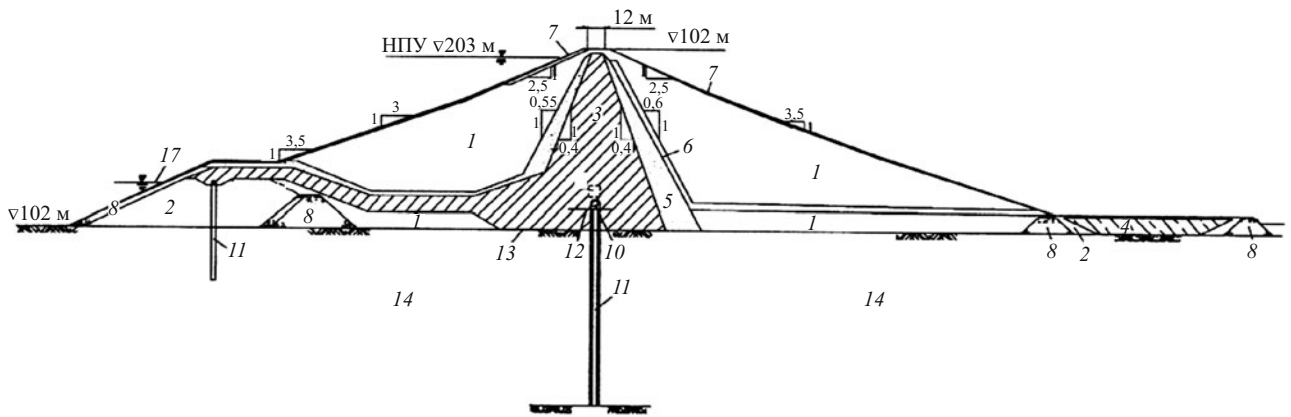
Рис. 4. Общий вид гидрофрезы системы “Солетанш”:

1 — силовая установка; 2 — кран; 3 — возврат бентонитового раствора после очистки; 4 — гидроусилитель; 5 — направляющие при бурении; 6 — клинометры; 7 — насос; 8 — колеса с режущими элементами

Маули. Плотина расположена на аллювиальном основании мощностью до 68 м. Стенка-диафрагма из грунтобетона (пластичного бетона) шириной 1,2 м имеет длину 335 м при общей площади 12 800 м<sup>2</sup>. Стенка состоит из 45 сопрягающихся между собой отдельных панелей длиной по 7,5 м. Каждую панель проходили за три проходки с помощью грейфера при ширине одной захватки 2,7 м. Для дробления валунов применяли специальное долото весом 8 т. При замыкании панелей перекрытие составляло 0,3 м. Проходку отдельных траншей осуществляли под бентонитовым раствором при плотности 1,08 г/см<sup>3</sup>. Состав 1 м<sup>3</sup> пластичного бетона включал смесь песка и гравия — 1483 кг, цемент — 75 кг, глину — 121 кг, бентонит — 19 кг и воду — 423 кг.

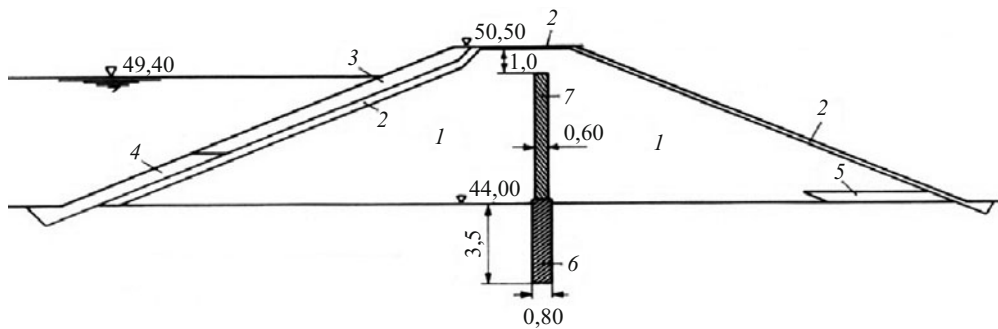
Анализируя возможности применения грунтоцементных стенок-диафрагм, выполненных методом “стена в грунте” для применения в качестве противодиффузионных устройств в теле грунтовых плотин, можно констатировать, что таких примеров единицы и все относятся к малым плотинам — не более 15 м по высоте. Известен случай строительства гравийно-галечниковой плотины с грунтоцементной стенкой-диафрагмой в качестве противодиффузионного устройства, но высота плоти-





**Рис. 5.** Поперечное сечение плотины Маникуаган 3 (Канада):

1 — уплотненный гравийно-галечниковый грунт; 2 — перемычка из гравийно-галечникового грунта; 3 — уплотненная глина; 4 — глина, отсыпанная в воду; 5 — переходные зоны; 6 — дрена; 7 — крепление камнем; 8 — каменная наброска; 9 — подушка из бентонита; 10 — галерея; 11 — двухрядная грунтобетонная стенка-диафрагма; 12 — металлическая диафрагма; 13 — дневная поверхность в основании реки; 14 — аллювий



**Рис. 6.** Поперечное сечение плотины Вади Хавазинах (Оман):

1 — песчано-гравийный грунт; 2 — фильтр из мелкого камня; 3 — крепление мелким камнем; 4 — крепление крупным камнем; 5 — фильтр; 6 — грунтобетонный зуб; 7 — грунтобетонная стенка

ны 6,5 м. Примером служит плотина Вади Хавазинах, построенная в Омане в 1990-х гг. (рис. 6) [8].

Песчано-гравийная плотина Вади Хавазинах с откосами 1:2,5 имеет грунтоцементную диафрагму шириной 0,6 м. Грунтоцементный зуб врезан в основание на 3,5 м. Стенку выполняли послойно при высоте слоя 1 м. Проходку траншеи глубиной 1 м осуществляли экскаватором насухо без применения стабилизирующей жидкости. Приготовление грунтоцементной смеси выполняли по более сложной технологии в сравнении с обычно применяемой. Вначале (в расчете на единичный объем) смешивали 1000 л воды, 45 кг бентонита и 175 кг цемента. Потом 400 л полученного раствора смешивали с 1450 кг заполнителя, включавшего песок и гравий с крупностью частиц 0–8 мм. После добавления еще 27 кг бентонита смесь была готова для укладки в плотину. Ее перевозили в автомиксерах и укладывали в подготовленную траншею, которую перед заполнением очищали сжатым воздухом и смачивали, чтобы обеспечить оптимальное сопряжение



**Рис. 7.** Укладка грунтоцемента в стенку-диафрагму в ядерной части плотины Вади Хавазинах (Оман)

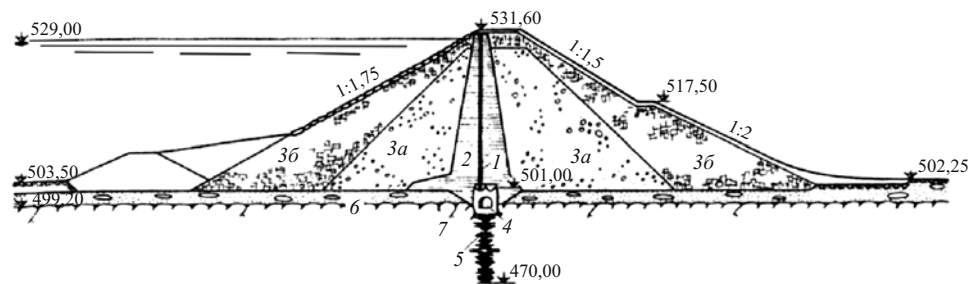


Рис. 8. Поперечное сечение плотины Формиц (Германия):

1 — стенка-диафрагма из грунтоцемента; 2 — супесчано-суглинистое ядро; 3а — упорная призма, смесь гравия и горной массы; 3б — упорная призма, горная масса; 4 — цементационная и инспекционная галерея; 5 — цементационная завеса; 6 — аллювиальные отложения; 7 — скала

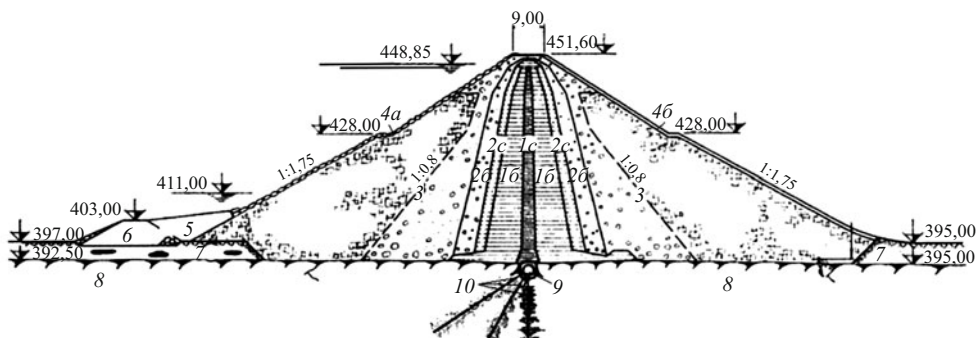


Рис. 9. Поперечное сечение плотины Маутхауз (Германия):

1а — стенка-диафрагма из грунтоцемента; 1б — глинистое ядро; 2а — 1-й слой фильтра; 2б — 2-й слой фильтра; 3 — упорная призма; 4а — крепление камнем; 4б — грунтовое покрытие; 5 — засыпка пазухи; 6 — перемычка; 7 — русловые отложения; 8 — скала; 9 — цементационная и инспекционная галерея; 10 — цементационная завеса

грунтоцементного материала стенки с грунтом тела плотины (рис. 7). Коэффициент фильтрации грунтоцементной стенки через 28 суток составлял  $10^{-6} - 10^{-7}$  см/с.

Кроме плотины Вади Хавазинах известны еще две малые плотины с противофильтрационными грунтоцементными стенками-диафрагмами: Аддикс (США) высотой 12 м и стенкой шириной 0,9 м и Фровиль (Франция) высотой 15 м и стенкой шириной 1 м, в которых выемку траншей осуществляли с помощью грейферов.

Грунтоцементная стенка-диафрагма в ядре каменно-земляной плотины Формиц (Германия) выполнена с целью повышения противофильтрационных свойств ядра (рис. 8) [9]. Стенка понадобилась потому, что ядро в плотине высотой 33 м и длиной по гребню 700 м возведено достаточно узким, так как запасы илистых песков были ограничены. При этом коэффициент фильтрации этого материала составлял всего  $10^{-4}$  см/с. Стенку выполняли методом «стена в грунте» ярусами по 4 м по общепринятой схеме, при которой траншеи проходят через одну с последующей проходкой пропущенной траншеи. Ширина стенки 0,6 м. Длина траншеи для одной захватки составляла 2,1 м. Проходку траншеи осуществляли грейфером. Состав грунтоце-

ментной смеси включал песок —  $1331 \text{ кг/м}^3$ , глинистую муку —  $153 \text{ кг/м}^3$ , цемент —  $90 \text{ кг/м}^3$  и воду —  $400 \text{ кг/м}^3$ . Для зоны контакта с основанием и бортами в смесь добавляли еще 30 кг бентонита. Коэффициент фильтрации грунтоцемента получали равным  $10^{-9}$  см/с. Прочность материала через 17 суток составляла 1,0 МПа. Проходку траншей осуществляли под бентонитовым раствором, его плотность равнялась  $1,05 \text{ г/см}^3$ .

Каменно-земляная плотина Маутхауз высотой 61 м построена в 1972 г. в Германии (рис. 9). Водохранилище объемом 21 млн.  $\text{м}^3$  было предназначено для водоснабжения. В основании плотины залегают аргиллитовые сланцы и конгломератные брекчии, являющиеся достаточно плотными породами, но имеющие отдельные тектонические нарушения. Относительно тонкое ядро возведено из глинисто-щебенистого материала — продукта выветривания глинистых сланцев и граувакке с максимальным размером частиц до 90 мм. Для увеличения фильтрационно-суффозионной прочности ядра в его центральной части выполнена вертикальная зона шириной сверху 2 м и понизу 5 м из смеси грунта ядра с бентонитом (1 %) и песком фракций 0–2 мм (5 %). Фильтры двухслойные: в первый слой уложен материал ядра с добавлением 40 % ка-

менной мелочи (15 – 30 мм), второй слой состоит из речных отложений с отбором фракций более 150 мм. Ядро на всю ширину (с учетом центральной зоны) укладывали слоями 25 см с уплотнением в начальный период укладки прицепным катком на пневмошинах весом 40 т, а на завершающем этапе — самоходным катком “Альбарет” весом 33 т. Плотность материала ядра была получена равной порядка  $1,96 \text{ т/м}^3$  при влажности — 13 – 14 % и коэффициенте фильтрации  $10^{-6} - 10^{-7} \text{ см/с}$ . Устройство вертикальной центральной зоны ядра с добавлением бентонита позволило повысить пластичность материала при укладке, увеличить эрозионную устойчивость и уменьшить коэффициент фильтрации в этой зоне на порядок [10].

Анализируя опыт применения грунтоцементных стенок-диафрагм в теле грунтовых плотин в качестве противofiltrационных элементов, отметим, что такие технические решения были использованы только для малых плотин, где отсутствуют горизонтальные перемещения, а градиенты напора и скорости фильтрации достаточно малы. Внедрение в отечественную практику гидротехнического строительства грунтоцементных стенок-диафрагм в качестве противofiltrационных элементов высоких плотин сдерживается рядом факторов. Кроме отсутствия четких нормативных требований к критическим градиентам для грунтоцементных элементов существуют технологические риски, связанные с недостаточной отработанностью технологических приемов строительства, отсутствием новейших систем наблюдения за положением бурового оборудования в пространстве, обеспечивающих контроль сплошности и соосности стенок-диафрагм при их возведении. Практически полностью отсутствует зарубежный опыт такого строительства. Кроме того, требуется внедрение современных методов эксплуатационного мониторинга за состоянием стенок-диафрагм, оснащения их контрольно-измерительной аппаратурой, обеспечивающей обнаружение возможных дефектных зон, таких как разуплотнения, трещины, смещения, сосредоточенные фильтрационные ходы и др. Необходимо разработка и методов локального ремонта.

Грунтоцементные стенки-диафрагмы, выполняемые методом “стена в грунте”, успешно применяют также в ходе ремонтных работ, проводимых на плотинах в случае локальных нарушений фильтрационной прочности в грунтах их тел и оснований. Это может происходить, если в процессе эксплуатации нарушается способность грунта сопротивляться таким фильтрационным деформациям, как суффозия, выпор, кольматаж, контактный размыв и т.д. Часто такие нарушения проявляются в виде трещин, образование которых в теле и основании грунтовых плотин, а также в ядрах и экранях

каменно-земляных плотин связано в основном с неравномерными деформациями, особенностями их напряженно-деформированного состояния и действием фильтрационных сил. В международной практике это явление носит название “hydraulic fracturing”. В результате в теле плотин могут возникать ходы сосредоточенной фильтрации, приводящие к выносу грунта, повреждению плотин и даже к их разрушению.

Анализ литературы по вопросам трещинообразования, а также самих аварий позволяет установить их основные причины, одна из которых — это неравномерные деформации как всей плотины, так и отдельных ее элементов, что может приводить к появлению областей предельного состояния, ослабленных зон, к деформациям растяжения и сдвига. Этому могут способствовать и другие факторы, как, например, топографические и инженерно-геологические условия, конструктивные особенности плотины, свойства грунтовых материалов, характер действующих нагрузок и др. [11].

Из истории строительства и эксплуатации грунтовых плотин известны многочисленные аварийные ситуации, связанные, в том числе, и с возникновением ходов сосредоточенной фильтрации, когда приходилось принимать срочные меры для ремонта плотин. Например: Уистор (27 м, США, год аварийной ситуации 1949); Стоктон Крик (24 м, США, 1950); Ист Бранч (17 м, США, 1957); Эль Изиро (9 м, Венесуэла, 1963); Джатилухур (112 м, Индонезия, 1965); Хиттеувет (90 м, Норвегия, 1966); Раунд Батт (134 м, США, 1967); Маттмарк (100 м, Швейцария, 1967); Матахина (61 м, Новая Зеландия, 1967); Боулдерхэд (48 м, Великобритания, 1967); Титон (93 м, США, 1976) и др.

Обычными ремонтными мерами являются такие, как пригрузка глинистыми грунтами верховых откосов плотин, а также экранирование как поверхности верховых откосов, так и поверхности основания перед плотинами с целью кольматажа ходов фильтрации. Могут оказаться полезными дренирование фильтрующей воды и ее организованный отвод. Наиболее часто применяют инъектирование в поврежденные участки тела плотины и основания цементных, глиноцементных, силикатных и химических растворов с разного рода наполнителями. Однако наиболее надежным решением, как показывает практика, является возведение стенок-диафрагм из грунтоцемента, выполняемых методом “стена в грунте”. Среди плотин, надежно отремонтированных таким способом, можно назвать, в частности, плотины Боулдерхэд (Великобритания), Фонтенель, Навахо, Мад Мауэнтин (США), плотину Курейской ГЭС (Россия).

Ремонт каменно-земляной плотины Боулдерхэд высотой 61 м осуществлен в 1968 г. с помощью

стенки-диафрагмы шириной 0,65 м, возведенной по оси плотины. Траншею проходили с помощью грейфера. Состав грунтобетона включал портландцемент (12 %), бентонит (2,5 %), заполнитель — песок и гравий (85,5 %), воду (24 % по отношению к сухой массе) [12].

Гравийно-галечниковую плотину Фонтенель высотой 50 м отремонтировали в 1986 г. с помощью стенки-диафрагмы из пластичного бетона. Траншеи под стенку глубиной до 55 м и шириной 0,65 м выполняли с помощью гидрофрезы фирмы “Солетанш” [13].

В гравийно-галечниковой плотине Навахо высотой 123 м в связи с аварийной ситуацией у левого берега плотины в 1987 г. возвели стенку-диафрагму от основания до гребня высотой 120 м и длиной 140 м. Траншею выполнили с помощью гидрофрезы фирмы “Солетанш”. Большая глубина потребовала создания специальной конструкции гидрофрезы и разработки уточненной технологии бурения и заполнения траншеи пластичным бетоном. В результате стенка-диафрагма общей площадью 11 тыс. м<sup>2</sup> выполнена без каких-либо осложнений [14, 15].

Особенно показательным примером является ремонт каменно-земляной плотины Мад Мауэнтин, построенной в 1953 г. на р. Уайт в штате Вайоминг [16, 17]. Высота плотины — 128 м, длина по гребню — 213 м. Плотина возведена в узком каньоне с крутыми бортами, поднимающимися в высоту на 60 м и более. Скальное основание под плотинной и борта каньона сложены трещиноватыми андезитами с прослоями туфа. Ядро плотины состоит из смеси глин (20 %) с песком и гравийно-галечниковым материалом (80 %). Переходные зоны выполнены из дробленого диорита (< 100 мм). В упорные призмы каменная наброска поступала из карьеров, где от 45 до 55 % каменных отдельностей весили до 450 кг, от 25 до 35 % — от 450 до 1360 кг и 15 – 25 % — от 1360 до 4540 кг. В процессе строительства русло реки под плотинной было расчищено от русловых отложений на всю глубину каньона до скального основания. При этом неровности поверхности бортов были сглажены, скальные выступы убраны, а углубления заделаны бетоном.

На первом этапе эксплуатации гидроузла замечаний к работе плотины не было. Но позже, в начале 80-х, наблюдения по пьезометрам показали, что в ядре увеличились градиенты фильтрации и, возможно, образовались ходы сосредоточенной фильтрации, а также зоны, где мелкие частицы грунта могли быть вынесены. Опыты с наливом воды в пьезометры показали хорошую гидравлическую связь между пьезометрами на большей части центральной зоны плотины. Эксперты предположили, что это результат внутренней эрозии и появления

ходов фильтрации, которые могли возникнуть из-за не вполне качественной работы переходных зон, неравномерных деформаций и влияния арочного эффекта в ядре в зоне каньона. Для проверки возникших предположений выполнили контрольное бурение, подтвердившее опасения. В результате анализа сложившейся ситуации было принято решение о необходимости ремонта плотины. Из нескольких вариантов был выбран вариант, разработанный Корпусом военных инженеров США, включавший выполнение по оси плотины грунтоцементной стенки-диафрагмы методом “стена в грунте” по технологии фирмы “Солетанш”. Глубина стенки достигала 120 м при ширине в центральной части плотины 1,0 м и 0,85 м на участках, примыкающих к бортам долины. Заглубление в скальное основание было принято до 4,5 м. Проходку отдельных траншей размером 2,8 × 1,0 м намечали выполнять с помощью гидрофрезы “12000” фирмы “Солетанш” весом 45 т, стандартная конструкция которой была специально модернизирована для этой работы. В верхней головной части гидрофрезы располагался блок управления, предназначенный для контроля отклонений от вертикали. Была применена специальная электронная система для постоянного слежения за параметрами бурения при проходе траншей и положением гидрофрезы в пространстве, что позволяло корректировать проходку — изменять скорость вращения режущих агрегатов, оценивать качество пород в процессе проходки. Были предусмотрены и другие методы контроля, например проверка состояния горных пород в стенках траншеи при ее проходке.

При выемке первых же траншей выяснилось, что их стенки неустойчивы и, несмотря на то что бурение проходит под бентонитовым раствором, происходят вывалы, раствор уходит. В связи с этим было решено упрочнить материал ядра, выполнив уплотнительную и барьерную цементации по программе, специально разработанной фирмой “Солетанш”. Программа включала уплотнительную цементацию (gravity grouting) в один ряд по оси будущей стенки с шагом скважин 1,5 м и еще два ряда скважин барьерной цементации с шагом 1,8 м (recompression grouting), проходящих на расстоянии 1,5 м выше оси стенки и на 2,5 м ниже. Благодаря выполнению этой программы удалось уплотнить материал ядра так, что при последующей проходке глубоких траншей гидрофрезой особых трудностей не возникало и стенку-диафрагму удалось выполнить в полном объеме. Для надежности сопряжения отдельных панелей между собой величина их врезки друг в друга была увеличена до 36 см. Пятнадцать панелей имели глубину более 100 м, наиболее глубокая — 122,5 м. Максимальное боковое отклонение при бурении составило 20 см (т.е.

менее 2 % при глубине 120 м) при среднем отклонении 7 см. После ремонта плотина работает в штатном режиме.

В Российской Федерации методом “секущихся” свай в 1999 г. осуществлен ремонт на аварийном участке русловой плотины Курейской ГЭС. Каменно-земляная русловая плотина максимальной высотой 81,5 м и длиной по гребню 1576 м возведена вместе с тремя другими плотинами гидроузла к 1990 г. 26 июля 1992 г. на участке в районе ПК7+00 произошел прорыв напорного фронта. Расход составлял 1730 л/с. На гребне плотины возникли трещины и понижения, на низовом откосе — провал глубиной 0,5 м и диаметром около 10 м. Немедленно был начат сброс воды из водохранилища. После снижения уровня на 5 м расход воды снизился до 200 л/с. Затем на гребне плотины в зоне прорыва выполнили трехрядную цементационную завесу. Принятые меры позволили локализовать повреждение плотины, но для приведения ее в рабочее состояние в последующем провели ремонт с устройством по оси плотины на длине 94 м стенки-диафрагмы из “секущихся” свай диаметром 1200 мм. Бурение скважин вели с опережающей обсадкой трубами и их извлечением по мере бетонирования. Работу осуществили с помощью установки “Казагранде С-60” итальянского производства (рис. 10). Машина была укомплектована грейфером, шнековым буром, ковшовым буром и крестовым долотом. Максимальная глубина стенки в зоне аварийного участка ядра плотины составила 35 м. Заглубление в плотный грунт под ядром плотины достигало 8 – 10 м [18, 19]. Состав грунтоцементного материала, использованного для заполнения свай, был следующим: портландцемент ПЦ-400Д20-140 кг/м<sup>3</sup>; бентонит порошковый черногорского месторождения марки ПБН по ТУ 39-202 — 120 – 130 кг/м<sup>3</sup>; песок, модуль крупности Мн = 2,0 — 620 – 630 кг/м<sup>3</sup>; гравий Березовского карьера фракции 5 – 20 мм — 920 – 930 кг/м<sup>3</sup>; пластифицирующая добавка ЛСТ — 0,42 кг/м<sup>3</sup>; вода — 380 – 390 кг/м<sup>3</sup>.

## Выводы

1. По данным анализа международной практики применение стенок-диафрагм из грунтоцемента, возводимых методом “стена в грунте”, является эффективным конструктивным решением, позволяющим надежно перекрывать фильтрационные потоки как в фильтрующих основаниях плотин, так и в их теле при строительстве и ремонте, если такая необходимость возникает в результате нарушения фильтрационной прочности грунтов в ходе эксплуатации.



Рис. 10. Установка “Казагранде С-60” для бурения скважины диаметром 1,2 м на плотине Курейской ГЭС

2. При строительстве плотин грунтоцементные стенки возводят в основном в фильтрующих основаниях, что по сравнению с применявшимися ранее технологиями (цементационные и инъекционные завесы) часто является более надежным решением в связи с возможностями более качественного контроля осуществляемых работ на всех этапах возведения стенок — от проходки траншей, приготовления смесей с заданным составом и свойствами, заполнения траншей до контроля поведения выполненных стенок. При проведении ремонтных работ строительство указанных выше стенок также является одним из наиболее эффективных решений, а иногда и единственно возможным.

3. Применение грунтоцементных стенок-диафрагм в теле грунтовых плотин в качестве противофильтрационных устройств до настоящего времени не получило широкого распространения при строительстве больших плотин (по классификации СИГБ выше 15 м). Это объясняется высокими технологическими рисками, которые возникают при строительстве таких стенок в условиях обычной практики их возведения в один ряд. При строительстве этих стенок в два или более рядов требуются дополнительные затраты времени и средств.

4. Внедрение в отечественную практику гидротехнического строительства грунтоцементных стенок-диафрагм в качестве противофильтрационных элементов высоких плотин требует выполнения ряда научно-исследовательских и опытно-технологических работ, направленных на определение нор-

мативных требований по критическим градиентам напора грунтоцементных материалов, уточнения их деформационно-прочностных характеристик, разработки методов и средств строительного и эксплуатационного контроля.

### Список литературы

1. ICOLD. Soil-cement for embankment dams // Bulletin № 54. 1986.
2. Филахтов А. Л., Лубенец Г. К. и др. Опыт возведения сооружений методом “стена в грунте”. — Киев: Будивельник, 1981.
3. Смородинов М. И., Федоров Б. С. Устройство сооружений и фундаментов способом “стена в грунте”. — М.: Стройиздат, 1986.
4. Dreville F., Pare J. J. et al. Diaphragme en beton moule pour l'etancheite des foundations du barrage Manicouagan 3 // 10-th ICOLD Congress. 1970. Q.37. R. 34. PP. 607 – 630.
5. Dascal O., Smith M. et al. Manicouagan 3 foundation cut off: fifteen years of operation // 17-th ICOLD Congress. 1994. Q. 66. R. 53. PP. 961 – 992.
6. Noguera G. Diaphragm cut off wall for Colbun main dam // 15-th ICOLD Congress. 1985. Q 58. R. 63. PP. 1049 – 1060.
7. Jiazheng Pan, Jing He. Large dams in China. A fifty-year review. Chapter 18. Construction of Xiaolangdi dam / China Water Power Press. Beijing-2000.
8. Strobl T., Schmid R. Wadi Hawashinah dam. Oman. Ground water recharge dam to stop salt water intrusion. Strabag. Dam engineering in Kenya, Nigeria, Oman and Turkey. Brochure № 52. Cologne. April. 1997. PP. 67 – 68.
9. Lorenz W., List F. Application of the trench diaphragm method in constructing the impervious core of dams consisting in part of low-grade fill material // 12-th ICOLD Congress. Q. 44. R.6. Mexico. PP. 93 – 104.
10. Lorenz W. The sealing element of the dam of Mauthaus drinking water reservoir // 11-th ICOLD Congress. Q. 42. R. 6. 1973. Madrid. PP. 81 – 99.
11. Sherard J. L. Embankment dam cracking. Embankment Dam Engineering. Casagrande Volume. John Wiley Sons. New York. 1973. PP. 271 – 354.
12. Vaughan P. P., Kluth D. J. et al. Cracking and erosion of the rolled clay core of Balderhead dam and the remedial works adopted for its repair // 10-th ICOLD Congress. 1970. Q. 36. R 5. PP. 73 – 93.
13. Bellport B. P. Bureau of reclamation experience in stabilizing embankment of Fontenelle earth dam // 9-th ICOLD Congress. 1967. Q. 32. R. 5. PP. 67 – 79.
14. Fenoux G. Y. Ecrans en paroi realises apres edification des remblais. Nouveaux outillages, nouvelles methods pour travaux neufs on travaux de reparation // 16-th ICOLD Congress. 1988. Q. 61. R. 1. PP. 1 – 26.
15. Jansen R. B. Assessment of potential detriment of leakage through the foundations of existing embankment dams. 18-th ICOLD Congress. 1994. Q. 68. R. 81. PP. 1375 – 1388.
16. Graybeal K. D. Seepage control at Mud Mountain dam // 16-th ICOLD Congress. 1988. Q. 61. R. 29. PP. 557 – 570.
17. Graybeal K. D., Levallois F. Construction of a cut off wall with the hydrofraise through the core of Mud Mountain dam // 17-th ICOLD Congress. 1991. Q. 66. R. 49. PP. 879 – 908.
18. Бардюков В. Г., Изотов В. И. и др. Ремонт плотины Курейской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2000. Т. 238. С. 92 – 96.
19. Федосеев В. И., Шишов И. Н., Пехтин В. А. и др. Противофильтрационные завесы гидротехнических сооружений на многолетней мерзлоте. — СПб: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2009. Т. 1.

## Памяти Евгения Андреевича Долгинина

14 апреля 2012 г. после продолжительной болезни скончался один из крупнейших гидростроителей Евгений Андреевич Долгинин, Герой Социалистического Труда, кандидат технических наук, с чьим именем связано развитие большой энергетики Сибири и освоение гидроэнергетического потенциала Ангары и Енисея.

Е. А. Долгинин родился 25 февраля 1930 г. в г. Камень Алтайского края. Его детство и юность прошли на Волге в г. Сызрани. В 1948 г. он поступил в Московский энергетический институт на гидроэнергетический факультет, который с отличием окончил в 1953 г.

Трудовая деятельность Евгения Андреевича началась на строительстве Иркутской ГЭС в должности мастера Управления строительства здания гидроэлектростанции, затем прораба и начальника производственно-технического отдела. За успехи в строительстве Иркутской ГЭС он был награжден медалью “За трудовую доблесть”. Его имя занесено на Доску почета и трудовой доблести строителей первой ГЭС на Ангаре.

После завершения строительства Иркутской ГЭС и сдачи ее в постоянную эксплуатацию в феврале 1960 г. Евгений Андреевич был переведен на строительство Красноярской гидроэлектростанции, где работал заместителем главного инженера, а затем главным инженером Управления основных сооружений. В 1968 г. он был назначен главным инженером КрасноярскГЭСстроя и на этом посту руководил всем комплексом работ по пуску агрегатов и работами по подготовке и сдаче Красноярской ГЭС в промышленную эксплуатацию.

Е. А. Долгинин принимал активное участие в решении технических вопросов и в организации работ в начальный период строительства Саяно-Шушенской ГЭС, включая укладку первого бетона в плотину и перекрытие Енисея, а также в возведении ряда других энергетических и промышленных объектов в Красноярском крае.



Характерными чертами Е. А. Долгинина являются умение сочетать богатый производственный опыт с глубокими теоретическими знаниями, творческий подход к решению сложных производственных и технических задач, принципиальность и ответственность при принятии решений.

В 1966 г. Е. А. Долгинин был награжден орденом “Знак Почета”, а в 1973 г. за выдающиеся успехи в сооружении Красноярской ГЭС имени 50-летия СССР ему было присвоено звание Героя Социалистического Труда с вручением ордена Ленина и золотой медали “Серп и Молот”. Его имя занесено на Доску почета лучших строителей Красноярской ГЭС.

В 1976 г. Е. А. Долгинин был командирован в Ирак сначала главным инженером строительства ГЭС Докан на р. Малый Заб, а затем с февраля 1977 г. главным советским экспертом на строительство гидроузла Хадита на р. Евфрат.

После завершения заграничной командировки Е. А. Долгинин работал директором Центрального научно-исследовательского и проектно-экспериментального института организации, механизации и технической помощи строительству (ЦНИИ-ОМТП) при Госстрое СССР, затем главным специалистом в Госстрое СССР и профессором Центрального межведомственного института повышения квалификации строителей (ЦМИПКС).

В последние годы, находясь на пенсии, Евгений Андреевич продолжал активно участвовать в обсуждении проблем отечественной гидроэнергетики на страницах газет и журналов. Много внимания он уделил и проблеме повышения надежности Саяно-Шушенской арочно-гравитационной плотины.

Светлая память о Евгении Андреевиче Долгинине — талантливом руководителе, выдающемся инженере, принципиальном и порядочном человеке надолго сохранится в сердцах знавших его людей.

## Памяти Евгения Ивановича Чулкова



2 мая 2012 г. на 98-м году жизни скончался Евгений Иванович Чулков – бессменный председатель Совета старейших энергетиков Украины, бывший первый заместитель министра энергетики и электрификации Украинской ССР.

Е. И. Чулков родился 15 октября 1914 г. в г. Баку. В 1938 г. он окончил Азербайджанский политехнический институт и в 1954 г. Энергетическую академию СССР.

Е. И. Чулков много сделал для укрепления дружественных связей с советами ветеранов энергетики России, Белоруссии, Казахстана, проводил активную работу по участию ветеранов энергетики в развитии и совершенствовании энергетической отрасли Украины, уделял большое внимание воспитанию молодежи и сам вырастил многочисленную семью потомственных энергетиков.

Более восьмидесяти лет Евгений Иванович беззаветно служил любимому делу – развитию энергетики Украины. Начав свою трудовую деятельность в 1929 г. учеником электромонтера, он прошел все ступени инженерной службы в электроэнергетике. Во время Великой Отечественной войны Евгений Иванович находился в действующей танковой части Юго-Западного фронта, участвуя в боях в качестве командира танка. После тяжелых ранений и лечения в 1944 – 1960 гг. он восстанавливал разрушенную фашистами Днепродзержинскую ГРЭС, развивал электросетевое хозяйство Крыма и особенно ярко проявил свои незаурядные способности руководителя на посту директора крупнейшей электростанции в Европе – Приднепровской ГРЭС. В 1960 г. Е. И. Чулков становится начальником Главюжэнерго Укрсовнархоза. Это назначение в период работы совнархозов фактически означало, что он стал первым министром энергетики Украины. В 1963 г. на базе Главэнерго было организовано Минэнерго Украины. Е. И. Чулков, один из организаторов его создания, становится первым заместителем министра энергетики и электрификации УССР. Последние 20 лет Евгений Иванович возглавлял Совет старейших энергетиков Украины.

За большие заслуги в развитии энергетики и участие в боевых действиях на фронтах Великой Отечественной войны Е. И. Чулков был награжден высокими правительственными наградами – тринадцатью орденами и тридцатью двумя медалями СССР, а также почетными грамотами Верховного Совета, Правительства и Академии наук Украины. Ему присвоены звания заслуженного и почетного энергетика Советского Союза, России, Украины, Белоруссии и Казахстана.

Евгений Иванович Чулков внес огромный вклад в развитие энергетики Украины и заслуживает увековечивания его памяти.



## Новости гидроэнергетики и гидротехники



### Гоцатлинская ГЭС

На Гоцатлинской ГЭС начат монтаж металлических спиральных камер гидротурбин, что означает переход строительства к этапу монтажа основного гидросилового оборудования. Всего на станции будет установлено два гидроагрегата с радиально-осевыми турбинами производства харьковского завода “Турбоатом” мощностью по 50 МВт каждый. На сегодняшний день выполнены отсасывающие трубы и смонтированы статоры обоих гидроагрегатов, ведется монтаж металлической спиральной камеры первого из них. Вес спиральной камеры 40 т. Работы ведет подрядная организация “Каспий СГЭМ”, монтаж планируется завершить в июне 2012 г., после чего камеры будут обетонированы.



Монтаж спиральной камеры Гоцатлинской ГЭС

В настоящее время строительство Гоцатлинской ГЭС ведется ускоренными темпами. Смонтированы металлоконструкции машинного здания ГЭС и

мостовой кран грузоподъемностью 200 т, необходимый для сборки гидроагрегатов. Завершается отделка 480-метрового туннеля эксплуатационного водосброса, ведутся бетонные работы на водоприемнике.

Станция подготовлена к резкому увеличению объемов работ по отсыпке тела плотины, что стало возможным после окончания сооружения противофильтрационной “стены в грунте” в ее основании. В целом строительная готовность Гоцатлинской ГЭС превысила 50 %.

### Загорская ГАЭС-2

25 апреля 2012 г. на Загорской ГАЭС-2 был начат монтаж рабочего колеса первого гидроагрегата (ГА №7). Строительство станции ведется быстрыми темпами с целью обеспечения пуска первых гидроагрегатов в конце 2012 г. На данный момент, забетонировано перекрытие пола машзала в осях 8 – 11 до отм. 149,85 м (ГА №7), начаты работы по монтажу подкрановых балок под мостовой кран в осях 8 – 10 (ГА №7). Завершен монтаж металлической облицовки шахты генератора ГА №8, на ГА №9 смонтированы: облицовка шахты турбины, переходной участок водовода, статор турбины, выполнены работы по бетонированию блоков спиральной камеры. На ГА №10 начаты работы по бетонированию блоков спиральной камеры. На монтажной площадке приступили к сборке ротора ГА №7. На водоприемнике выполнен монтаж соросдерживающих решеток.

Продолжаются работы по верхнему и нижнему бассейнам, напорным водоводам. В целом строительная готовность Загорской ГАЭС-2 превысила 70 %.

### Усть-Среднеканская ГЭС

Продолжается строительство Усть-Среднеканской ГЭС на р. Колыма. Сооружения гидроузла подготовлены к прохождению весеннего половодья. Выполнен монтаж основного затвора 506МЫ водосбросной плотины в секции В9 и ремонтного затвора 542МЫ водоприемника в секции С4. Начат монтаж электротехнического оборудования: экранированных токопроводов главных и нейтральных выводов ГРУ 15,75 кВ, КРУ 10 кВ собственных нужд, КТП 10/0,4 кВ.

По состоянию на 01.04.2012 в сооружения гидротехнического узла уложено 857,44 тыс. м<sup>3</sup> бетона, произведена выемка 6 829,66 тыс. м<sup>3</sup> и насыпь 3 132,17 тыс. м<sup>3</sup> грунта, смонтировано 5 680,62 т гидромеханического и 3 868,83 т гидроэнергетического оборудования. Общая готовность объекта составляет 43,5 %.

### Половодье 2012 года

Половодье 2012 г. на Волге проходило в достаточно напряженных условиях. Установившаяся теплая погода вызвала быстрое таяние снега, что привело к резкому росту приточности в водохранилища. Быстрое заполнение водохранилищ при сохраняющейся значительной приточности привело к необходимости открытия водосбросов на Угличской, Нижегородской, Чебоксарской, Камской, Жигулевской, Саратовской и Волжской ГЭС.

Особенно сложная ситуация сложилась на Чебоксарской ГЭС, водохранилище которой функционирует на непроектной отметке 63,0 м и практически не имеет регулирующей емкости. Было принято и согласовано с ФАВР решение о форсировке

уровня водохранилища до отметки 63,7 м. Несмотря на принятое и согласованное с ФАВР решение о форсировке уровня водохранилища до отметки 63,7 м, повышение уровня воды в нижнем бьефе из-за повышенных попусков создало угрозу подтопления ряда домов в с. Кокшайск.

Сложившиеся условия позволили увеличить по сравнению с прошлым годом обводнительный и рыбохозяйственный попуск с Волжской ГЭС в Волго-Ахтубинскую пойму.

На реках Сибири приточность в водохранилища была ниже средней. До начала половодья Новосибирское водохранилище согласно требованиям Верхне-Обского БВУ было сработано на 1,5 м ниже уровня мертвого объема с целью обеспечения надежного водоснабжения г. Новосибирска. По состоянию на 24 мая с.г. Новосибирское водохранилище продолжает наполняться.

Половодье на Саяно-Шушенской ГЭС развивается спокойно. По предварительным оценкам необходимости в холостых сбросах не возникнет.

*Материалы подготовлены пресс-службой  
ОАО "РусГидро": И. Слива, М. Ахмедов*

---

Сдано в набор 20.04.2012. Подписано в печать 14.06.2012. Формат 60×84 1/8.

Печать офсетная. Печ. л. 8,5. Цена свободная

---

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

**Internet:** <http://www.folium.ru>, **E-mail:** [info@folium.ru](mailto:info@folium.ru)

Отпечатано в типографии издательства "Фолиум"

---

## СПРАВКА

(предоставляется в редакцию каждым автором/соавтором статьи)

В соответствии с Законом Российской Федерации об авторских правах, сообщаю, что я, \_\_\_\_\_

автор (соавтор) статьи \_\_\_\_\_

уведомлён об ответственности за использование в статье таких материалов, защищённых авторским правом, как цитаты, воспроизведённые данные, иллюстрации и иные материалы, и о том, что ответственность за нарушение авторских прав ложится на автора статьи.

Я сообщаю, что данная статья не опубликована и не представлена для опубликования в другие периодические издания.

В связи с тем, что издательство “Springer” издаёт новый журнал на английском языке “Power Technology and Engineering”, статьи для которого будут отбираться из журналов “Электрические станции” и “Гидротехническое строительство”, я подтверждаю передачу прав издательству “Springer” на перевод статьи на английский язык и опубликование в печатном и электронном виде названной статьи в журнале “Power Technology and Engineering”, а также распространение её во всех странах мира в случае, если статья будет выбрана для печати в этом издании, и сообщаю, что такая передача указанных прав не нарушает авторских прав других лиц и организаций.

Подпись автора \_\_\_\_\_ « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_ г.

**Ф.И.О.** \_\_\_\_\_

**Адрес** \_\_\_\_\_

**Место работы** \_\_\_\_\_

**Тел.** \_\_\_\_\_

**Факс** \_\_\_\_\_

**E-mail**, который может быть размещён в свободном доступе на сайте журнала для общения читателя с автором статьи \_\_\_\_\_

**E-mail** для переписки с редакцией \_\_\_\_\_

# ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ СТАТЬИ

Статью в редакцию журнала “Гидротехническое строительство” можно направить по адресу: 109044, г. Москва, Воронцовский переулок, дом 2, стр. 1. ЗАО НТФ «Энергопрогресс» или по E-mail: gts1930@yandex.ru

Статья должна отвечать следующим требованиям.

1. Статью необходимо сопроводить письмом с указанием *сведений об авторах* (фамилия, имя и отчество полностью, место работы, ученая степень и должность, служебный и домашний адреса, номера домашнего и служебного телефонов), *краткой аннотацией*.

2. Принимаются к рассмотрению: статьи, напечатанные *на машинке* (на одной стороне листа через два интервала с полями 3 – 4 см), в двух экземплярах или один экземпляр распечатки статьи, набранной *на компьютере* (шрифт не менее 14 пт с полуторным межстрочным интервалом), плюс электронная версия статьи на диске (3,5" или CD) или по E-mail.

3. *Рисунки* представляются отдельно в двух экземплярах, их нельзя вклеивать в текст. В тексте (на полях) приводятся лишь ссылки на номера рисунков. Следует учитывать, что при печати рисунки уменьшаются, поэтому детали их не должны быть мелкими, однако размер каждого рисунка не должен превышать 200 × 290 мм.

Все *чертежи* выполняются в соответствии с действующими стандартами, аккуратно и четко. *Графики* должны быть выполнены в координатах в единицах измерения СИ (обязательных). Графики или кривые зависимости, если их на рисунке несколько, а также отдельные детали на чертежах, узлы и линии на схемах следует обозначать цифрами (позициями) или буквенными обозначениями. Сокращение слов не допускается.

*Фотоснимки* с четким контрастным изображением и хорошо проработанными деталями представляются в двух экземплярах, на одном из которых не должно быть никаких надписей и позиций.

4. *Формулы* должны быть четко написаны в отдельные строки (а не в текст). При этом прописные (большие) буквы подчеркиваются двумя черточками снизу, а строчные (маленькие) – двумя черточками сверху. Греческие буквы обводятся красным карандашом, латинские – синим. Индексы пишутся ниже строки, показатели степени – выше. На полях рукописи делаются пометки, поясняющие, какие буквы являются русскими, какие – латинскими, делается разметка букв [на полях или рядом пишется слово “буква” О, З, Ч, I (латинская), П, Ш, У в отличие от цифр 0, 3, 4, I, II Ш, V] в типах оборудования и других случаях. Если формулы набраны на компьютере, но их элементы имеют двойное прочтение, они должны быть размечены так же, как и при написании вручную.

5. *Таблицы* не должны быть громоздкими, все наименования необходимо писать без сокращения слов (за исключением единиц измерения). Численные значения величин в таблицах и в тексте должны быть в единицах измерения СИ (обязательных).

6. Статья должна завершаться *конкретными выводами*, в которых в лаконичной форме (по пунктам) излагаются результаты работы и предложения автора, вытекающие из изложенного материала.

7. *Список литературы* приводится в конце статьи. Он составляется в порядке последовательности ссылок в тексте. Ссылки на литературу в тексте заключаются в квадратные скобки. В списке указывается:

а) для *журнальных статей* – фамилия и инициалы всех авторов, название статьи, журнала, год издания, номер журнала (том);

б) для *книг* – фамилия и инициалы всех авторов, название книги, издательства, год издания;

в) для *сборников и продолжающихся изданий* – фамилия и инициалы всех авторов конкретной статьи, ее название, название сборника или издания, город, издательство, год, выпуск;

г) для *других видов изданий* перечисляются идентичные библиографические данные.

В список литературы не должны включаться неопубликованные материалы, материалы служебного пользования, а также мало распространенные издания и материалы, отпечатанные литографическим или подобным ему способом.

*Технические требования к электронной версии статьи.* Текст статьи должен быть набран на PC-совместимом компьютере (не Mac) с использованием базовых шрифтов Windows. Рисунки необходимо выполнить в форматах EPS, CDR, BMP, TIFF или JPEG и предоставить отдельными файлами (нельзя заверстывать рисунки в текст статьи). Сканирование графических рисунков нужно производить с разрешением 600 dpi, а фотоснимков, представляемых в электронном виде, – с разрешением не менее 300 dpi.