



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.

№ 3

март

2011

Содержание

Проектирование, строительство, эксплуатация

Баранов А. Е., Крылова Е. В., Ивасенко С. П., Разумов В. К. Опыт изысканий, проектирования, научных исследований в процессе строительства и первых лет эксплуатации Юмагузинского гидроузла 2

Савич А. И., Речицкий В. И., Замахеев А. М., Пудов К. О. Комплексные исследования деформационных свойств массива долеритов в основании бетонной плотины Богучанской ГЭС 12

Васильев А. В., Кокурин С. А., Козлов А. Б., Дерюгин Г. К. Характерные особенности оголовка эксплуатационного водосброса Бурейского гидроузла и некоторые результаты его лабораторных и натурных исследований 23

Расчеты, исследования, эксперименты

Беккер А. Т., Любимов В. С., Коваленко Р. Г., Александров А. В. Вероятностное моделирование коррозионных процессов стальных конструкций морских гидротехнических сооружений 27

Кожевников Н. Н. Разработка и испытания моделей кондуктометрического консистометра для земснаряда 32

Брянская Ю. В., Байков В. Н., Волынов М. А. Распределение скоростей и гидравлическое сопротивление при течении в трубах, каналах и речных руслах 36

Жеребятьев А. В. Использование математического планирования эксперимента при проектировании и строительстве грунтовых сооружений 40

Хроника

Асарин А. Е., Борщ П. С., Юрьев С. В. Международный конгресс по эксплуатации и реконструкции гидроузлов 49

Поздравление Л. А. Золотову 51

Поздравление А. Е. Александрову 52

За рубежом

Золотов Л. А., Шайтанов В. Я. Завершение основной фазы строительства гидроузла «Три ущелья»; первый опыт эксплуатации 53

Памяти Ю. М. Инюшина 58

Опыт изысканий, проектирования, научных исследований в процессе строительства и первых лет эксплуатации Юмагузинского гидроузла

Баранов А. Е., кандидат техн. наук, Крылова Е. В.,
Ивасенко С. П., Разумов В. К., кандидаты геол.-мин. наук
(ОАО “Институт Гидропроект”)

Рассказывается об опыте изысканий, проектирования, научных исследований в процессе строительства и первых лет эксплуатации Юмагузинского гидроузла.

Ключевые слова: Юмагузинский гидроузел, гидротехнические сооружения, особенности проектных решений, управление стоком р. Белой.

Комплексными задачами Юмагузинского гидроузла [3], построенного в среднем течении р. Белой (Агидель) в Республике Башкортостан являются: обеспечение в межень гарантированной работы водозаборов на нижележащем участке реки; снижение риска от наводнений для защиты городов (Кумертау, Мелеуз, Салават, Ишимбай, Стерлитамак) и их промышленных предприятий (нефтехимии, машиностроения и др.), сельскохозяйственных земель; выработка электроэнергии в систему Башкирэнерго.

Створ Юмагузинского гидроузла находится в 476 км от г. Уфы вверх по течению, акватория его водохранилища располагается в юго-восточных районах республики, в горно-таежной зоне Южного Урала. В состав основных сооружений этого объекта входят (рис. 1, 2): каменно-земляная плоти-

на высотой 65 м, донный туннельный водосброс-водовыпуск, здание ГЭС с тремя агрегатами установленной мощностью 45 МВт, трансформаторная площадка, ОРУ-110 кВ с ППУ, береговой паводковый водосброс. Гидроузел I класса, ФПУ — 270 м, НПУ — 260 м, УМО — 225 м. Максимальный расчетный сбросной расход через гидроузел 3760 м³/с. Водохранилище сезонного регулирования, каньонного типа, имеет максимальный объем 809 млн. м³ при площади зеркала 35,5 км², длину 57 км.

Гидроузел строился с 1999 по 2007 г. Финансирование работ по его строительству осуществлялось в основном за счет долевого участия республиканских предприятий и организаций и в небольшом объеме за счет федерального бюджета России. Перекрытие русла реки состоялось в июне 2003 г. с



Рис. 1. Панорама Юмагузинского гидроузла со стороны нижнего бьефа

переводом строительных расходов в туннель донного водосброса-водовыпуска. С мая 2004 г. гидроузел находился в режиме временной эксплуатации при частично наполненном водохранилище в условиях незавершенного строительства плотины и паводкового водосброса. Пуск первого агрегата гидроэлектростанции был произведен в октябре 2004 г., второго — в декабре и третьего — в апреле 2005 г. Приемка первой очереди гидроузла в постоянную эксплуатацию с НПУ 253 м состоялась в декабре 2006 г., сдача второй очереди с НПУ 260 м — в конце 2007 г.

Участок строительства Юмагузинского гидроузла имеет весьма сложные инженерно-геологические и гидрогеологические условия. Ложе и борта долины реки в створе плотины сложены сильно закарстованными известняками и доломитами; в правом борту выявлено древнее переуглубление реки глубиной до 90 м, сформированное глинами с включением гальки и обломков карбонатных пород с линзами и прослоями. С поверхности коренные породы и рыхлые отложения перекрыты четвертичными образованиями мощностью от 3 до 20 м. В мягких грунтах выделено девять инженерно-геологических элементов (от глин до галечниковых грунтов), а в скальном массиве — зоны относительно сохранных пород, слабого и интенсивного выветривания, участки с развитием трещин бортового отпора. Также имеется сложный водоносный комплекс в рыхлых отложениях, гидравлически взаимосвязанный с подземным бассейном карстовых вод, который, в свою очередь, находится под дренирующим влиянием реки. Район размещения объекта относится к зоне 6-балльных сейсмических сотрясений по шкале MSK-64.

Краткое описание компоновки и гидротехнических сооружений. К особенностям компоновки ГТС гидроузла (рис. 2) следует отнести совмещение туннельного водоподводящего тракта к турбинным водоводам ГЭС с донным туннельным водосбросом-водовыпуском, а также строительство из-за карстовых проявлений дополнительного сооружения — подводящего водовода к туннелю.

Каменно-земляная плотина образует большую часть напорного фронта гидроузла, имеет длину по гребню 540 м, максимальную высоту 65 м (рис. 3); профильный объем её насыпей составляет 4200 тыс. м³.

Противофильтрационный элемент плотины — вертикальное центрально-расположенное ядро из дресвяных грунтов с глинистым заполнителем, в основании которого проходит цементационная галерея. Боковые призмы плотины возведены из галечниковых грунтов и горной массы известняков. Очертание поперечного профиля каменно-земляной плотины в значительной мере определялось

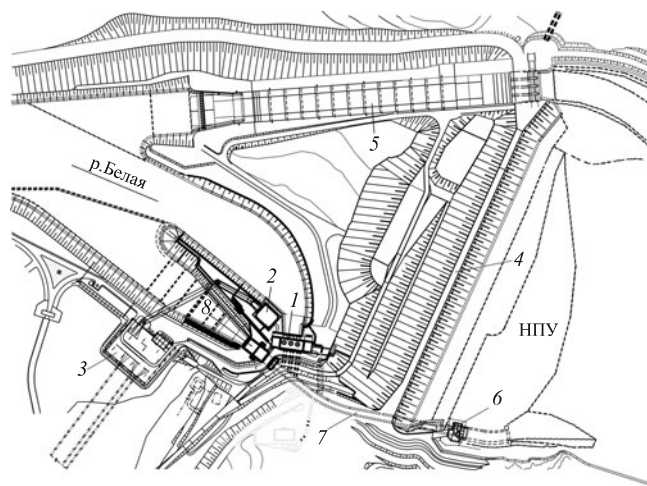


Рис. 2. Генеральный план гидроузла:

1 — здание гидроэлектростанции; 2 — трансформаторная площадка; 3 — ОРУ-110 кВ с ППУ; 4 — каменно-земляная плотина; 5 — береговой паводковый водосброс; донный водосброс-водовыпуск; 6 — входной оголовок; 7 — туннель; 8 — выходной оголовок

инженерно-геологическими условиями основания, в связи с этим плотина запроектирована с распланным поперечным профилем с уширенными (35 – 60 м) бермами. Ядро плотины сопрягается с основанием на протяжении всего напорного фронта посредством совершенной противофильтрационной завесы, состоящей из “стены в грунте”, цементационной и инъекционной завесы. Сопряжение ядра с бортовыми примыканиями на левом берегу осуществляется посредством железобетонной цементационной плиты, анкеруемой к скальной врезке, на правом берегу — посредством шпунтовой металлической диафрагмы.

Противофильтрационные мероприятия. Общая протяженность фронта противофильтрационной завесы (ПФЗ) составляет 960 м, максимальная глубина — 160 м, общая площадь — $106 \cdot 10^3$ м². Элемент ПФЗ “стена в грунте” перекрывает всю толщу аллювиальных отложений от основания плотины до скальных пород и имеет глубину до 32 м, длину 480 м, толщину 0,6 (1,0) м. Инъекционная завеса выполнена на участке переуглубления русла реки и сопрягает нижнюю часть “стены в грунте” с коренными породами основания до глубины 65 м. Цементационная завеса реализована в скальных породах основания плотины и ее бортовых примыканиях с максимальной глубиной 160 м.

Донный водосброс-водовыпуск (рис. 2, 4, 5) предназначен для осуществления регулируемых попусков воды из водохранилища в нижний бьеф, а также подачи воды из туннеля на турбины ГЭС по трем туннельным водоводам; при этом трасса туннеля проходит в скальном закарстованном массиве по левому берегу реки. В состав этого сооружения входят: подводящий канал, подводящий водовод, входной оголовок, туннель, ремонтный водовы-

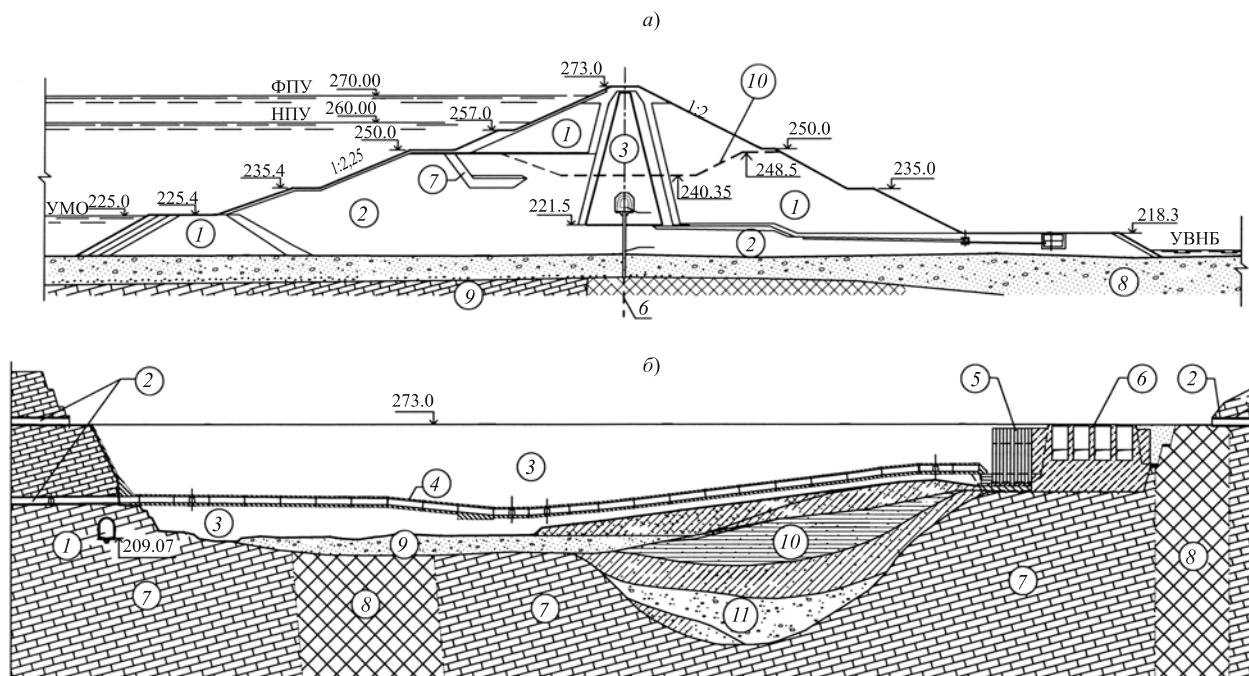


Рис. 3. Каменно-земляная плотина:

а — поперечный разрез на русловом участке: 1 — горная масса; 2 — галечниковые грунты; 3 — ядро из щебенисто-глинистых грунтов; 4 — цементационная галерея; 5 — траншейная завеса “стена в грунте”; 6 — однорядная цементационная завеса; 7 — дренажное устройство строительного периода; 8 — галечниковый аллювий; 9 — скальные грунты; 10 — штабеленый профиль к пропуску половодья 2004 г.

б — продольный профиль по оси плотины: 1 — туннель донного водосброса-водоотпуска; 2 — цементационные штольни; 3 — плотина; 4 — цементационная галерея; 5 — стальная диафрагма; 6 — входной оголовок паводкового водосброса; 7 — известняки и доломиты различной степени сохранности, трещиноватости и закарстованности; 8 — зоны тектонических разрывов и повышенной водопроницаемости; 9 — галечниковый аллювий; 10 — глинистые грунты с крупнообломочными включениями; 11 — гравийные отложения с линзами сулгинков

пуск, выходной оголовок, водобойный колодец с монолитной и гибкой рисбермой, отводящий канал.

Входной оголовок представляет собой железобетонную конструкцию башенного типа высотой 63,5 м. Оголовок оборудован двумя ремонтными и аварийно-ремонтными затворами, сороудерживающими решетками, козловым краном, на гребне — грейфером. В верхней части оголовка выполнен мостовой служебный переход с берегом.

В бортах и в основании подводящего водовода и входного оголовка были выявлены значительные карстовые полости, заполненные глинистым материалом, что потребовало реализации целого ряда противокарстовых мероприятий [2, 4]. В частности, башенный оголовок был “смещен” по оси туннеля в нижний бьеф, в его основании выполнены железобетонные буронабивные сваи, конструкция “защемлена” в скальные борта.

Туннель длиной 294 м имеет сечение в свету 80 м², материал облицовки — монолитный железобетон до оси плотины и далее металлооблицовка до выходного оголовка. В подошве туннеля предусмотрен ремонтный водовыпуск, оборудованный системой затворов и выполненный в виде трубы с водоприемной и выходной частью.

Выходной оголовок представляет собой здание, оборудованное двумя основными сегментными и четырьмя ремонтными затворами. Маневрирование

сегментными затворами осуществляется гидроприводами, ремонтными — мостовым краном.

В состав гидроэлектростанции входят следующие основные сооружения: туннельные турбинные водоводы; здание ГЭС с агрегатным блоком, монтажной площадкой и служебным корпусом; отводящий канал с подпорными стенками; туннель токопроводов и трансформаторная площадка; двухцепная ВЛ-110 кВ; ОРУ-110 кВ со зданием ППУ.

В здании ГЭС (рис. 2, 6, 7, 8) установлены три вертикальные гидроагрегата с поворотными лопастными турбинами ПЛ 50-В230 с трехфазными синхронными генераторами СВ2 380/115-20 УХЛ4, мощность одного гидроагрегата 15 МВт. Перед входом в камеру каждого агрегата устанавливается аварийно-ремонтный дисковый затвор, машзал обслуживается мостовым краном, отсасывающие трубы перекрываются плоскими ремонтными затворами. Два силовых трансформатора ТРДН-40000/110У1 устанавливаются на площадке по левому борту отводящего канала ГЭС. Выдача мощности от ГЭС выполняется по трем воздушным линиям 110 кВ в энергосистему ОАО “Башкирэнерго”.

Береговой паводковый водосброс (рис. 1, 2) предназначен для пропуска паводковых расходов и расположен на правом берегу гидроузла. Водосброс выполнен в виде быстротока, в состав которого входят: подводящий канал, головной участок,



Рис. 4. Выходной оголовок и отводящий канал донного водосброса. Справа — ОРУ 110 кВ с ППУ, слева — здание ГЭС и трансформаторная площадка

лоток быстротока, водобойный колодец с рисбермой и отводящим каналом. Головной участок запроектирован для пропуска паводковых расходов как в строительный, так и в эксплуатационный период; делится на четыре пролета; в каждом обустраивается водослив практического профиля, который оборудуется основным сегментным затвором и ремонтным плоским затвором. Маневрирование затворами осуществляется козловым краном. Лоток быстротока длиной 394 м имеет прямоугольную форму шириной 45 м, высота его стенок от 7 до 18 м. Быстроток сопрягается с отводящим каналом при помощи водобойного колодца и рисбермы, его отводящий участок имеет длину 165 м.

Научные исследования, изыскания, проектирование. В процессе научных исследований, изысканий и проектирования, в том числе обусловленных наличием сложных инженерно-геологических условий в основаниях сооружений Юмагузинского гидроузла, апробированы оригинальные проектные решения водосбросных сооружений, каменно-земляной плотины, противофильтрационных мероприятий; разрешены природоохранные проблемы; создан современный архитектурный облик объекта [1–4]. В ходе проектирования и строительства были выполнены значительные объемы инженерно-геологических, карстологических, сейсмологических изысканий и исследований по обоснованию технических решений; в их развитие проведен комплекс науч-

но-исследовательских и лабораторных работ, соответствующих гидроузлу подобного класса.

Тематика научно-исследовательских работ была достаточно обширной и разноплановой, например: модельные расчетные исследования напряженно-деформированного состояния гидротехнических сооружений совместно с их основаниями; расчеты устойчивости и прочности сооружений и их элементов с использованием современных компьютерных программ; гидравлические исследования водосбросных и водоотводящих сооружений на пространственной и фрагментной моделях; расчеты, обусловленные гидродинамическими нагрузками и сейсмическими воздействиями.

Актуализацию проекта с дополнительными проектными проработками, разработку рабочей документации основных сооружений Юмагузинского гидроузла, авторский и геологический надзор за их строительством, мониторинг за состоянием строительства и эксплуатации объекта осуществлял в качестве генпроектировщика институт “Гидропроект”, г. Москва (с 2009 г. ОАО “Институт Гидропроект им. С. Я. Жука”). Документацию по механическому оборудованию водосбросных сооружений разрабатывало СПКТБ “Мосгидросталь”, проектные работы по противофильтрационным и укрепительным мероприятиям — ООО СПИИ “Гидроспецпроект”, ПСК “Геостройпроект” (г. Москва). В проектировании также принимали участие ОАО “Волгаэнергопроект-Самара” (г. Самара), ООО

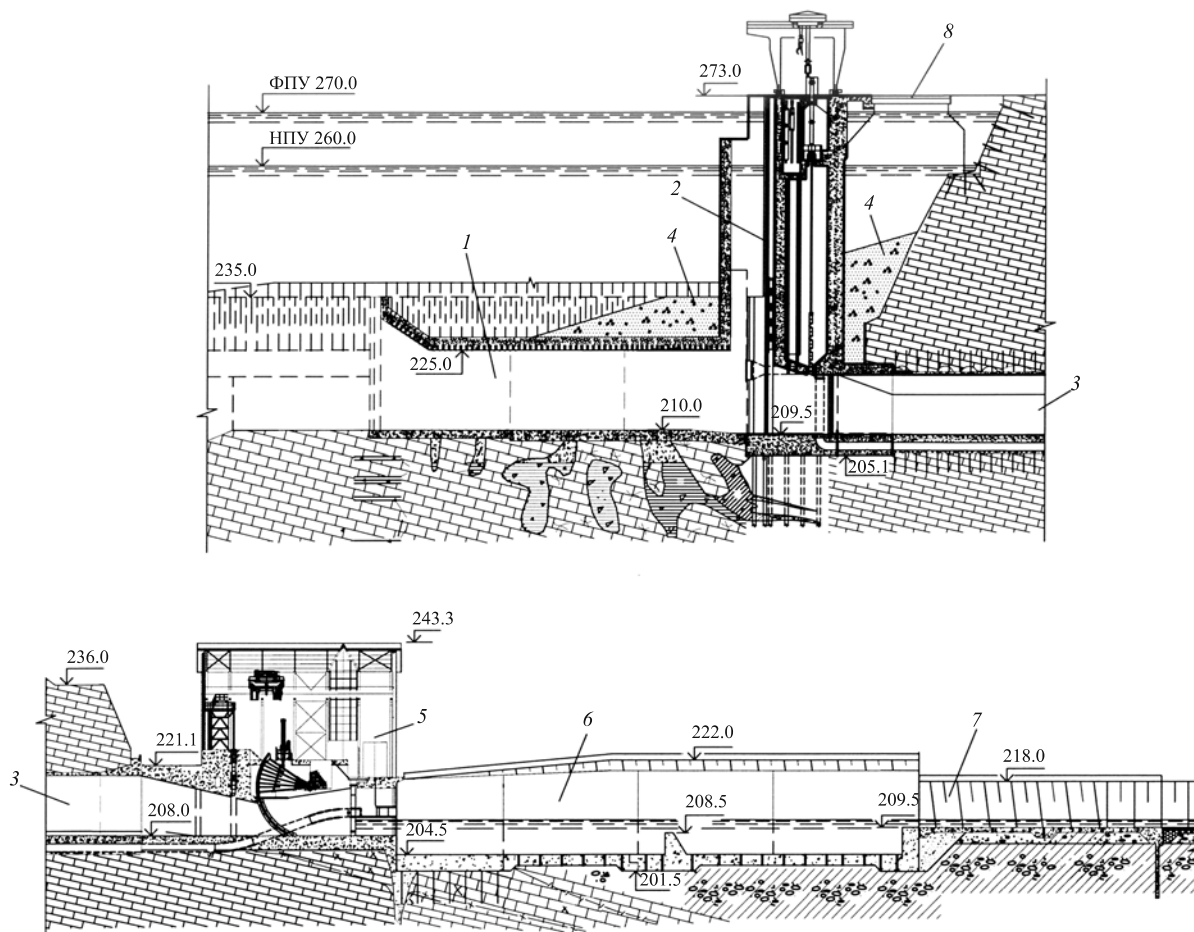


Рис. 5. Донный водосброс-водовыпуск, продольный разрез:

1 — подводный водовод; 2 — входной оголовок; 3 — туннель; 4 — грунт каменно-земляной плотины; 5 — выходной оголовок; 6 — водобойный колодец; 7 — рисберма; 8 — мостовой переход

ПКФ «ПРОМИВХ» (г. Ростов-на-Дону), Институт 31 ГПИ СС Минобороны РФ (г. Москва), ПБ-1 УС-30 (г. Межгорье) и др. Проектные работы по гидросиловому оборудованию выполнялись заводскими конструкторскими бюро: по турбине и дисковому затвору — СКБ «Гидротурбомаш» ОАО «ЛМЗ» (г. Санкт-Петербург), по генератору — КБ ОАО «Уралэлектротяжмаш» (г. Екатеринбург).

Был реализован значительный объем научно-исследовательских работ, которые выполнялись под руководством ОАО «Институт Гидропроект» московскими организациями ОАО «НИИЭС», МГСУ, ЦСГНЭО, НИИЖБ, ЦНИИ Минобороны РФ. Изыскательские работы на объекте осуществлялись специалистами ЗАО «ЗапУралТИСИЗ» и ВНИИ-ГИС (г. Уфа), ОАО «Институт Гидропроект» и ЦСГНЭО (г. Москва).

Особенности технических решений. Приводим краткое описание некоторых особенностей проектных (технических) решений по основным сооружениям Юмагузинского гидроузла, которые должны представлять практический интерес для специалистов в области проектирования гидротехнических сооружений [3, 4].

1. На начальной стадии строительства каменно-земляной плотины по результатам экспериментальных исследований, расчетов, проектных проработок была всесторонне изучена возможность замены карьерных грунтов, укладываемых в плотину, на грунтовой материал из полезных выемок котлованов паводкового и донного водосбросов и правобережного скального борта примыкания плотины, что уменьшало стоимость и сроки строительства. Это решение было воплощено: гравийно-галечниковый грунт боковых призм плотины частично заменен на горную массу известняков, а вместо суглинистого материала ядра применены щебенисто-глинистые грунты после их переработки и кондиционирования (рис. 3).

2. В период подготовки к весеннему половодью 2004 г. возникла проблема пропуска расчетных расходов через недостроенные водосбросные сооружения: донный водосброс-водовыпуск (с незавершенным строительством входного оголовка из-за выявленных карстовых проявлений); паводковый водосброс, на котором частично были выполнены элементы быстротока и водогасительных устройств в нижнем бьефе, и плотину, возведенную примерно



Рис. 6. Здание ГЭС (вид с плотины в сторону нижнего бьефа). Слева — выходной оголовок донного водосброса

на 60 % проектного объема. Следовало обеспечить гарантированную расчетную пропускную способность водосбросов и построить напорный фронт плотины до безопасных отметок, исключающих перелив воды через верх плотины.

С этой целью были разработаны и реализованы нестандартные технические решения: выполнение штрабленного профиля плотины на русловом и левобережном участках за счет подъема гребня верховой призмы из гравийно-галечниковых грунтов (рис. 3, а) до отм. 248,5 м и на нижележащей штрабленной части ядра устройство пониженной отм. 240,3 м, а также создание системы временных дренажных устройств. Указанные решения были апробированы комплексными исследованиями и расчетами, в частности, с использованием пространственной гидравлической модели гидроузла и математической фильтрационной модели. Также потребовалось осуществить временное штрабление водосливного оголовка паводкового водосброса, выполнив его в виде лотка, с понижением входного порога и заглублением дна его подводящего канала [3, 4].

3. Серьезной проблемой при проектировании и строительстве основных сооружений гидроузла, особенно водоподводящих конструкций донного водосброса-водовыпуска, был поиск оптимальных инженерных защитных мероприятий по борьбе со значительными карстовыми проявлениями [1, 3]. По мере решения этой сложной задачи (с привлечением специалистов по геологии, карстологии и геофизическим исследованиям, с выполнением расчетов на компьютерной модели) плановую привязку башни входного оголовка донного водосброса при-

шлось изменять трижды, в окончательном варианте башня была смещена на 85 м в нижний бьеф. Тем самым длина туннеля донного водосброса была уменьшена, однако возникла необходимость проектирования и строительства дополнительного сборно-монокричного железобетонного сооружения — подводящего водовода длиной 70 м, сечением $15 \times 13,5$ м.

Для обеспечения устойчивости башни потребовалось выполнить опирание в борта котлована нижней её части до отм. 240 м, а также обустроить в закарстованном основании башни 20 шт. железобетонных буронабивных свай (сечением 500 – 590 мм), длиной от 10 до 20 м и осуществить сложный комплекс работ по расчистке и забивке бетоном карстовых пустот, укрепительной цементации скального массива, анкерному креплению. Кроме того, карст был выявлен при вскрытии кот-



Рис. 7. Машинный зал здания ГЭС

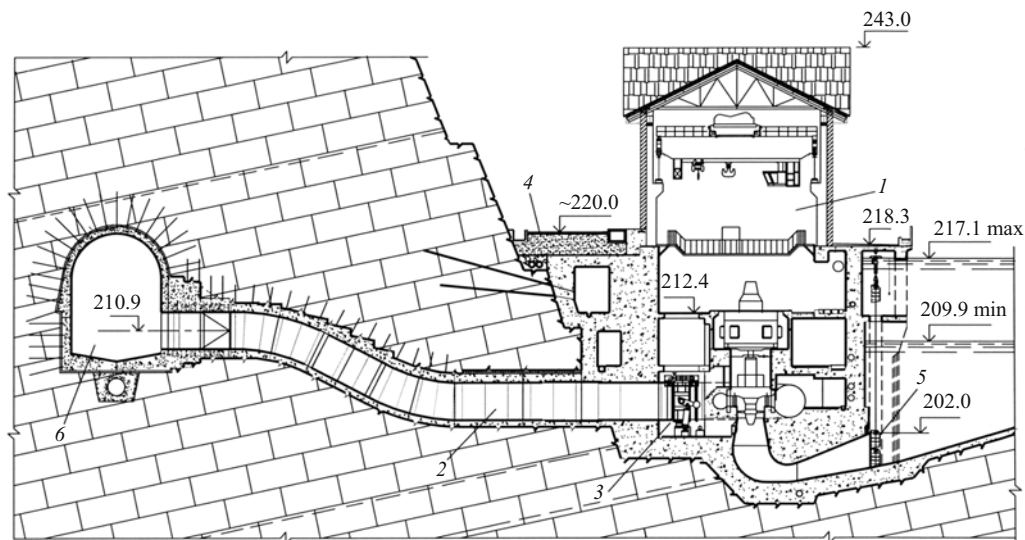


Рис. 8. Здание ГЭС, поперечный разрез по оси агрегата № 1:

1 — машинный зал; 2 — туннельный турбинный водовод; 3 — дисковый затвор; 4 — автодорога к ОРУ-110 кВ; 5 — ремонтный затвор; 6 — туннель донного водосброса-водовыпуска

лованов других гидротехнических сооружений, но с меньшей степенью проявлений [2].

4. Определенные сложности имели место при апробировании на объекте конструкции “стена в грунте” с применением современной техники (CASAGRANDE): в основании каменно-земляной плотины, для грунтовых перемычек котлованов водосбросов, на участках рисбермы и под фундаментами подпорных стен. Эффективность, целесообразность и надежность применения этого метода в процессе проектирования, строительства и временной эксплуатации были подтверждены [3].

5. С целью испытаний насухо механического оборудования (ремонтных и аварийно-ремонтных затворов) на входном оголовке донного водосброса-водовыпуска перед перекрытием русла и переводом водного стока в туннель при отсутствии эксплуатационных грузоподъемных механизмов (козлового крана и гидроприводов) было использовано интересное решение, которое заключалось в применении временных металлических эстакад и канатных электрических лебедок со сложной полиспастной системой, установленной на башне оголовка и берме скального откоса. Испытания были проведены успешно; при этом часть этой системы продолжала действовать в качестве привода аварийно-ремонтных затворов в процессе временной эксплуатации до тех пор, пока не были построены и смонтированы оголовок и его мехоборудование [4].

6. При конструировании отделки напорного туннеля донного водосброса-водовыпуска (сечением $6,8 \times 11,2$ м) для ускорения работ по его строительству были применены современные проходческие опалубочные и бетоноукладочные механизмы [3], а также индустриальное возведение металлооб-

лицовки туннеля в сборе в виде армометаллоблоков, изготовленных в заводских условиях.

7. Практически на всех зданиях гидроузла (рис. 4 – 8) — гидроэлектростанции, выходном оголовке донного водосброса, подстанционном пункте управления на ОРУ-110 кВ, административно-бытовом корпусе службы эксплуатации — были осуществлены архитектурные решения с улучшенной отделкой керамогранитными плитами, вентилируемыми фасадами стен и металлочерепицей на кровле [3].

8. Было внедрено оригинальное решение по устройству и монтажу секций шандорных металло-железобетонных заграждений с пролетом 14 м в пазу подводящего водовода донного водосброса с целью формирования искусственного порога, создающего преграду наносам по мере их накопления в водохранилище [4].

9. Запроектирована и осуществлена конструкция здания ГЭС с нетрадиционной левосторонней “закруткой” спиральной камеры гидроагрегатов, что было обусловлено сложными компоновочными условиями размещения гидроэлектростанции, трассировки туннелей в сохранном скальном массиве и отводящих сооружений донного водосброса-водовыпуска.

10. С целью сокращения сроков строительства на объекте применялись сборные железобетонные изделия, включая сборные опалубочные армопанели для конструкций стен, консолей и балок, что было осуществлено в сооружениях донного водосброса-водовыпуска в разумных и экономически оправданных пределах [4].

11. Для реализации требований закона РФ “О безопасности гидротехнических сооружений” были разработаны инженерно-технические меро-

приятия, позволяющие в случае аварийной ситуации с затворным оборудованием на водосбросных сооружениях произвести удаление затворов, перекрывающих водоприемные отверстия, в том числе с помощью взрывного способа [3, 4].

12. В процессе гидравлических модельных исследований на входном участке донного водосброса-водовыпуска при определенных режимах было зафиксировано воздухововлечение с водной поверхности, инициированное подводным очертанием примыкающего откоса берега и несимметричным подходом водного потока. Воздухововлечение могло привести к затягиванию в водосбросной тракт плавающей древесины, льда и, соответственно, к возникновению аварийной ситуации как на водосбросе, так и на агрегатах ГЭС. В связи с этим были разработаны и воплощены проектные решения по защитной шахте на напорной стороне башни водоприемника, по формированию оптимальных очертаний конструкций на входном участке (рис. 5), по установке защитной понтонной запани, что позволило минимизировать это негативное явление [4].

Компьютерная модель управления стоком р. Белой. Основные функции построенного Юмагузинского гидроузла, решающие в среднем течении р. Белой проблемы гарантированного водопользования, защиты от наводнений, выработки электроэнергии, определяют необходимость с максимальным эффектом использовать регулирующие возможности водохранилищ на этом участке реки, соотнося режимы их работы с конкретными гидрологическими особенностями каждого половодья. Решение о совместном управлении стоком р. Белой Юмагузинским и Нугушским (расположено на притоке ниже Юмагузинского) водохранилищами с использованием компьютерной модели было принято на заседании Республиканской противопаводковой комиссии в апреле 2005 г. и получило развитие на правительственном уровне Республики Башкортостан.

Разработка компьютерной модели была поручена специалистам института “Гидропроект”. В качестве компьютерного инструментария системы автоматизированного управления водными ресурсами этих водохранилищ был использован программный комплекс “MIKE 11” (разработанный Датским гидравлическим институтом), с помощью которого специалистами ВНИИ гидротехники и мелиорации (г. Москва) была разработана гидродинамическая модель среднего течения р. Белой. В результате совместной работы специалистов создана компьютерная модель управления стоком р. Белой [5], которая состоит из программного комплекса “BEREST” (объединяющего два расчетных блока — “GIDROGRAF” и “REGIM”), разработанного в

Гидропроекте для формирования исходной гидрологической информации и расчетов трансформации стока р. Белой и р. Нугуш соответственно Юмагузинским и Нугушским водохранилищами, а также из пространственной модели среднего течения р. Белой, описанной с помощью программного комплекса “MIKE 11”, позволяющей моделировать прохождение стока на этом участке реки.

Для выполнения противопаводковых функций применяется двухступенчатый режим управления водохранилищами. Он предполагает максимальное использование их противопаводкового объема для защиты территорий от наводнений (1-я ступень управления), а при наступлении половодья или паводка вероятностью превышения, близкой к расчетной или поверочной для сооружений соответствующего класса, — переход на режим работы, обеспечивающий безопасный пропуск максимальных расходов воды через водосбросные сооружения гидроузлов (2-я ступень).

При реализации задач 1-й ступени учитывается значительная боковая приточность на участке от створа гидроузла до контрольного створа. Это определяет специальный (компенсированный) режим работы Юмагузинского и Нугушского гидроузлов при прохождении по р. Белой максимальных расходов воды. Попуски в нижние бьефы гидроузлов назначаются таким образом, чтобы расход воды в контрольном створе не превышал допустимых значений. На р. Белой таким створом является г. Стерлитамак, расположенный в 205 км ниже по течению от створа Юмагузинского гидроузла.

При осуществлении компенсированного регулирования попуски из водохранилищ назначаются таким образом, чтобы с учетом боковой приточности расходы воды в контрольных створах обеспечивали необходимые для работы водозаборов уровни воды в реке. Если в среднем течении реки выпадают осадки и нерегулируемая боковая приточность окажется значимой, попуски из водохранилищ могут быть уменьшены, что позволит использовать накопленный запас воды для обеспечения устойчивой работы водозаборов в другие месяцы межени или избежать отключения Юмагузинской ГЭС.

Разработка компьютерной модели управления стоком р. Белой, включая инструкции по её использованию, была завершена в 2006 г. и передана в службу эксплуатации Юмагузинского гидроузла с проведением соответствующего обучения её специалистов.

Следует отметить, что для эффективного использования компьютерной модели в период половодья и межени необходима обширная и тщательно подготовленная гидрологическая информация, что требует организации (восстановления) специальной сети гидрологических наблюдений на основ-

ных притоках, впадающих в р. Белую ниже створа Юмагузинского гидроузла, а также повышения качества предоставляемых долгосрочных и краткосрочных прогнозов объема и расходов половодий на основных нерегулируемых притоках реки.

Первые годы эксплуатации. Специалисты ОАО “Институт Гидропроект” после сдачи Юмагузинского гидроузла в эксплуатацию продолжают осуществлять мониторинг за состоянием основных сооружений и геологической среды и оказывать инженерно-консультационные услуги службе эксплуатации.

Коррозия облицовки туннеля и затворов выходного оголовка донного водосброса-водоотпуска. При плановом осмотре опорожненного туннеля донного водосброса-водоотпуска [5] перед половодьем 2008 г. специалистами службы эксплуатации были зафиксированы явления интенсивной очаговой коррозии отдельных элементов металлической облицовки участков сопряжения туннеля с выходным оголовком, а также коррозии напорной части облицовки основных сегментных затворов, которые находятся при нормальном эксплуатационном положении установленными на порог. Имели место отслаивание и вспучивание на этом участке антикоррозионного покрытия “Влагокор” от металлооблицовки. При этом на остальных участках металлооблицовки туннеля очаги коррозии не обнаружены. В результате анализа возможных причин интенсивной коррозии специалистами Гидропроекта были определены две возможные причины: первая — влияние сероводорода, растворенного в воде, в застойной зоне туннеля (между турбинными водоводами и основными затворами); вторая — перепад температур наружного воздуха, проникавшего в процессе временной эксплуатации в зимний период в помещения выходного оголовка, и воды в туннеле в этой зоне перед затворами.

Службе эксплуатации были даны предварительные рекомендации по методам более радикальной защиты от коррозии — протекторной (электрохимической) или комбинированной в сочетании с лакокрасочной. Также были разработаны предложения по щадящему режиму организации попусков воды через донный водосброс в части регулярной “продувки” застойных зон воды и уменьшения времени использования совместного режима работы основных затворов и агрегатов ГЭС с целью минимизации нестационарных гидравлических нагрузок на облицовку.

Нарушение левобережного участка цемзавесы. Из-за особенностей геологического строения оснований (и бортов) гидротехнических сооружений объекта их строительство сопровождалось активным проектированием, авторским и геологическим надзором за выполнением различных противо-

фильтрационных мероприятий с целью полной ликвидации или минимизации возможных путей фильтрации из водохранилища, в том числе обходных, и теоретически возможного перетока воды в соседние долины [1].

Создание противофильтрационной завесы и осуществленные инженерные мероприятия по заделке карстовых полостей позволили заметно улучшить состояние скального массива в основаниях сооружений туннельного водосброса-водоотпуска в основании и бортовых примыканиях каменно-земляной плотины [1, 2]. Тем не менее при гидрорежимных наблюдениях в составе комплексного мониторинга объекта, проводимого специалистами ОАО “Институт Гидропроект”, особое внимание уделялось оценке влияния режима работы водохранилища на состояние и развитие карста. Первые годы эксплуатации гидроузла подтвердили, что закарстованность массива продолжает оставаться фактором, играющим значительную роль в формировании геолого-гидрогеологических условий при эксплуатации основных сооружений Юмагузинского гидроузла.

Мировой опыт гидротехнического строительства на закарстованных основаниях показывает, что со временем при определенных фильтрационных параметрах геологической среды может происходить снижение качества цементационных завес, для восстановления противофильтрационных свойств которых требуются те или иные инженерные мероприятия. Для этого объекта сигналом о развитии подобной негативной ситуации в левобережном примыкании плотины (к концу второго года эксплуатации гидроузла) послужило anomальное поведение уровней в ряде пьезометров, установленных в створах до цемзавесы и за ней из цемштольни № 1 и выполненных на отм. (забой) 200 – 210, 190 и 165 м, а из цемштольни № 3 — на отм. 234 – 236 м. Anomальные отклонения в уровнях этих пьезометров заключались, в том числе в превышении принятых для них критериев безопасности. В качестве основного фактора передачи напора из верхнего бьефа в нижний рассматривалось проникновение фильтрационного потока по фронту цемзавесы в пределах рассматриваемого участка по причине размыва заполнителя карстовых полостей и зон тектонических трещин, не принявших в свое время цементные растворы из-за их низкой водопроницаемости. Подтверждением этому послужил также факт появления летом 2009 г. бурой взвеси в воде пьезометров 1л-ба и 1л-бд, причем в большем количестве присутствовал и более грубый материал.

В процессе изысканий, проходки туннеля и штолен в известняках и доломитах в зоне “нарушенного участка цементации” были встречены крупные карстовые полости, приуроченные к кру-

топадающим диагональным и поперечным трещинам, имеющим протяженность более 100 м и пересекающим цемзавесу. Ширина полостей составляла 10 – 15 м, заполнены они были в основном глиной со щебнем, вдоль некоторых из них прослеживались зоны сильнотрещиноватого известняка.

О наличии другого пути фильтрации было высказано предположение в отчете Гидропроекта по мониторингу 2004 г., в котором говорилось, что фильтрационный поток поступает в нижний бьеф за обделкой вдоль туннеля донного водосброса, где, видимо, не произошло смыкания укрепительной цементации, выполненной из туннеля, с основной цемзавесой.

В марте 2008 г. перед половодьем были произведены осмотр осушенного туннеля донного водосброса-водовыпуска и замеры уровней воды в пьезометрах окружающего массива пород. Оказалось, что в ряде пьезометров, расположенных до цемзавесы, уровень воды резко понизился; при этом так же значительно понизилось давление воды на обделку туннеля по показаниям приборов ПДС, установленным на ПК2+0,4 туннеля. После восстановления эксплуатации туннеля уровни в этих пьезометрах и ПДС быстро восстановились, что свидетельствовало о версии поступления фильтрационного потока в нижний бьеф через цемзавесу с разгрузкой в закарстованный массив пород между подходной штольной и береговым склоном.

Передача напоров за линию цемзавесы в нижний бьеф (НБ) со временем могла привести к негативным последствиям, влияющим на эксплуатацию, надежность и безопасность сооружений, таким как: повышение напора над кровлей туннеля донного водосброса-водовыпуска, превышающего допустимые величины при его опорожнении; увеличение фильтрационных расходов в НБ; омоложение суффозионно-карстовых процессов; прогрессирующее нарушение сплошности цемзавесы; нарушение устойчивости склонов, откосов и отдельных сооружений в НБ. В связи с этим возникла необходимость оперативной разработки проекта дополнительной цементации на рассматриваемом участке, включая развитие дополнительной пьезометрической сети. С ноября 2009 г. были начаты работы по его реализации, к концу года наметилась положительная тенденция восстановления уровней в контрольных пьезометрах до приемлемых эксплуатационных значений и, соответственно, восстановления целостности цемзавесы. Наблюдения были продолжены, особенно в период половодья 2010 г., как по существующим, так и по восстановленным и вновь пробуренным пьезометрам с целью получения представительного ряда наблюдений с учетом мероприятий по восстановлению цементационной

завесы. На основании анализа наблюдений (визуальных и инструментальных) за уровнем режимом может быть установлено, насколько процесс разрушения цементационной завесы оказался обратимым во времени, и оценена геофильтрационная обстановка левобережного примыкания плотины. После этого должен быть рассмотрен вопрос о корректировке критериальных значений для уровней в контрольных пьезометрах.

Аномальные осадки секций № 15, 16 цемгалереи.
В процессе наблюдений за состоянием сооружений в 2008 – 2009 гг. службой эксплуатации Юмагузинского водохранилища было зафиксировано превышение по показаниям приборов КИА критериев безопасности 2-го уровня по отношению к осадкам секций № 15 и 16 цементационной галереи (рис. 3), находящихся в основании ядра каменно-земляной плотины. В результате детального анализа представленной информации по наблюдениям и по исполнительной документации было выделено и изучено несколько факторов, которые могли явиться причиной значительных осадок этих секций, включая неудовлетворительную подготовку их основания по мере строительства, воздействие водонасыщения на прочностные и деформационные характеристики грунтов основания и самого ядра плотины, недооценку при назначении расчетных характеристик грунтов и т.д. По итогам выполненных оценочных расчетов с использованием методики по определению критериев безопасности специалистами Гидропроекта были даны рекомендации по корректировке предыдущих критериальных значений осадок этих галерей, а также по установке дополнительных геодезических марок и обустройству дополнительных пьезометров с верхнего и нижнего бьефов в одной из “проблемных” секций.

Список литературы

1. Андрианов А. В., Баранов А. Е., Крылова Е. В. Опыт активного проектирования противокарстовых мероприятий на участке входного оголовка донного водосброса-водовыпуска Юмагузинского гидроузла // Гидротехническое строительство. 2003. № 3.
2. Щелканов Ю. А., Андрианов А. В., Крылова Е. В. Противокарстовые инженерные мероприятия на объектах гидротехнического строительства // Гидротехническое строительство. 2004. № 3.
3. Баранов А. Е. Юмагузинский гидроузел на р. Белой в Республике Башкортостан // Гидротехническое строительство. 2004. № 7.
4. Баранов А. Е., Годунов Б. И. Особенности проектных решений водоподводящих сооружений донного водосброса-водовыпуска Юмагузинского гидроузла // Гидротехническое строительство. 2006. № 5.
5. Бубер А. Л., Трошина М. В., Ивасенко С. П. Компьютерная модель управления половодным стоком в среднем течении р. Белой // Гидротехническое строительство. 2008. № 2.

Комплексные исследования деформационных свойств массива долеритов в основании бетонной плотины Богучанской ГЭС

Савич А. И., доктор физ.-мат. наук, Речицкий В. И.,
кандидат техн. наук, Замахаев А. М. кандидат физ.-мат. наук,
Пудов К. О., инженер (филиал ОАО “Институт Гидропроект” — ЦСГНЭО)

Приведены результаты комплексного изучения деформационных свойств массива долеритов в основании бетонной плотины Богучанской ГЭС, выполненного ЦСГНЭО в 2007 – 2008 гг.

Ключевые слова: Богучанская ГЭС, скальное основание, бетонная плотина, деформационные свойства, массив долеритов, модуль деформации.

В настоящее время для оценки деформационных свойств массивов скальных пород используются различные методы: геомеханические, инженерно-геологические, геофизические, расчетные и др. [1, 2], каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки, поэтому с целью получения наиболее полной и объективной информации о деформируемости скальных массивов, служащих основаниями или вмещающей средой инженерных сооружений, их часто используют в комплексе.

Наглядным примером необходимости такого подхода является работа по комплексному изучению деформационных свойств массива долеритов в основании бетонной плотины Богучанской ГЭС, выполненная специалистами* ЦСГНЭО в 2007 – 2008 гг. Эти исследования проводились для оценки текущего состояния массива долеритов после длительного (с 1992 по 2002 г.) перерыва в строительстве плотины и для уточнения расчетных характеристик деформируемости пород основания сооружения. Попутно ставилась задача проверки обоснованности ранее принятых расчетных показателей деформируемости долеритов в характерных зонах основания, а также прогноза их возможных изменений под влиянием природных и техногенных воздействий. При этом с учетом того, что на стадии изысканий расчетные параметры деформируемости были определены в основном по геофизическим данным [3], необходимо было подтвердить или опровергнуть правомерность применения использованной ранее корреляционной зависимости между статическими и динамическими показателями деформируемости для богучанских долеритов.

Для решения указанных задач был выполнен комплекс полевых, лабораторных и расчетных исследований, в состав которых входили:

крупномасштабные штамповые испытания деформационных свойств массива;

скважинные прессиометрические опыты по определению деформационных свойств;

геофизические (ультразвуковые и сейсмические) исследования строения и состояния скального массива с определением показателей упругих и деформационных свойств долеритов на участках проведения геомеханических опытов, а также на участках секций 21 и 28 плотины, для которых выполнялись численные расчеты;

лабораторные геомеханические и ультразвуковые измерения на образцах показателей упругих и деформационных свойств долеритов;

численные расчеты деформационных свойств массива на основе данных натуральных наблюдений.

Постановка исследований. Комплексные полевые исследования проводились в трех основных зонах скального массива:

в структурно-тектоническом блоке, сложенном прочными слабдеформируемыми породами (участок наблюдений в левобережном примыкании плотины);

в трещиноватом блоке, также сложенном прочными слабдеформируемыми породами, но с интенсивным развитием мелких разрывов и крупных трещин в основании верховой грани плотины (участок наблюдений в секциях 17 – 18);

в зоне гидротермального изменения долеритов, в которой понижены их деформационные и прочностные свойства (участок наблюдений в секции 24) [3].

Таким образом, три опытных участка, в пределах которых проводились настоящие исследования, располагались в зонах массива с разными инженерно-геологическими условиями, что позволило максимально полно оценить существующую деформационную неоднородность исследуемого скального основания в плане.

В зависимости от степени экзогенных изменений, вызванных процессами выветривания и разгрузки, массив долеритов в основании плотины подразделяется по вертикали (сверху вниз) на следующие зоны: зону выветривания А; зону интен-

* Кроме авторов данной статьи в работе принимали участие Алёшин И. В., Басова А. Б., Зюзин Р. С., Королёв С. И., Кузнецов С. Н., Платонов А. В., Смирнов А. В.

сивной разгрузки Б₁; зону разгрузки Б₂; зону сохранных пород В, практически не затронутую рассматриваемыми процессами [3, 4]. Оптимальное размещение участков работ, выполненные объемы и детальность геомеханических испытаний и геофизических исследований обеспечивали репрезентативность получаемых данных, достаточную для достоверного описания деформационных показателей пород во всех характерных зонах основания плотины.

В секциях 17 – 18 и 24, в нижней дренажной галерее, проведены прессиометрические испытания, штамповые опыты, ультразвуковой каротаж и сейсмическое просвечивание, а в левобережном примыкании плотины — прессиометрические опыты, ультразвуковой каротаж и сейсмическое просвечивание. Выбранные методы исследований позволили изучить упругие и деформационные свойства долеритов на следующих уровнях:

в масштабе, соразмерном крупным блокам скального основания и сооружения $W = n (10^3 - 10^4) \text{ м}^3$, — методами сейсмической томографии и расчётным методом;

в масштабе, соразмерном подземным выработкам $W \approx n (10^{-1} - 1.0) \text{ м}^3$, — методами штампов и сейсмоакустики;

в масштабе, соразмерном диаметру буровых скважин $W = n (10^{-3} - 10^{-2}) \text{ м}^3$, — методами прессиометрии и ультразвукового каротажа.

Численные расчёты деформационных свойств выполнены для двух крупных блоков скального массива в основаниях секции 21 (в трещиноватом блоке) и секции 28 (в зоне гидротермального изменения долеритов). При этом учитывалась этапность возведения плотины, т.е. постепенное возрастание нагрузки на основание, и особенности инженерно-геологического строения массива на выбранных участках.

Прессиометрические опыты выполнены по стандартной методике в скважинах, пробуренных в нижней дренажной галерее, в секциях 18 и 24, и с поверхности, в левобережном примыкании плотины, с отметок 214 – 215 м. Испытания проводились по всей глубине скважин (до 40 м) с шагом 2 м. Опыты выполнялись в два цикла нагрузки-разгрузки, с одинаковой максимальной нагрузкой. Модуль деформации E_{II} определяли по второму циклу нагружения, а модуль идеальной упругости $E_{иу}$ — по соответствующей ветви разгрузки (рис. 1, а).

Крупномасштабные геомеханические испытания проводили в выработках сечением 15 м^2 по методу статического нагружения поверхности водонасыщенного скального массива через жёсткий бетонный штамп (размером $0.7 \times 0.7 \text{ м}^2$). Нагрузку прикладывали с помощью двух гидравлических домкратов к верхней грани штампа, замеры дефор-

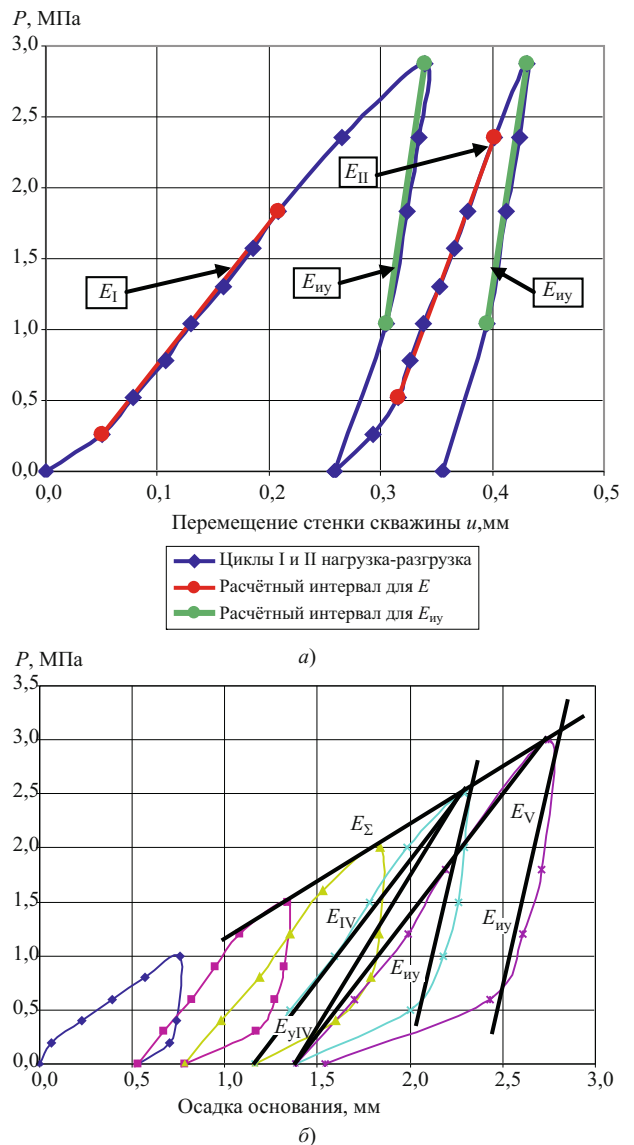


Рис. 1. Примеры графиков деформаций $u = f(P)$ при прессиометрических (а) и штамповых (б) опытах. E_I, E_{II}, \dots, E_Y — модули деформации при разных циклах нагружения, E_Y — модуль упругости, $E_{иу}$ — модуль идеальной упругости, E_{Σ} — модуль суммарной деформации.

маций (осадок) породы, вызванных этой нагрузкой, производили в пяти точках непосредственно под штампом. Точность измерения осадок породы составляла 0.01 мм. Каждое испытание включало пять циклов нагрузки-разгрузки с постепенным увеличением максимальной нормальной нагрузки. В каждом цикле нагрузка ступенями повышалась до заданной максимальной величины и затем снижалась до нуля. Максимальные удельные нагрузки в циклах составляли 1.0; 1.5; 2.0; 2.5 и 3.0 МПа. Значения модулей деформации E определяли по кривой четвёртого – цикла цикла нагружки, а модулей упругости E_Y — по соответствующей ветви разгрузки (рис. 1, б).

Для определения модуля деформации E по данным геофизических исследований, при которых оп-

Результаты деформационных штамповых испытаний

Секция	17				24				
Площадка (штамп)	1	2	3	4	1	2	3	4	5
E , МПа	$\frac{704}{750}$	$\frac{1520}{1575}$	$\frac{1488}{1824}$	$\frac{1402}{1604}$	$\frac{1278}{1265}$	$\frac{956}{1031}$	$\frac{3248}{2341}$	$\frac{1828}{2548}$	$\frac{2033}{1904}$
E_y , МПа	$\frac{865}{936}$	$\frac{2256}{3208}$	$\frac{2292}{3937}$	$\frac{1828}{1925}$	$\frac{1587}{1432}$	$\frac{1429}{1619}$	$\frac{4061}{4559}$	$\frac{2625}{3397}$	$\frac{3358}{2936}$
Средние для секций	$E = 1400$ МПа, $E_y = 2150$ МПа				$E = 1850$ МПа, $E_y = 2700$ МПа				

ределяются скорости продольных V_p и поперечных V_s волн в ультразвуковом или сейсмическом диапазоне частот, необходимо учитывать масштаб опробования массива, степень водонасыщения горных пород и их плотность.

В общем случае реализуется следующая схема перехода от значений скорости распространения упругих волн в среде к значениям модулей упругости и деформации: $V_p (V_s) \rightarrow \mu \rightarrow E_d \rightarrow E$, при которой коэффициент Пуассона μ и динамический модуль упругости вычисляются на основании измеренных скоростей упругих волн по известным формулам теории упругости [1, 2]. Наиболее сложным является определение модуля деформации, для чего используется корреляционная зависимость $\log E = a \log E_{\text{дин}} - b$, в которой коэффициенты a и b подбираются с учётом данных совместных геомеханических и геофизических испытаний при заданном значении вертикальной пригрузки массива [2]. На стадии изысканий для этих целей использовалась зависимость между E и $E_{\text{дин}}$ (см. рис. 10), которая была получена на основании результатов аналогичных исследований на Братской и Усть-Илимской ГЭС и на гидроузле Кырджали [3, 4]. По результатам комплексных работ 2007 – 2008 гг. эта

зависимость была уточнена, и с учетом ее корректировки геофизические данные использованы для оценки деформационных свойств массива долеритов.

Применение независимых разномасштабных методов оценки упругих и деформационных показателей долеритов позволило надёжно определить их значения в характерных участках основания, достоверно оценить изменения показателей, произошедшие за время перерыва в строительных работах, и установить их причины.

Результаты выполненных исследований. Результаты девяти деформационных штамповых опытов представлены в табл. 1. В ней приведены значения модулей деформации E и упругости E_y в приповерхностной обводненной части массива долеритов по четвертому циклу (в числителе) и по пятому циклу (в знаменателе) нагружения.

Низкие значения полученных при этом упругих и деформационных характеристик объясняются интенсивной разгрузкой верхней зоны массива в результате строительных работ. Отметим, что вычисленные значения модуля деформации E удовлетворительно коррелируются с коэффициентом трещинной пустотности (КТП) долеритов.

Таблица 2

Осредненные результаты прессиометрических испытаний

Инженерно-геологический элемент	Структурно-тектонический блок (скважины № 7922, 7923 и 7925)				Зона гидротермального изменения долеритов (скважина № 7921)		
	Зона Б ₁	Зона Б ₂	Зона В	Зоны ПТ	Б ₁ ^г	Б ₂ ^г	ПТ
Модули деформации E , МПа	5070	8800	13500	4020	3780	6200	3170
Количество опытов	14	28	11	8	8	8	4
Коэффициент вариации ν	0,22	0,21	0,21	0,26	0,22	0,15	–
Мощность экзогенных зон, м	3 – 9	15 – 22	–	–	~ 20	–	–

Примечание. ПТ – зоны повышенной трещиноватости пород.

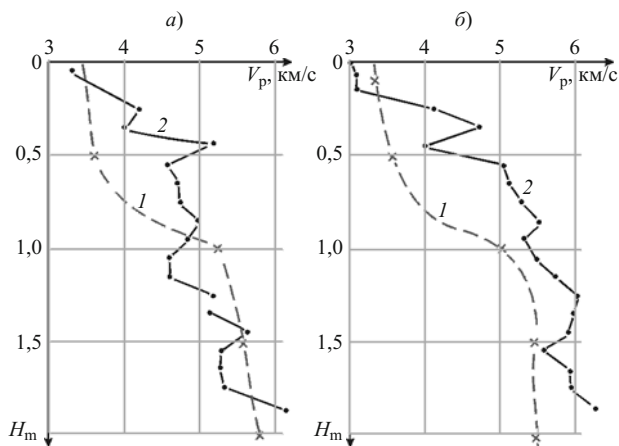


Рис. 2. Обобщенные кривые изменения скоростей продольных волн на участках штамповых опытов в секциях 17 (а) и 24 (б): 1 – данные сейсмических и 2 – ультразвуковых измерений

Прессиометрические испытания выполнены в четырех скважинах (рис. 1). Количество испытаний было достаточным для статистически обоснованной оценки среднего значения модуля деформации и его изменчивости в зонах различной степени сохранности.

В табл. 2 представлены полученные результаты прессиометрических определений модулей деформации для различных инженерно-геологических элементов (зон) массива, выделенных на стадии технического проекта. Здесь же приводятся и оценки мощности этих зон, полученные по данным прессиометрических опытов.

Сопоставление приведенных результатов прессиометрии и штамповых опытов показывает, что в приповерхностной зоне массива на глубинах

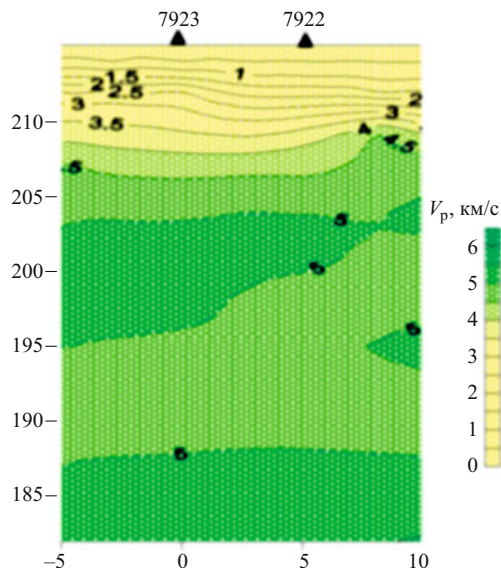


Рис. 3. Разрез в изолиниях V_p целика между скважинами 7922 и 7923 (левобережное примыкание)

0,5 – 1,2 м значения модулей деформации $E_{пр}$, полученные при прессиометрических опытах, в 1,5 – 2,0 раза превышают значения модулей $E_{шт}$, полученные при штамповых опытах. Такое различие может быть объяснено двумя причинами:

разным направлением нагрузок, прикладываемых к анизотропному массиву: в прессиометрических опытах — горизонтальным, а в штамповых — вертикальным. Анизотропия массива объясняется раскрытием большого количества субгоризонтальных трещин в приповерхностной зоне;

различным масштабом опробования массива: объем единичных испытаний при штамповых опы-

Т а б л и ц а 3

Результаты геофизических определений статических и динамических показателей деформируемости долеритов на участках штамповых опытов

Секция	Динамические показатели					Модуль деформации, $E \cdot 10^3$, МПа, для $W = W_{оп}$	
	Интервал глубин, м	скорости продольных волн, км/с			коэффициент Пуассона, μ		модуль упругости, $E_d \cdot 10^3$, МПа, для $W = W_{оп}$
		$V_{узк}^{вод}$	$V_{оп}^{вод}$	$V_{оп}^{сух}$			
17	0 – 0,4	3,65	3,32	2,30	0,26	12,70	
	0,4 – 0,8	4,60	4,19	3,05		22,35	
	0,8 – 1,2	4,90	4,46	3,30		26,15	
24	0 – 0,4	3,20	2,91	2,05	0,29	9,40	
	0,4 – 0,8	4,50	4,10	2,95		19,45	
	0,8 – 1,1	5,10	4,64	3,45		26,60	

Примечания: 1. $V_{оп}$ — значения скорости продольных волн для блоков, соизмеримых с масштабом статических опытов.

2. Значения $V_p^{сух}$ в естественно-влажном состоянии определены по соотношению, скорректированному с учётом данных измерений 2008 г.

тах $n \cdot 0,1 \text{ м}^3$, при pressiометрических $n \cdot 0,01 \text{ м}^3$. Кроме того, при штамповых испытаниях в область опробования попадают более крупные нарушения.

По данным геофизических исследований на участках штамповых опытов в секциях 17 и 24 установлено наличие приповерхностного ослабленного слоя мощностью около 1,0 м со скоростью продольных волн ультразвукового диапазона частот $V_p^{\text{узк}} = 2,50 - 3,60 \text{ км/с}$, под которым залегают высокоскоростные сохранные долериты с $V_p^{\text{узк}} \geq 5,50 \text{ км/с}$ со слабой скоростной дифферен-

циацией (рис. 2). Результаты определения показателей упругих и деформационных свойств пород на указанных участках по геофизическим данным приведены в табл. 3. Судя по этим материалам, можно допустить, что при штамповых опытах были определены деформационные свойства долеритов в указанном приповерхностном ослабленном слое.

В левобережном примыкании, в целике между скважинами 7922 и 7923 также выделен приповерхностный ослабленный слой, мощность которого достигает 5,0 м, а скорости продольных сейсмиче-

Т а б л и ц а 4

Результаты определения показателей упругих и деформационных свойств долеритов по данным pressiометрических испытаний и ультразвукового каротажа скважин (характерный масштаб измерений $W = n (10^{-3} - 10^{-2}) \text{ м}^3$)

Участок исследований			Мощность ослабленной * зоны, см	Упругие показатели по геофизическим данным				Деформационные показатели. Модуль деформации $E_{II} \cdot 10^3$, МПа		
секция	скважина	глубина, м		в массиве		в ослабленной зоне		по данным pressiометрии при $P = 3,0 \text{ МПа}$	по геофизическим данным	
			скорость продольных волн V_p , км/с	динамический модуль упругости $E_d \cdot 10^3$, МПа	скорость продольных волн V_p , км/с	динамический модуль упругости $E_d \cdot 10^3$, МПа	в неизменном массиве		в ослабленной зоне	
24	7921	7,0	5,9	5,48	66,0	3,45	26,4	4,4	24,0	6,1
		11,0	6,0	5,80	71,6	2,85	16,8	5,1	26,9	3,1
		15,0	6,6	4,94	53,5	3,75	29,7	2,8	17,5	7,3
		23,0	6,1	5,71	67,2	3,21	22,9	4,9	24,6	4,9
		27,0	6,0	5,88	75,3	3,25	23,6	5,9	29,2	5,2
		35,0	6,7	6,15	84,3	3,52	26,6	6,2	34,6	6,2
18	7925	9,0	6,9	6,42	94,1	3,37	24,0	4,3	26,6	5,3
		13,0	7,5	6,45	122,2	3,18	20,8	4,5	34,6	4,3
		23,0	7,3	6,10	91,5	2,91	17,9	8,7	32,0	3,4
		27,0	6,7	5,74	81,0	3,28	23,1	5,1	37,4	5,0
		33,0	5,0	5,84	83,8	3,51	26,8	3,0	31,7	6,2
		35,0	5,7	5,77	81,8	3,00	18,5	6,6	34,6	3,6
- 1	7922	9,0	6,2	5,71	70,7	3,80	32,2	8,1	40,8	8,2
		14,0	6,8	6,15	84,3	3,78	32,1	8,2	60,3	8,2
		20,0	6,4	6,06	80,0	3,68	30,0	8,7	39,1	7,4
		26,0	6,8	6,25	88,8	3,67	29,4	5,1	32,6	7,2
		30,0	6,6	5,97	79,5	3,74	30,3	3,0	34,3	7,5
		38,0	7,5	6,15	84,3	3,85	32,4	6,6	33,1	8,3
Среднее значение								5,6	34,1	5,8

* Ослабленная зона около ствола скважины.

ских волн V_p^c в нем с глубиной постепенно возрастают от 0,5 – 1,0 до 2,5 – 3,0 км/с. Ниже в слабо нагруженном скальном массиве скорость V_p^c постепенно увеличивается от 4,0 до 5,2 – 5,5 км/с (рис. 3).

По данным УЗК на этом же участке скорости продольных волн в интервале глубин 5 – 13 м также постепенно увеличиваются с 5,0 – 5,5 до 6,0 – 6,2 км/с. Ниже почти по всей длине скважин скорость $V_p^{УЗК}$ более 6,0 км/с, исключением являются интервалы пониженных значений скоростей на глубинах 15 – 16 и 31 – 33 м.

Анализ данных ультразвукового каротажа всех изученных скважин свидетельствует о наличии около их стволов зон разгрузки (ослабленных зон), мощность которых достигает 5 – 7 см. Скорость продольных ультразвуковых волн в ослабленных

зонах $V_{p0}^{УЗК}$ варьирует от 2,90 до 3,80 км/с, что в среднем в 2 раза ниже, чем в неизменной буренной части массива (табл. 4). Очевидно, что выявленные ослабленные зоны должны существенно влиять на результаты прессиометрических опытов.

На опытных участках зафиксировано значительное различие скоростей ультразвукового $V_p^{УЗК}$ и сейсмического V_p^c диапазона частот. Установлено, что значениям $V_p^c = 4,20 – 4,40$ км/с соответствуют $V_p^{УЗК} = 5,30 – 5,50$ км/с. В более высокоскоростных разностях долеритов различие скоростей меньше: скорости сейсмических волн $V_p^c = 5,25$ км/с соответствует скорость ультразвуковых волн $V_p^{УЗК} = 5,70 – 5,90$ км/с. Эти экспериментальные данные удовлетворительно ложатся на аналогич-

Т а б л и ц а 5

Сравнение результатов определения модулей деформации для различных структурных зон массива в основаниях секций 21 и 28 геофизическим и расчетным методами

Инженерно-геологическая зона	Участок измерений	Результаты геофизических измерений						E, МПа, по данным численных расчетов	E _{расч} /E _{геофиз}	
		V _p , км/с	E _д , МПа	E при P = 1 МПа		E при P = 3 МПа			E _{расч} /E _{II}	E _{расч} /E _Σ
				E _{II} , МПа	E _Σ , МПа	E _{II} , МПа	E _Σ , МПа			
З ₁ ^т	Секция 21, верхняя грань	2,65	12 500	1900	950	2000	1000	2000	1,0	2,0
	Секция 28, средняя часть	3,45	25 500	6350	3800	5800	3300	2000	0,34	0,61
	Средние значения			4125	2375	3900	2150	2000	0,51	0,93
З ₂ ^т	Секция 21, верхняя грань	4,25	36 000	11 250	9700	7900	5900	5000	0,63	0,85
	Секция 28, средняя часть	3,50	27 000	6550	5950	3950	3400	5000	1,27	1,47
	Средние значения			8900	7825	5675	4650	5000	0,88	1,08
Б ₁	Секция 21, низовая грань	4,35	39 000	12 850	10 950	8600	6750	5000	0,58	0,74
Б ₂	Секция 21, низовая грань	4,80	47 500	17 900	14 700	12 550	9400	10 000	0,80	1,06
	Секция 28, верховая грань	4,55	44 000	17 600	14 400	12 300	9250	15 000	1,22	1,62
	Средние значения			17 750	14 575	12 425	9325	12 500	1,01	1,34
В	Секция 21, низовая грань	5,35	61 000	27 200	21 350	20 350	14 350	15 000	0,74	1,05
	Секция 28, верховая грань	5,35	61 000	27 200	21 350	20 350	14 350	23 000	1,13	1,60
	Средние значения			27 200	21 350	20 350	14 350	19 000	0,93	1,32

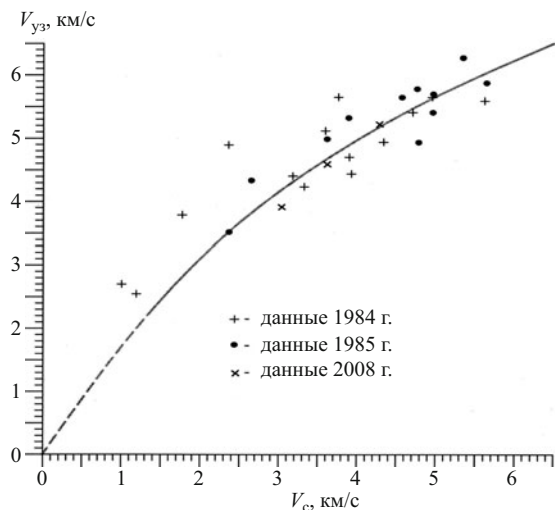


Рис. 4. Зависимость между скоростями продольных волн в сейсмическом (V_c) и ультразвуковом (V_{y3}) диапазонах частот. $V_{y3} = f(V_c)$

ный график связи $V_p^{узк} = f(V_p^c)$, полученный на стадии изысканий (рис. 4).

Для определения модуля деформации крупных блоков массива по данным ультразвуковых исследований была реализована отработанная ранее схема: $V_{p\text{вод}} \rightarrow V_{p\text{сейсм}}^{\text{вод}} \rightarrow V_{p\text{сейсм}}^{\text{сух}} \rightarrow E$. При ее реализации использовались корреляционные соотношения $V_p^c = f(V_p^{узк})$; $V_p^{\text{сух}} = f(V_p^{\text{вод}})$; $E = f(V_p)$ [2]. Отметим, что полученная при изысканиях зависимость $V_p^{\text{вод}} = f(V_p^{\text{сух}})$ по результатам измерений на воздушно-сухих и водонасыщенных образцах, проведенных в рамках настоящей работы, была существенно уточнена (рис. 5). Также были внесены некоторые коррективы в зависимости между модулями E_d и E , которые соответственно повлияли и на соотношение $E = f(V_p)$. По изложенной выше схеме для всех изученных участков массива определены средние значения модулей $E_{\text{дин}}$ и E для различных интервалов глубин, эти данные приведены в табл. 3 – 5.

Результаты оценки деформационных свойств численными методами. Независимым от рассмотренных выше методов является способ оценки деформационных свойств основания плотины посредством численных расчетов НДС массива, нагружаемого сооружением, базирующийся на результатах инструментальных замеров возникающих при этом деформаций. Подобные расчеты с использованием специализированной компьютерной программы “Z_Soil” (Швейцария) выполнены для массива долеритов на участках секций 21 и 28 бетонной плотины, поскольку здесь установлено наибольшее количество измерительных приборов (деформометров).

Согласно имеющимся инженерно-геологическим материалам, основание секции 28 полностью

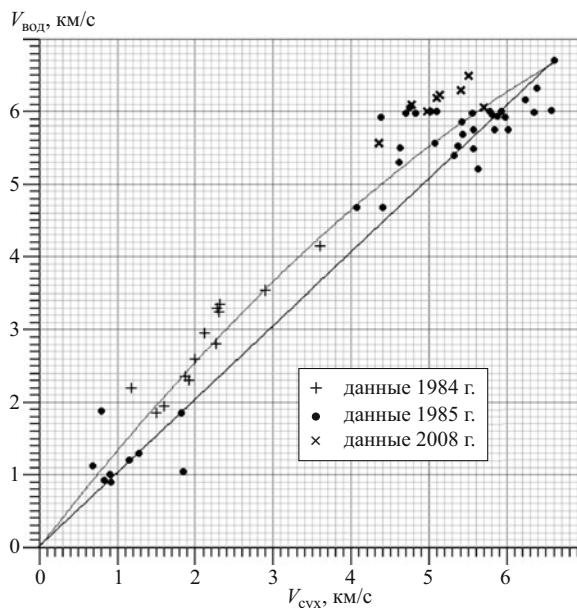


Рис. 5. Зависимость между скоростями продольных волн в долеритах, находящихся в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии $V_{\text{вод}} = f(V_{\text{сух}})$

расположено в пределах так называемой зоны гидротермального изменения долеритов с пониженными деформационными и прочностными свойствами. Основание секции 21 более неоднородно: со стороны верховой грани плотины здесь залегают те же ослабленные долериты, что и на участке секции 28, а в средней части секции и со стороны ее низовой грани — более сохранные породы.

С учетом указанных особенностей строения массива были выбраны исходные базовые модели деформационных свойств этих участков.

На рис. 6 дан разрез верхней части основания в секции 21, а на рис. 7 — расчетные этапы бетонирования этой секции и расположение КИА: деформометров ПЛПС (с базами измерений 2; 5 и 15 м) и геодезических марок МП.

Расчёты выполнялись с большим числом итераций, что позволило улучшить сходимость результатов расчетов с данными натурных наблюдений за период с начала укладки бетона в секции (1983 – 1985 гг.) до конца 2007 г. Результаты вычислений показаны на рис. 8, где сопоставлены расчетные осадки и данные наблюдений по отдельным деформометрам и геодезическим маркам. Видно, что уточненные деформационные модели значительно лучше описывают характер деформирования скального основания, чем базовые модели, разработанные на стадии технического проекта. Уточненные модели отличаются от базовых тем, что в них введён маломощный приконтактный слой (E_1^k) ослабленных долеритов с пониженными деформационными свойствами, который был выявлен по данным геофизических исследований. Расчеты по

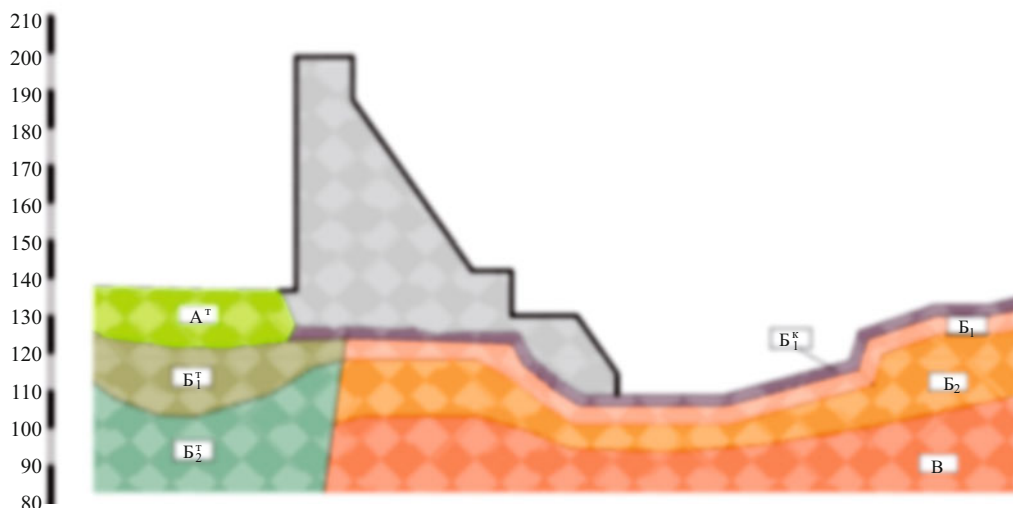


Рис. 6. Фрагмент расчётной модели основания секции 21 (символами обозначены моделируемые ИГЭ)

казали, что рассматриваемый приконтактный слой пород имеет тенденцию к уплотнению и повышению модуля деформации под влиянием веса укладываемого бетона. Так, на участке секции 28 модуль деформации верхней толщи 2 м увеличился со 150 – 200 МПа в начале бетонирования секции до 1000 – 1500 МПа в конце 2007 г., т.е. в 6 – 7 раз. Что касается остальных выделенных в массиве инженерно-геологических зон, то их модули деформации, по сравнению с проектными (базовыми) значениями, по результатам расчётов рекомендуется понизить на 15 – 35 %. Было показано также, что влияние техногенной нагрузки ощущается под секциями на глубинах до 250 м, это примерно соответствует трем ширинам подошвы этих секций.

Обсуждение и анализ результатов комплексных исследований деформационных свойств пород основания плотины Богучанской ГЭС. Приведенные выше результаты определения модуля деформаций массива долеритов в основании бетонной плотины Богучанской ГЭС свидетельствуют о значительном различии данных, получаемых разными методами. Это предопределяет необходимость установления причин выявленных различий и выбор способа определения значений показателей деформируемости, отвечающих условиям поставленной задачи — надежному расчету НДС системы “плотина — основание”.

Основываясь на имеющихся публикациях по данной проблеме и на собственном опыте, можно считать, что наиболее значимыми факторами, влияющими на расхождение в величинах модулей деформации скальных оснований плотин, определяемых различными методами, являются:

- различная масштабность исследований;
- различная ориентировка, величина и длительность действующей нагрузки;

несоответствие инженерно-геологических условий участков (мест) исследований;

использование недостоверных корреляционных зависимостей между статическими и динамическими показателями деформируемости.

Учитывая первые три из указанных факторов, следует признать, что наиболее достоверными данными для оценки НДС системы “плотина — основание” должны являться результаты обратных расчетов, базирующиеся на материалах непосредственных измерений деформаций основания в тече-

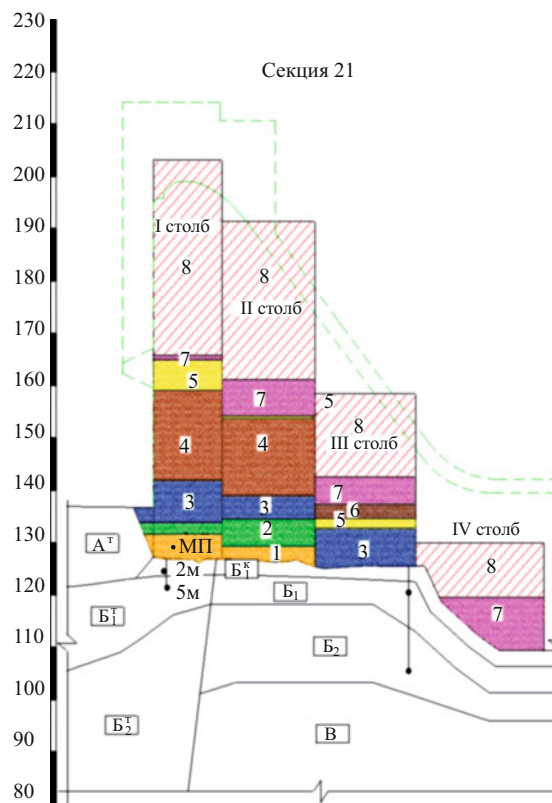


Рис. 7. Расчётные этапы бетонирования секции 21 плотины и расположение мест измерений. Заштрихован объём бетона, который предстоит дополнительно уложить.

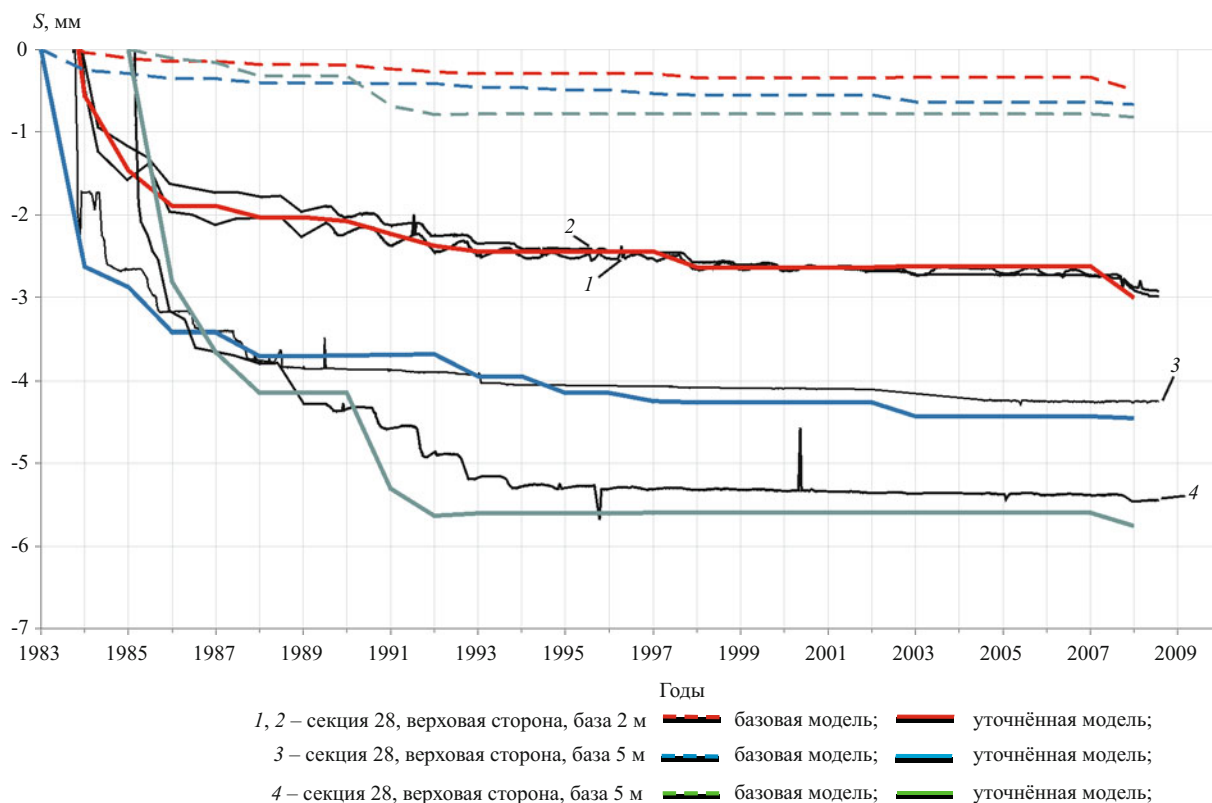


Рис. 8. Сравнение результатов расчетов и измерений относительных осадок основания по некоторым приборам

ние длительного времени. В качестве таких расчётов в настоящей работе используются численные исследования методом конечных элементов. Поскольку подобные расчёты характеризуют обобщенные свойства крупных блоков массива, то напрямую с ними могут быть сопоставлены лишь результаты равномасштабных им геофизических (сейсмических) измерений. Однако при сейсмических исследованиях определяются динамические параметры упругости — скорости упругих волн, по которым вычисляются динамический модуль упругости и коэффициент Пуассона. Для оценки соответствующих этим параметрам величин модуля деформации необходимы надежные корреляционные зависимости. Уточнение подобной зависимости, пригодной для данного объекта, и являлось одной из основных задач настоящих исследований.

Для получения корреляционных зависимостей между статическими и динамическими показателями деформируемости горных пород существует два принципиально разных способа: прямой и косвенной корреляции [2]. В наших исследованиях условия прямого сопоставления выполнялись лишь при штамповых опытах, однако при этом объем сопоставимых данных был слишком мал для установления искомой зависимости. Поэтому при решении поставленной задачи был применен метод косвенной корреляции, для чего использовались данные выполненных прессиометрических измерений.

По полученным при этих исследованиях графикам деформаций способом, изложенным в работе [2], для каждого опыта определены значения модулей идеальной упругости $E_{иу}$, которые затем сопоставлялись с вычисленными значениями модуля деформации E . Пример определения модулей идеальной упругости пород по результатам прессиометрического опыта в скважине 7925 на глубине 7.0 м приведен на рис. 1.

Далее, по совокупности всех выполненных определений модулей $E_{иу}$ и E_{II} (модуль деформации по второму циклу нагружения) построен график связи указанных величин, приведённый на рис. 9. Полученные при этом средние значения $E_{иу}$, соответствующие определённым значениям E_{II} , по соотношению $\log E_d = 0,876 \log E_{иу} + 0,76$, которое установлено на основании уравнения $E_{иу} = 0,1333 E_d^{1,141}$ из работы [2] (в указанных уравнениях модули имеют размерность 10^2 КПа), пересчитаны в значения динамических модулей упругости E_d . По полученным парным значениям E_d и E с учётом данных штамповых опытов определена корреляционная зависимость между статическими и динамическими показателями деформируемости (рис. 10), описываемая корреляционным уравнением $\log E_{II} = 1,655 \log E_d - 3,85$ (3.1). Это уравнение достаточно хорошо согласуется с обобщённой зависимостью между E и E_d для изверженных пород, соответствующей максимальной нагрузке $P \approx$

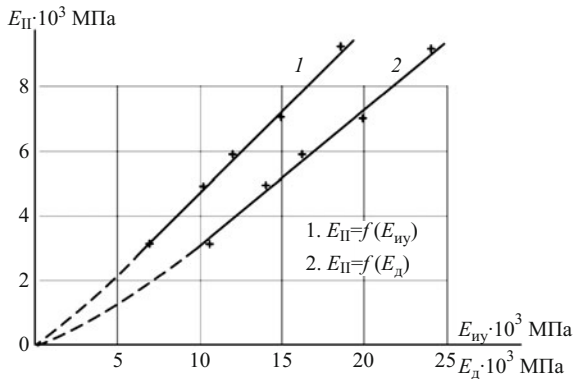


Рис. 9. Связь E_{II} , E_{ny} и E_d по данным прессиометрии

1,5 МПа: $\log E_{II} = 1,620 \log E_d - 3,90$ (E соответствует модулю деформации по второму циклу нагружения).

Сопоставление полученной корреляционной зависимости между E_d и E с аналогичной зависимостью, используемой на стадии разработки проекта [3, 4] (рис. 10), свидетельствует, что ранее принятое соотношение между этими значениями несколько занижает значения модулей деформации E , соответствующих второму циклу нагружения. Вычисляемые по этому соотношению модули по своей величине достаточно близки к значениям суммарного модуля деформации, определяемым по кривой 3 рис. 10, построенной на основании уточненной корреляционной зависимости.

На основании изложенного, данные сейсмических и ультразвуковых исследований, выполненных на участках секций 21 и 28, приведенные к масштабу блоков, деформируемых под секциями как единое целое, пересчитаны в соответствующие значения модулей деформации. При этом определялись как величины модуля деформации по второму циклу нагружения при $P = 1.0$ и $P = 3.0$ МПа, так и величины суммарного модуля деформации E_{Σ} , характеризующего развитие деформации при длительном нагружении [2] при тех же (указанных выше) значениях P .

Полученные при этом значения модулей E и E_{Σ} , приведены в табл. 5. В этой же таблице приведены значения модулей деформации, установленные в результате численных расчетов. Сопоставление этих данных свидетельствует, что наилучшее соответствие между сопоставляемыми расчётными и геофизическими данными наблюдается при определении по геофизическим данным модуля общей деформации E_{Σ} . Такие оценки соответствуют современному состоянию основания при $P = 1$ МПа и прогнозируемой нагрузке после завершения строительства и заполнения водохранилища при $P = 3$ МПа.

Из рассмотрения полученных результатов можно сделать два основных вывода:



Рис. 10. Графики связи величин E и E_d для пород участка Богучанской ГЭС: 1 – график связи из работы [1]; 2 – график связи величин E_{II} и E_d по данным выполненных работ; 3 – график связи величин E_{Σ} и E_d , построенный на основании графика 2

наблюдается удовлетворительное соответствие оценок деформационных свойств, сделанных двумя сравниваемыми независимыми методами;

с учётом длительного действия нагрузок на массив и их роста во времени, вызывающего определённый рост деформаций, для описания деформационных свойств массива, очевидно, правильнее пользоваться модулем суммарной деформации E_{Σ} .

Последнее подтверждает правомочность использования предложенного ранее графика связи значений модуля деформации и динамического модуля упругости для пород основания Богучанской ГЭС, а также обоснованность принятых ранее расчётных показателей деформируемости для изучаемого массива.

С учетом изложенных выводов по данным УЗК изученных скважин определены соответствующие модули деформаций для пород в ослабленной зоне и в неизменной буровыми работами части массива. Поскольку ультразвуковые исследования по своему масштабу близки к прессиометрическим, то в табл. 4 дано сопоставление полученных результатов оценки деформационных свойств массива этими методами. По данным этой таблицы во всех скважинах наблюдается существенное (в среднем в 6 раз) расхождение между значениями $E_{пр}$ и модулями деформации, определенными ультразвуковым методом для неизменной части массива, и практическое равенство сопоставляемых модулей, если принимать данные ультразвуковых измерений, соответствующие ослабленной зоне. Учитывая изложенное, следует признать, что при принятой технологии бурения и используемой конструкции (размерах) прессиометра на получаемые этим методом результаты существенное влияние оказывает ослабленная (разгруженная и частично разрушенная при бурении) зона в окрестности скважин. При этом данные прессиометрии, отображая свойства пород в масштабе $W \approx n \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$, для неоднородных

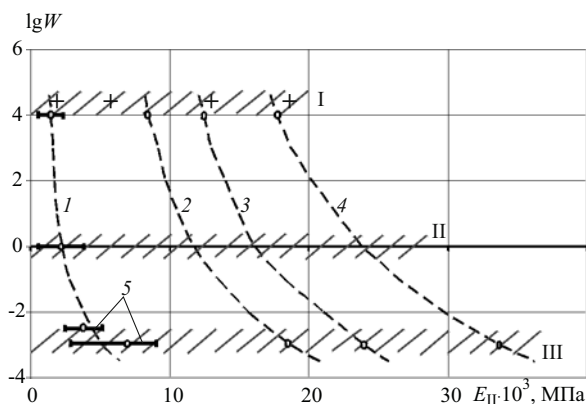


Рис. 11. Изменение средних величин модуля деформации E_{II} для различных инженерно-геологических зон массива долеритов в основании плотины Богучанской ГЭС в зависимости от масштаба W (m^3) единичных определений модуля: I – масштаб сейсмических и расчётных исследований; II – масштаб штамповых опытов; III – масштаб прессиометрических и ультразвуковых исследований. 1, 2, 3, 4 – данные для зоны приповерхностной разгрузки, зон B_1 , B_2 и B соответственно; 5 – разброс экспериментальных значений и средняя величина E ; + – результаты численных расчётов

скальных массивов в связи с проявлением масштабного эффекта могут существенно отличаться от обобщенных показателей деформируемости блоков массива объемом $n \cdot 10^3 m^3$ и более. Проведенные исследования наглядно свидетельствуют о необходимости учета отмеченных выше факторов при интерпретации и обобщении данных прессиометрических исследований.

Выводы

1. Выполненный в 2007 – 2008 гг. комплекс полевых и лабораторных исследований свойств долеритов позволил определить современные характеристики скального основания бетонной плотины Богучанской ГЭС, скорректировать проектные показатели деформационных и упругих свойств массива на разных его глубинах и для различных инженерно-геологических зон, и уточнить деформационную модель основания.

2. По результатам совместных геофизических и геомеханических исследований уточнена корреляционная зависимость между динамическими модулями упругости, вычисляемыми по данным геофизических измерений, и модулями деформации, определяемыми при геомеханических испытаниях. Показано, что принятый ранее на стадии технического проекта график подобной зависимости достаточно хорошо совпадает с установленным при выполненных работах графиком связи между E_d и модулем суммарной или общей деформации E_{Σ} . На основании уточненных корреляционных соотношений по комплексу полученных данных определены модули деформации исследуемых пород на разных масштабных уровнях. Результаты выполненных ис-

следований подтверждают наличие значительного масштабного эффекта для модуля деформации различных зон массива долеритов в основании плотины.

3. Вычисленные по результатам сейсмических исследований значения суммарного модуля деформации удовлетворительно согласуются с соответствующими значениями модулей деформации, установленными в результате численных расчётов, базирующихся на данных многолетних натуральных наблюдений. Это свидетельствует о необходимости при построении деформационных моделей, используемых для оценки деформаций, развивающихся длительное время, использовать величины общего или суммарного модуля деформации.

4. Полевыми и расчетными исследованиями подтверждено наличие в приповерхностной зоне основания русловой части плотины маломощной (1 – 2 м) зоны ослабленных долеритов с низкими деформационными свойствами, которая ранее не учитывалась. Модули деформации этой зоны находятся в пределах 700 – 2000 МПа. Численные расчеты показали, что деформационные свойства пород в этой зоне повышаются по мере возведения плотины (при возрастании пригрузки).

Учитывая, что свойства приконтактной зоны скального основания имеют первостепенное значение для надежности бетонной плотины, в процессе ее строительства рекомендуется вести расчётный мониторинг за деформационными характеристиками этой зоны, используя для этого данные натуральных наблюдений за осадками сооружения и геофизические исследования.

5. На основании результатов выполненных исследований рекомендуется дополнить деформационную модель основания тектоническими зонами повышенной трещиноватости, а также скорректировать в сторону снижения на 15 – 30 % принятые ранее расчетные модули деформации основных инженерно-геологических зон.

6. Выполненные численные расчеты основания секций 21 и 28 плотины свидетельствуют о значительных размерах области взаимодействия сооружения с основанием, достигающих 250 м, что составляет примерно три ширины подошвы плотины.

Список литературы

1. *The complete ISRM suggested methods for Rock characterization, testing and monitoring 1974 – 2006* / Editors: R. Ulusay, I. A. Hadson. — Ankara, Turkey, 2007.
2. *Комплексные инженерно-геологические исследования при строительстве гидротехнических сооружений* / Под ред. А. И. Савич, Б. Д. Куянджич. — М.: Недра, 1990.
3. *Смольский П. Я.* Богучанская плотина на р. Ангаре // Геология и плотина. — М.: Энергоиздат. 1992. Т. XII.
4. *Богучанская ГЭС на р. Ангаре: Технический проект. Т. 1. Природные условия. Кн. 3. Инженерно-геологические условия.* — М.: Гидропроект, 2002.

Характерные особенности оголовка эксплуатационного водосброса Бурейского гидроузла и некоторые результаты его лабораторных и натуральных исследований

Васильев А. В., главный инженер проекта Бурейской ГЭС,
Кокурин С. А., главный специалист (ОАО «Ленгидропроект»),
Козлов А. Б., ведущий научный сотрудник,

Дерюгин Г. К., старший научный сотрудник (ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»)

Рассмотрены характерные особенности оголовка эксплуатационного водосброса Бурейского гидроузла. Приводятся некоторые результаты лабораторных и натуральных исследований. Испытания при пропуске паводка 2009 г. показали, что оголовок и его воздухоподводящая система работают в соответствии с требованиями проекта и результатами его лабораторных исследований.

Ключевые слова: Бурейская ГЭС, оголовок, водосливная плотина, напор, скорости течения, кавитация, подвод воздуха, уступ-аэратор, вакуум, затвор.

Оголовок водосливной плотины Бурейского гидроузла [1] (рис. 1) имеет следующие характерные особенности:

большое различие между напорами на гребне, имеющем отметку 243,0 м, при НПУ = 256,0 м и ФПУ = 263,4 м;

как правило, в соответствии со СНиП [2, п. 5.4.3], при отметке НПУ обеспечивается пропуск расхода основного расчётного случая. Через Бурейский гидроузел при НПУ обеспечивается пропуск расхода с вероятностью превышения $P \approx 5\%$, при этом через восемь пролётов водосброса проходит $9400 \text{ м}^3/\text{с}$. Для пропуска расхода основного расчётного случая с $P = 0,1\%$ необходимо повышение отметки УВБ до 259,5 м;

очертание оголовка принято по координатам Кригера — Офицера на напор при ФПУ, вероятность реализации которого весьма мала. Использовать же водосброс предполагается в основном при отметках УВБ, близких к НПУ;

точки опирания аварийно-ремонтного и основного затворов размещаются ниже гребня оголовка соответственно на 0,19 и 1,31 м и на расстоянии 2,47 и 6,47 м от него. При высоте затвора 14,77 м его верх возвышается над НПУ соответственно на 0,46 м;

режущие ребра отдельных стен размещены практически в створе верховой грани оголовка, не выдвинуты в верхний бьеф, как на Мамаканской, Красноярской, Братской, Зейской и других гидроузлах;

необычным техническим решением (автор — кандидат техн. наук А. А. Исаев) является размещение в пределах короткого оголовка двух уступов-аэраторов, скорости схода с которых не превышают 23 м/с. Обычно аэраторы размещают в створе, где скорости достигают 30 м/с;

очертание поперечного сечения оголовка состоит в основном из плоских поверхностей. Предельно короткой является его криволинейная часть, в пределах которой перепад отметок на участке ниже порога составляет 3,2 м, но и она выполнена полигональной, с длиной плоских участков 1,1 м.

При лабораторном обосновании конструкции оголовка рассматривались следующие основные вопросы:

пропускная способность водосброса при полном и частичных открытиях основного затвора;

обеспечение отрыва потока от нижней грани плотины и аэрации его придонного слоя для защиты плотины от динамического воздействия и кавитационной эрозии, обоснование положения и конструкции аэраторов;

обоснование очертания оголовка с минимальной длиной криволинейных поверхностей;

условия, сопровождающие перелив через затвор, заклиненный на пороге, или на некотором расстоянии от него.

После завершения строительных работ были проведены испытания водосброса, и в частности оголовка; выполнены измерения динамических воздействий на затвор и разрежений за уступами-аэраторами, характеризующих условия работы воздухоотводящей системы. Приведем некоторые результаты лабораторных и натуральных исследований оголовка плотины.

1. Исследованиями на моделях масштабов 1:34,6 и 1:12 установлено, что в случае пропуска расходов при НПУ наиболее эффективно обеспечивается защита нижней грани плотины, когда уступ-аэратор имеет отметку схода 228,8 м (рис. 1). При этом исключается воздействие потока на дно до отметки 190 м, обеспечивается необходимое воздухоподдержание его придонного и пристенного слоёв. Когда уровень воды в водохранилище при-

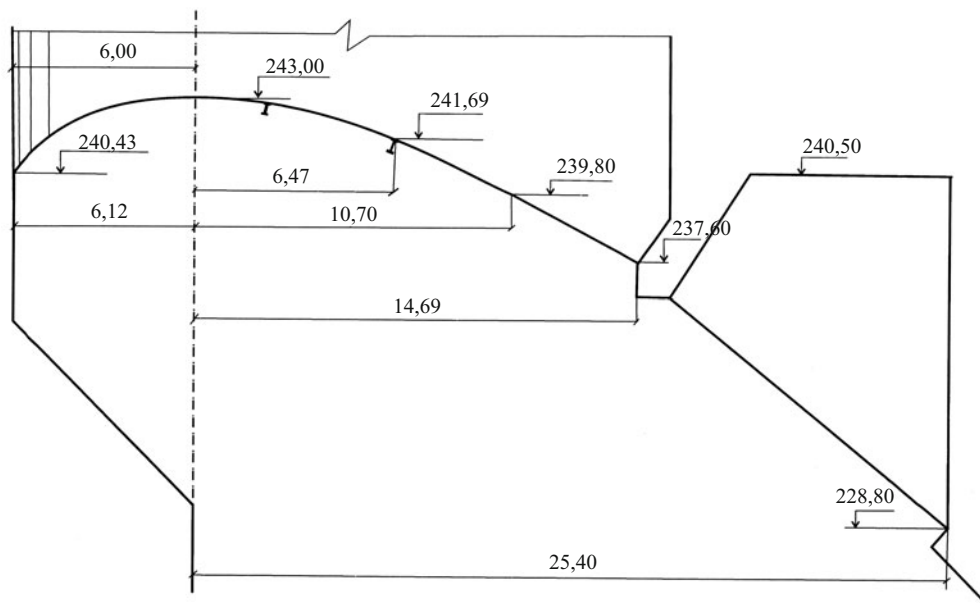


Рис. 1. Схема входного оголовка эксплуатационного водосброса Бурейской ГЭС

ближается к ФПУ, поток за этим аэратором падает на трамплин и оказывается необходимым аналогичное устройство на отметке 237,6 м. Размещение в пределах оголовка двух уступов-аэраторов (рис. 1) позволяет разработать его технологичное очертание, с минимальной длиной криволинейных поверхностей.

Надёжная работа аэраторов в 2009 г. при отметке УВБ 253 – 256 м в течение 40 сут, когда скорости достигали 42 м/с, а удельные расходы — 63 м²/с, подтверждена отсутствием следов кавитационной эрозии за имевшимися отдельными неровностями на водосливной поверхности, в том числе раковинами размерами до 5 × 10 × 50 см на носке-трамплине.

По данным модели масштаба 1:35*, разрежение за аэраторами прогнозировалось равным 3 кПа при удельных расходах $q = 100 \text{ м}^2/\text{с}$. В натурных условиях при $q = 60 \text{ м}^2/\text{с}$ значения вакуумов не превышали 1,5 кПа, что свидетельствует о практически свободном поступлении воздуха к нижней поверхности потока, об удовлетворительном моделировании работы аэраторов.

2. Экспериментальные данные показали, что соотношение полноты напора $H/H_{\text{прф}} = 0,64$, характерное для отметки НПУ, приводит к снижению пропускной способности оголовка лишь на 5 %, в точном соответствии с [3, табл. 11]. Не снизилась пропускная способность при работе соседних пролётов и в связи с относительно высокими (до 5,5 м/с) скоростями обтекания рёбер отдельных

стен, имеющих полуциркульное скругление с радиусом 1,5 м.

Уровенные измерения на посту “Талакан” подтвердили расход 5000 м³/с через гидроузел при пропуске паводка 2009 г., определённый для водосброса по данным модельных исследований.

Когда в соседних пролётах затворы оставались на пороге, на модели масштаба 1:34,6 наблюдалось резкое (на 7 м относительно НПУ) понижение уровня воды непосредственно у стен за скруглением их верховой части со стороны работающего пролёта, что привело к снижению пропускной способности пролёта на 6 – 7 % по сравнению с тем,

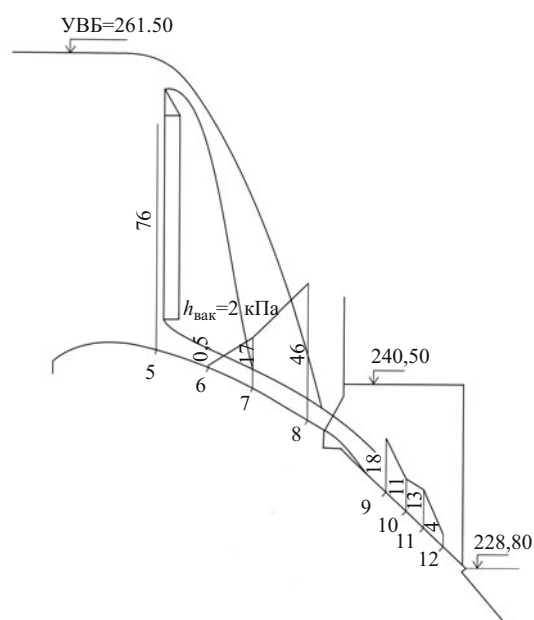


Рис. 2. Распределение осреднённых давлений по оголовку при переливе через основной затвор с открытием его на 2 м, УВБ = 261,5 м

* Модели масштаба 1:34,6 и 1:35 функционировали в различные периоды времени, и с их помощью решали различные задачи.



Рис. 3. Истечение из-под затвора при открытии на 5,6 м, УВБ = 253 м

когда соседние пролёты оставались с полным открытием затворов и НПУ.

Принятое положение верховой части стен относительно входной грани оголовка позволило облегчить их конструкцию за счёт отказа от выдвигания в верхний бьеф или выполнения консоли, что обычно практикуется.

3. По [1 п. 5.4.3] при числе пролётов более шести надлежит рассмотреть возможность пропуска расхода основного расчётного случая при отказе затвора одного из пролётов. При этом возможны следующие случаи:

затвор не удаётся оторвать от порога, через него происходит перелив при напоре над верхним ребром до 3 м и более;

затвор зависает на некотором расстоянии от водосливной поверхности, поток переливается через него и проходит под ним.

Специальный подвод воздуха за затвор не обеспечивается, и можно предполагать, что за ним образуется зона пониженного давления, в связи с чем увеличится нагрузка на затвор, изменится траектория переливающейся струи — до “прилипшей” струи [3, рис. 9] включительно.

На модели масштаба 1:35 рассмотрены случаи перелива через верх затвора (рис. 2) с отметкой

256,46 м при отметках УВБ 257,5; 258,5; 259,5 и 263,4 м, а также случаи перелива через затвор и истечения из-под затвора при его положении над оголовком на расстоянии 1; 2; 3 и 4 м от него.

Определяли положение поверхности переливающейся струи, распределение осреднённых давлений по поверхности оголовка, разрежение за затвором. Опыты показали, что воздух за затвор во всех случаях поступает непосредственно через раздробленную переливающуюся струю или зазор между нею и поверхностью стен. Понижение давления относительно атмосферного у низовой грани затвора не превышало 2,5 кПа. Воздействие в месте падения струи на низовую грань плотины было не более 60 кПа.

4. На моделях масштабов 1:34,6 и 1:12 отмечалось воронкообразование при истечении из-под затвора, была дана качественная оценка повышенной пульсации давления в связи с этим явлением.

На модели масштаба 1:35 образование воронок не было зафиксировано, возможно, в связи с небольшой ёмкостью бака верхнего бьефа. Касание ножом затвора поверхности потока вызывало резкое повышение уровня верхнего бьефа — до соответствующего истечению из-под затвора при том же расходе воды. Так, например, затвор касался

верхней поверхности потока при отметке УВБ = 248,8 м, когда его открытие составляло 3 м, и уровни на модели резко повышались до отметки 254 м. В случае открытия на 6 и 8,7 м отметки УВБ изменялись соответственно в пределах 253 – 257 и 257 – 260,5 м. Резко происходил и обратный переход (при небольшом снижении отметки УВБ относительно указанных выше) к свободному истечению. В натурных условиях такие переходы невозможны, но образование вихревых воронок в указанных диапазонах изменения отметок УВБ не исключалось. В случае истечения из-под затвора наблюдалась сильная вибрация, вызвавшая повреждение пазов на временном водосбросном сооружении Колымской ГЭС [4].

В связи с отмеченными явлениями, можно было ожидать повышенных динамических нагрузок и на затворы поверхностного водосброса Бурейского гидроузла, изучение которых на модели затруднено необходимостью воспроизведения жёсткости затвора, условий его опирания. Отмеченное являлось основанием для проведения измерений вибрации затвора при испытаниях рассматриваемого сооружения в 2008 – 2009 гг.

Датчики вибрации были установлены на нижних ригелях затвора на расстоянии 0,9; 1,9 и 3,6 м от его ножа, вблизи оси пролёта, и ориентированы в направлении течения. Измерения выполнялись в диапазоне уровня верхнего бьефа, когда можно было ожидать образование воронок:

при открытии затвора 0,5; 1; 2; 3 м и отметке УВБ = 248 м;

при открытии затвора 5,6; 6 м и отметке УВБ = 253 м.

Во всём диапазоне открытий затворов и отметок УВБ образование воронок не выявлено (см., например, режим истечения на рис. 3).

Амплитуда вибрации затвора при УВБ = 248 м не превосходила 40 мкм, при УВБ = 253 м – 0,2 мм. Несмотря на существенный рост вибрации с повышением отметок УВБ и открытия затвора, её уро-

вень незначителен и не может вызвать каких-либо трудностей при эксплуатации сооружения.

Выводы

1. Размещение двух уступов-аэраторов в пределах входного оголовка позволило снизить динамическое воздействие потока на низовую грань водосливной плотины и обеспечить её защиту от кавитационной эрозии. Аэратор с отметкой схода 237,6 м предназначен для работы при повышении отметок УВБ до близких к ФПУ, с отметкой схода 228,80 м, для работы в случае пропуска расходов, когда отметки УВБ близки к НПУ.

2. Разработано и осуществлено технологичное очертание оголовка, имеющее минимальную длину криволинейных поверхностей.

3. Отказ от выдвигания отдельных стен в верхнем бьефе и размещение верховой части отдельных стен, имеющей полуциркульное скругление боковых рёбер, в створе начала оголовка не привели к заметному снижению пропускной способности сооружения в случае работы соседних пролётов.

4. В случае аварийного перелива через затвор, который не удалось оторвать от порога или который завис на некотором расстоянии от него, во всём диапазоне возможных отметок УВБ понижение давления под струёй не превысит 2,5 кПа, а в месте её падения на низовую грань плотины — 60 кПа.

5. Переход к истечению из-под затвора не сопровождается образованием вихревых воронок и повышенным уровнем динамических воздействий.

Список литературы

1. Васильев А. В., Дерюгин Г. К., Петров О. А., Прокофьев В. А. Лабораторные исследования гидравлики нижнего бьефа при работе эксплуатационного водосброса Бурейского гидроузла // Гидротехническое строительство. 2008. № 6.
2. СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения / Госстрой России. М., 2004.
3. Рекомендации по гидравлическому расчёту водосливов. Ч. 1: Прямые водосливы: П. 18 – 74 / ВНИИГ. Л., 1974.
4. Пехтин В. А., Серов А. А. На порогах Колымы. СПб., 2003.

Вероятностное моделирование коррозионных процессов стальных конструкций морских гидротехнических сооружений

Беккер А. Т., доктор техн. наук (ДВГТУ, Владивосток),

Любимов В. С., кандидат техн. наук (ДальНИИС РААСН, Владивосток),

Коваленко Р. Г., инженер (ДВГТУ, Владивосток),

Александров А. В., инженер (ОАО “Институт Гидропроект”)

Учитывая, что коррозия протекает как случайный процесс во времени, авторы статьи применяют вероятностный подход. В качестве примера рассмотрена коррозия металлического шпунта, используемого в лицевой стенке больверка. Стохастическая модель построена на базе модифицированной функции распределения Вейбулла с учетом параметров коррозионного процесса как функция времени. Одним из факторов, определяющих скорость коррозии шпунта, является принадлежностью участка стенки к зоне переменного уровня воды или подводной зоне. Другим фактором является вид коррозии — сплошной или локальный. Точность предсказания коррозии в подводной зоне выше, чем в зоне переменного уровня воды.

Ключевые слова: стальные конструкции морских гидротехнических сооружений, коррозия, вероятностная модель коррозионного износа, подводная зона, зона переменного уровня, сплошной процесс, локальный процесс.

Федеральная программа “Модернизация транспортной системы России” предусматривает рост объема перевалки грузов в портах на 82 %. Значительную долю портовых сооружений составляют причальные сооружения. В настоящее время в России более половины причальных сооружений имеют значительный износ, что, в свою очередь, снижает их надежность и повышает опасность возникновения аварийных ситуаций. В целях повышения эксплуатационной надежности портовых сооружений необходимо совершенствование методов оценки, прогнозирования и контроля их технического состояния. Федеральный закон “О безопасности гидротехнических сооружений” предполагает повышение уровня научного обеспечения обследования ГТС, используя современные методы расчета прочности, безопасности, устойчивости и долговечности сооружений, а также внедряя информационные технологии для анализа данных и моделирования.

В качестве исследуемого объекта авторы выбрали причальное сооружение в виде тонкой стенки — больверк, широко распространенный в России (около 65 %). Для причальных сооружений в виде тонкой стенки наиболее уязвимым элементом является стенка из стального шпунта. Прогнозная вероятностная модель коррозионного износа учитывает наиболее общие особенности морской коррозии стальных конструкций, что позволяет адаптировать модель для более широкого спектра сооружений, в том числе морских нефтегазовых платформ, трубопроводов и т.д.

Коррозионный износ может оказывать значительное влияние на долговечность конструктивных элементов морских гидротехнических сооружений (МГТС). Коррозия наносит огромный экономический ущерб. По оценке некоторых исследователей в России из-за коррозии ежегодно теряется до 12 % металлофонда (что соответствует 30 % ежегодно производимого металла). В США ежегодные потери составляют около 6 % национального дохода. Косвенный ущерб от коррозии также может быть довольно значительным. Он выражается в снижении надежности сооружений, в повышении расходов на ремонт, в увеличении времени простоя вследствие отказов, затрат на устранение последствий аварий и т.д.

Коррозионные процессы очень разнообразны по своей природе. Коррозионные повреждения отличаются по виду и физико-химическим процессам. Кроме того, коррозия не протекает изолированно, а сопровождается параллельными деградационными процессами в материалах. Коррозия — это случайный процесс, зависящий от времени. В связи с этим авторы рассмотрели возможность применения вероятностной модели для прогнозирования долговечности стальных конструкций МГТС на примере коррозии шпунта с учетом динамики и переменной весомости факторов, влияющих на коррозионные процессы. Данные по обследованиям были предоставлены ООО “НПО “Гидротекс” (Владивосток).

Многие исследования подтверждают, что процесс коррозии стали во многих случаях хорошо описывается нормальным законом [1], в то же время другие наблюдения говорят о том, что законы распределения коррозионных повреждений бывают более сложными [2]. Было замечено, что подобрать теоретический закон распределения коррозионных повреждений достаточно сложно, даже если рассматриваются соору-

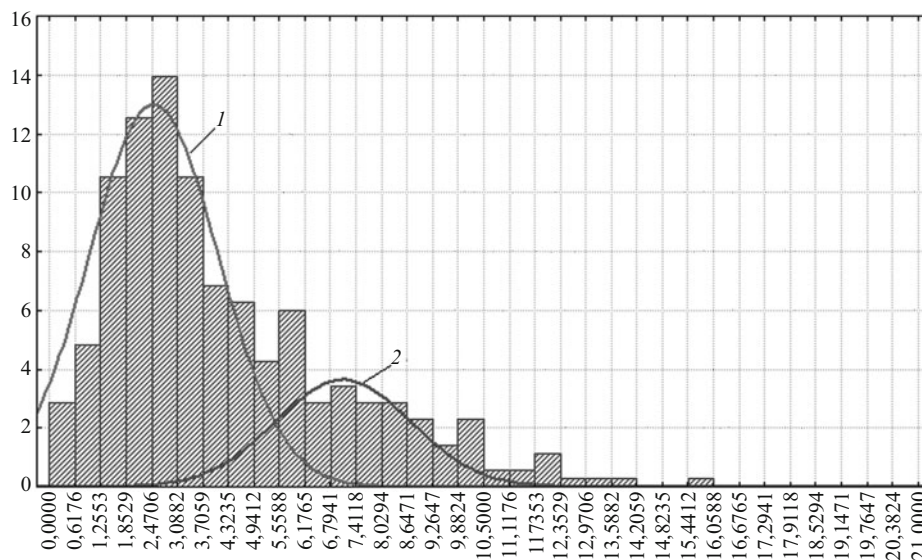


Рис. 1. Потерянная толщина шпунта (зона переменного уровня, 20 лет)

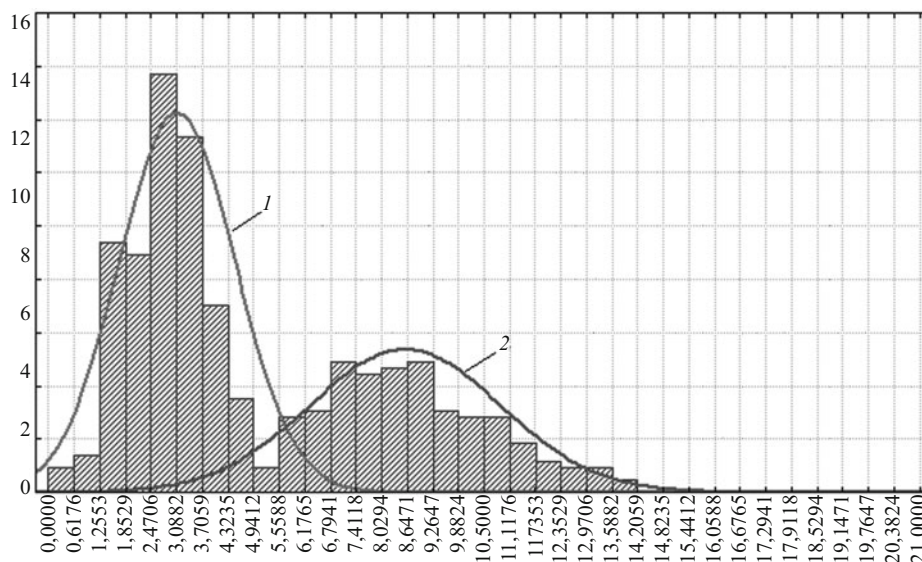


Рис. 2. Потерянная толщина шпунта (подводная зона, 50 лет)

жения с одинаковым сроком эксплуатации. Первоначально выборка была разбита на периоды по 10 лет, время соответствовало сроку эксплуатации. Вероятностная модель была построена на основе модифицированной функции распределения Вейбулла. Чтобы учесть динамику коррозионного процесса, параметры представлялись как функции от времени [3]. Данная модель позволила повысить точность прогноза. Она была использована также для прогнозирования изменения эксплуатационной надежности поврежденного сооружения [4].

Следующим шагом исследований была разработка более удобной и точной вероятностной модели с учетом вклада наиболее значимых факторов в процесс морской коррозии стальных конструкций. Известно, что коррозия зависит от большого числа факторов. Согласно центральной предельной теореме, если на некоторый процесс влияет большое число факторов и влияние каждого из них достаточно слабое, то распределение случайной величины (остаточная толщина шпунта) стремится к нормальному независимо от распределения каждого из факторов. Исходя из этого, можно предположить, что есть некоторые факторы, которые очень значительно влияют на процесс коррозии.

Одним из важнейших факторов, определяющих скорость коррозии шпунта, является принадлежность участка к зоне (зона переменного уровня, подводная зона). На гистограммах, построенных по зонам, от-

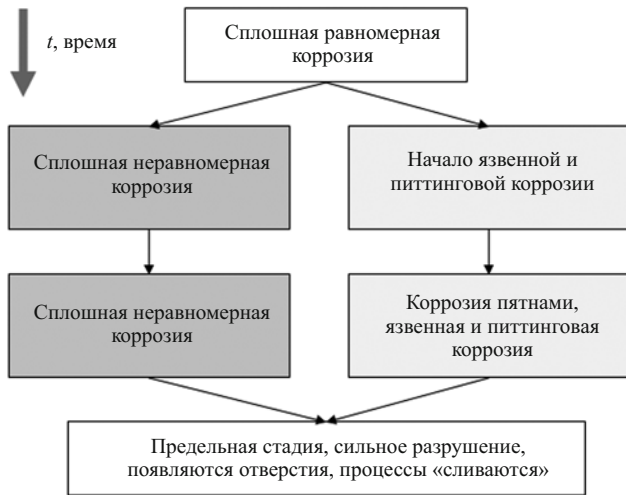


Рис. 3. Схема развития коррозии стальных конструкций в морской воде

четливо прослеживается бимодальность. Это наблюдается в зоне переменного уровня и в подводной зоне. Можно предположить, что независимо от зоны существуют ещё два фактора (интенсивность локальной и сплошной коррозии), определяющие протекание коррозионных процессов, и эти факторы зависят от времени. Распределение величины коррозии шпунта, обусловленное действием каждого из этих двух факторов, хорошо описывается нормальным законом. На рис. 1 и 2 показано наблюдаемое распределение, а кривыми 1 и 2 показаны теоретические распределения для каждого фактора. Отмечено, что с течением времени становится более очевидным проявление бимодальности, где первый горб распределения обусловлен медленными процессами сплошной коррозии, второй — более интенсивными локальными процессами.

Опираясь на результаты наблюдений, можно выделить некоторые общие особенности, характерные для стальных конструкций морских гидротехнических сооружений, подвергающихся морской коррозии:

- стальные конструкции в начале срока эксплуатации подвергаются сплошной равномерной коррозии;
- разброс значений коррозионных повреждений (потерянной толщины) увеличивается со временем, проявляются локальные виды коррозии (язвы, питтинги, щелевая коррозия);
- с течением времени локализация коррозии становится более очевидной и интенсивной. Локальные повреждения объединяются в более крупные дефекты или превращаются в дыры.

Это дает основание предполагать, что отмеченные ранее факторы — это вид коррозионного процесса (сплошной и локальный). Другой важной особенностью морской коррозии стальных конструкций является то, что описанные ранее характерные особенности наблюдаются для разных зон (подводная, надводная, переменного уровня) и отличаются лишь интенсивностью коррозионного процесса. Надводная зона не представляет большого интереса, так как для неё процессы коррозии протекают медленно, повреждения сравнительно легко диагностируются и устраняются. Исходя из этих наблюдений, можно предположить, что коррозионный процесс развивается по следующей схеме (рис. 3). Определим математическую модель бимодального нормального распределения, учитывающего зависимость доли вклада каждого фактора от времени. Функция плотности нормального распределения.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (1)$$

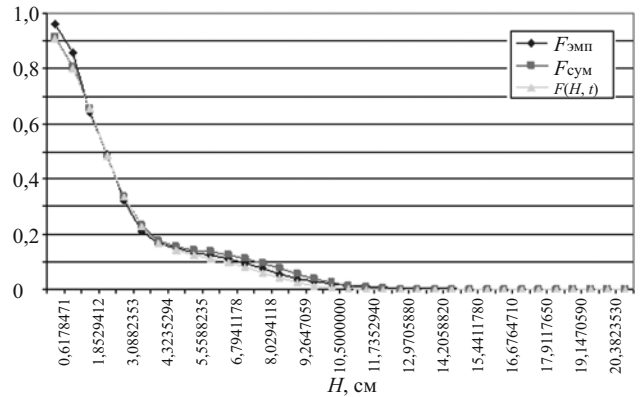


Рис. 4. Функции распределения (подводная зона, 10 – 20 лет)

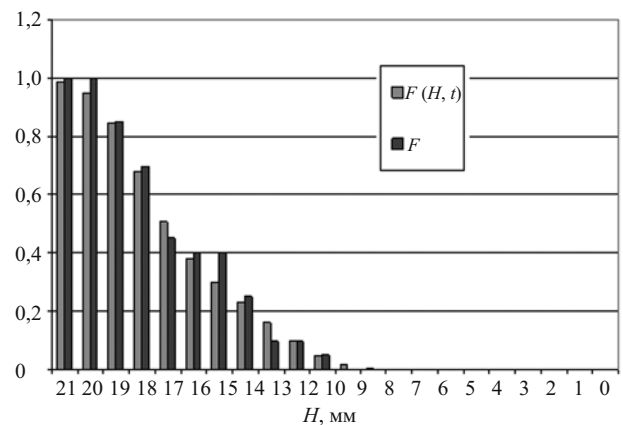


Рис. 5. Наблюдаемое F и предсказанное $F(H, t)$ распределение для причала “Гайдамак № 43” (зона переменного уровня, срок эксплуатации 21 год)

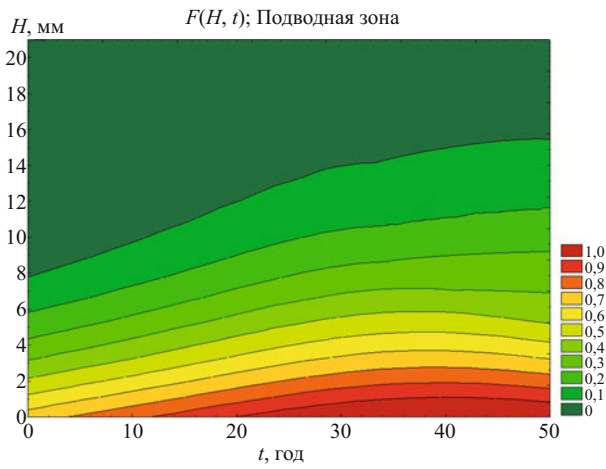


Рис. 6. Распределение коррозионных повреждений в подводной зоне

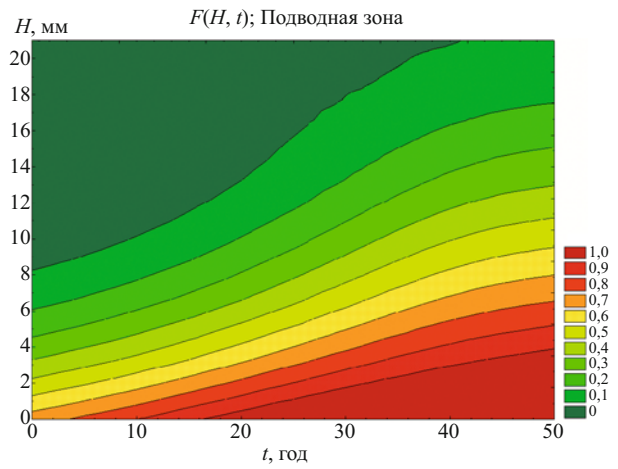


Рис. 7. Распределение коррозионных повреждений в зоне переменного уровня

Функция нормального распределения

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}\right) dt \quad (2)$$

Нормальное распределение $N(a, \sigma)$ определяется двумя параметрами: a — среднее значение и σ — стандартное отклонение. В нашем случае случайной величиной является потерянная толщина стенки шпунта H , для шпунта “Ларсен-V” принимаются значения от 0 до 21 мм.

Как сказано выше, предполагается, что общая коррозия складывается из двух параллельных процессов: сплошного и локального. Локальный процесс коррозии характеризуется большей глубиной коррозионных повреждений, чем сплошной процесс на той же стадии. Каждый из процессов обусловлен влиянием множества различных факторов. Распределение величины повреждений для каждого процесса в отдельности хорошо описывается нормальным законом. Оба распределения имеют ярко выраженную динамику. Чтобы учесть фактор времени, представим параметры распределений как функции от времени: $a_1(t)$, $\sigma_1(t)$, $a_2(t)$, $\sigma_2(t)$, а также введем функции, определяющие долю вклада каждого процесс в общее распределение на заданный период времени: $k_1(t)$, $k_2(t)$.

Функции распределения для каждого процесса $F_1(H, t)$ и $F_2(H, t)$ будут показывать вероятность того, что заданный уровень коррозионного повреждения (потерянная толщина стенки шпунта) может быть достигнут к моменту времени t , прошедшему с момента ввода сооружения в эксплуатацию. Функцию распределения F заменяем функцией обеспеченности $1 - F$:

$$F_1(H, t) = \frac{k_1(t) \cdot \left(1 - \frac{1}{\sigma_1(t) \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{x_0}^{x_1} \exp\left(-\frac{(t-a_1(t))^2}{2\sigma_1(t)^2}\right) dt\right)}{k_1(t) + k_2(t)} = \frac{k_1(t) \cdot (1 - F(a_1(t); \sigma_1(t)))}{k_1(t) + k_2(t)}; \quad (3)$$

$$F_2(H, t) = \frac{k_2(t) \cdot \left(1 - \frac{1}{\sigma_2(t) \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{x_0}^{x_1} \exp\left(-\frac{(t-a_2(t))^2}{2\sigma_2(t)^2}\right) dt\right)}{k_1(t) + k_2(t)} = \frac{k_2(t) \cdot (1 - F(a_2(t); \sigma_2(t)))}{k_1(t) + k_2(t)}; \quad (4)$$

$$F(H, t) = F_1(H, t) + F_2(H, t). \quad (5)$$

Для каждой зоны по каждому периоду были идентифицированы значения параметров. Теоретические $F_{\text{сум}}$, теоретические с аппроксимирующими функциями $F(H, t)$ и эмпирические $F_{\text{эмп}}$ функции вероятности были определены. Идентификация осуществлялась на основе визуального анализа и критерия Колмогорова — Смирнова на уровне значимости 0,05 (рис. 4).

На основе результатов сопоставления данных натурных исследований с теоретическим прогнозом, можно подтвердить, что вероятностная модель обеспечивает хорошую точность и стабильность прогноза. Верификация модели также проводилась на основе натурных данных по коррозии шпунта причальных сооружений с различным сроком эксплуатации (рис. 5).

Точность предсказания, получаемого с помощью данной вероятностной модели, для подводной зоны выше, чем для зоны переменного уровня. В большинстве случаев ошибка не превышает 5 %. В соответствии с правилом 2σ , для которого при нормальном законе распределения 95,45 % значений случайной величины (ошибки предсказания) находится в пределах $[a - 2\sigma; a + 2\sigma]$, интервал будет:

для зоны переменного уровня $[-13, 48; 13, 22]$;

для подводной зоны $[-4, 83; 8, 46]$.

Вероятностная модель применима для долгосрочного прогноза, так как величина ошибки не зависит от срока. Главным условием, обеспечивающим достоверность прогноза, являются полнота и качество информации о событиях, связанных со значительным изменением технического состояния сооружения (ремонт, аварии и т.д.).

Номограммы (рис. 6, 7) позволяют без вычислений определить вероятность того, что уровень коррозии достигнет некоторого значения в некоторый момент времени. Номограммы позволяют также проследить динамику изменения коррозии на всём временном интервале при фиксированной вероятности (изолинии). Номограммы наиболее полно отражают всю картину процесса. Диапазон времени t от 0 до 50 лет.

Выводы

1. Морская коррозия стальных конструкций, как показали наблюдения, является сложным процессом, зависящим от множества факторов, и требует дальнейшего изучения.

2. Разработана вероятностная модель процесса морской коррозии, учитывающая влияние наиболее значимых факторов: зоны и вида коррозии. Учтена динамика интенсивности факторов.

3. Вероятностная модель показала хорошую точность и стабильность, что позволяет использовать её для долгосрочного прогнозирования технического состояния причальных сооружений в виде тонкой стенки и других сооружений, имеющих стальные элементы, которые подвергаются морской коррозии. Разработаны рекомендации, позволяющие применять модель для оценки и прогноза эксплуатационной надёжности МГТС.

4. На практике подобные модели эффективно используются для оптимизации планирования объемов и периодичности ремонтных работ, принятия решений по усилению поврежденных конструкций, прогнозирования изменения эксплуатационной надёжности и выбора рациональных режимов эксплуатации, учитывающих изменения технического состояния сооружения.

Список литературы

1. Сахненко М. А. Методика оценки коэффициента надёжности морских причалов с учетом сроков эксплуатации / МГАВТ. 2007.
2. Маннапов Р. Г. Оценка надёжности оборудования, подвергающегося сплошной коррозии // Надёжность и контроль качества. 1989. № 9.
3. Kovalenko R. G., Kim L. V. Durability evaluation of marine and offshore structures", ISOPE-2009 (The Nineteenth (2009) International Offshore and Polar Engineering Conference), Osaka, Japan, 2009.
4. Коваленко Р. Г. Анализ изменения несущей способности больверка с учетом коррозии шпунтовой стенки // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2008. № 3.

Разработка и испытания моделей кондуктометрического консистометра для земснаряда

Кожевников Н. Н., инженер

Приведены результаты опытных работ по совершенствованию кондуктометрического консистометра с применением кольцевых датчиков, позволяющих получать осредненное по сечению трубопровода значение концентрации грунта в пульпе. Даны схемы последовательного включения датчиков воды и пульпы, позволяющие определять консистенцию пульпы без микропроцессора, а также схема прибора с одним кольцевым датчиком и обработкой сигнала микропроцессором. Установлена возможность использования постоянного тока малой силы для питания электродов без электролиза воды, что создает стабильное напряжение питания прибора от гальванических элементов. Данные статьи позволяют конструировать и изготавливать кондуктометрические консистометры нового поколения для земснарядов, разрабатывающих песчаные и гравийные грунты.

Ключевые слова: кондуктометрический консистометр, кольцевые датчики, концентрация грунта, земснаряды.

Для управления земснарядом необходима установка измерительного прибора — консистометра, определяющего содержание грунта в пульпе. Еще в 1950-х гг. были разработаны радиоактивные консистометры, но вследствие их сложности и опасности излучения для персонала они не нашли применения на земснарядах в России.

В 1987 – 88 гг. автор статьи провел лабораторные исследования по определению электрических сопротивлений пульпы и воды и установил пропорциональную зависимость отношения объема песка или гравия (электрического изолятора) в пульпе от электрического сопротивления воды и пульпы [1, 2].

Математическую зависимость объёмной консистенции (концентрации) пульпы от сопротивления датчиков (при их идентичности) можно выразить как

$$K_1 = (R_{II}/R_B) - 1, \quad (1)$$

где K_1 — объёмное содержание песчано-гравийного грунта в пульпе без пор; R_B — сопротивление датчика водяного резистора, R_{II} — сопротивление датчика пульпы, смонтированного в пульпопроводе.

Заменив в выражении (1) сопротивление R на падение напряжения V этих сопротивлений, получим выражение отношения объема грунта к объему пульпы

$$K_2 = (V_{II}/V_B) - 1, \quad (2)$$

или при постоянном напряжении U на датчиках

$$K_3 = (I_B/I_{II}) - 1, \quad (3)$$

где I — ток датчика.

На заводе ОПП “Промгидромеханизация” треста “Гидромеханизация” Минэнерго СССР инженерами электролаборатории В. Я. Сперанским и В. И. Киселевым был разработан совмещенный

прибор, показывающий консистенцию пульпы и наличие или отсутствие слоя заиливания грунтом нижней части пульпопровода. Прибор был назван “Сигнализатор оптимального режима гидротранспорта грунта СОРГГ-2”.

Датчики прибора были выполнены в виде изолированного электрода, вмонтированного в пульпопровод с диэлектрическим кольцевым зазором 5 мм между электродом и стальным пульпопроводом. Информативной областью проходящего в зазоре тока переменного напряжения 12 В была локальная полусфера диаметром 3 – 4 см. Поскольку в горизонтальном пульпопроводе происходит расслоение частиц грунта по вертикали, то измеряемая локальная концентрация пульпы зависела от положения датчика на трубе. Для получения информации осредненной концентрации по сечению трубы подбирали расположение датчика на трубе. Но для оперативного управления грунтозабором было достаточно знать величину осадка на дне трубы и локальную концентрацию. Датчик воды врезали в водовод земснаряда или в верхнюю часть пульпопровода при транспортировании гравия. Оба датчика включались параллельно.

Испытания выявили надежность устройства. Была изготовлена и смонтирована на 20 земснарядах партия приборов СОРГГ-2. Отказов или неверных измерений на песчано-гравийных грунтах не наблюдалось. При испытаниях на земснарядах в Финском заливе на техногенных грунтах, глине и морской воде наблюдались отклонения показаний. На прибор получено авторское свидетельство СССР [2], авторы были награждены медалями ВДНХ.

Впоследствии конструкция консистометра была несколько изменена инженером Иофа (уменьшен размер датчика и вольтметра, введена автоматика подъема и опускания грунтозаборной рамы). Под наименованием “Поток” консистометр выпускался мелкосерийно заводом для земснарядов треста

“Трансгидромеханизация”. Измененную модель нельзя признать удачной: шкала стрелочного прибора измерений была слишком мала, уменьшенный размер датчиков вносил погрешности измерений, автоматику опускания грунтозаборной рамы по показаниям консисометра в большинстве случаев отключали. Следует также заметить, что тогда персонал земснаряда не имел надлежащей квалификации для эксплуатации электронных приборов.

В 2010 г. ряд фирм гидромеханизации обратились с просьбой разработать проект более простого кондуктометрического консисометра с осредненным по сечению пульпопровода значением консистенции пульпы.

Проблему получения средней консистенции в пульпопроводе мы предлагаем решить путем монтажа стальных колец — электродов в патрубке из изолятора — плотного полиэтилена. Патрубок монтируется во всасывающем трубопроводе земснаряда. Внутренний диаметр патрубка равняется диаметру пульпопровода D . Расстояние L между кольцами-электродами при испытании модели было принято как отношение $L/D = 1,3$. Патрубок с кольцевыми электродами показан на рис. 1.

При подаче напряжения U на кольца-электроды получается цилиндрическая измерительная ячейка. Электрический ток равномерно распределяется по всему сечению ячейки — проводника, которым является вода; ток равномерно проходит с одного электрода-кольца на другой электрод. При этом, зная напряжение U и измерив ток I с помощью амперметра, можно вычислить электрическое сопротивление ячейки

$$R = UI. \quad (4)$$

Зная сопротивление R , по известной из физики формуле для сопротивления проводника [3] можно определить его удельное сопротивление:

$$\rho = RA/L, \quad [5]$$

где A — площадь сечения проводника $A = \pi D^2/4$; L — длина проводника (расстояние между центрами колец-электродов).

Обратная величина удельному сопротивлению ρ называется удельной проводимостью:

$$\sigma = 1/\rho.$$

Существенным преимуществом измерительной ячейки с кольцевыми электродами является получение средней концентрации пульпы за счет равномерного распределения тока по всему сечению ячейки. Работоспособность измерительной ячейки согласно рис. 1 была проверена на модели диамет-

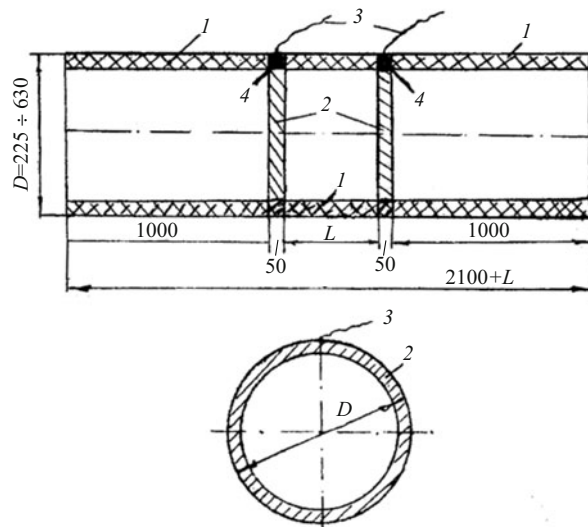


Рис. 1. Патрубок — датчик консисометра: 1 — патрубок полиэтиленовый; 2 — кольца стальные (нержавеющая сталь) — электроды; 3 — провод медный изолированный; 4 — заливка эпоксидной смолой сверления для провода 3, припаянного к кольцу 2

ром $D = 9$ см с расстоянием между стальными кольцами $L = 11,75$ см (по центру колец) и отношением $L/D = 1,3$.

Электрическая часть кондуктометрического консисометра может выполняться в двух вариантах:

вариант 1 — с прямым измерением консистенции электрическим делителем напряжения с помощью двух датчиков — воды и пульпы, включенных последовательно, и вольтметра (без обработки результатов на электронном делителе). В этом варианте необходима установка двух одинаковых измерительных ячеек: первой — на всасывающем трубопроводе для измерения падения напряжения при прохождении пульпы, второй — на концевой части грунтозаборной рамы для определения падения напряжения ячейки с водой забоя;

вариант 2 — с одной измерительной ячейкой на всасывающем оголовке, периодическим измерением параметров воды при отрыве оголовка от забоя и передачей измеряемой величины в память электронного устройства микропроцессора для дальнейшей обработки по программе, реализуемой выражение (3).

При подаче напряжения на электроды, погруженные в жидкость, происходит электролиз воды с выделением на катоде (отрицательный полюс) металла или водорода. При этом на поверхности электрода образуются пузырьки газа и электрическое сопротивление ячейки увеличивается в зависимости от силы тока и времени электролиза.

Обычно при кондуктометрических измерениях применяют переменный слабый ток. В ранее разработанных моделях кондуктометрических консисометров применяли напряжение 12 В, которое по ТУ

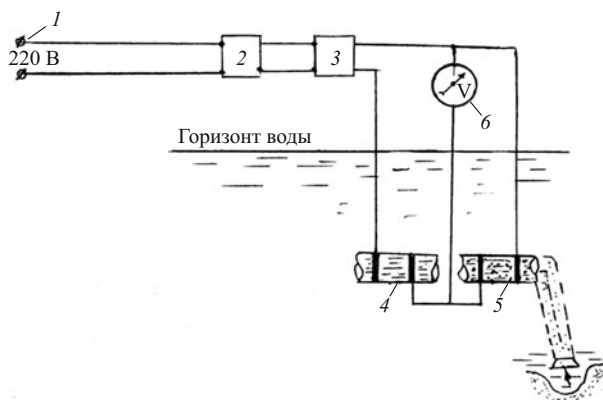


Рис. 2. Схема консистометра с электрическим делителем напряжения и двумя измерительными ячейками: 1 — подключение к сети 220 В земснаряда; 2 — стабилизатор напряжения 220 В переменного тока; 3 — адаптер с напряжения 220 В переменного тока на постоянный ток 12 В; 4 — измерительная кольцевая ячейка воды в забое; 5 — измерительная кольцевая ячейка пульпы во всасывающем трубопроводе земснаряда; 6 — вольтметр с растянутой шкалой для измерения падения напряжения в ячейке пульпы

считается безопасным для персонала земснаряда. При большой нестабильности напряжения на земснаряде необходим автоматический стабилизатор напряжения высокого класса точности, что удорожает устройство.

Мы поставили опыты по электролизу воды постоянным током от адаптера “ROBITON” — блока питания с входом 220 В переменного тока и выходом 12 – 6 В постоянного тока и от гальванических элементов напряжением 6 В. При отношении размеров цилиндрического датчика $L/D = 1,3$ и напряжения 6 В ток в водяной ячейке не превышал 10 – 20 мА на московской водопроводной воде. При этом токе практически не наблюдалось электролиза воды. Стрелка миллиамперметра стояла стабильно в течение двух суток. Это позволяет использовать гальванические элементы или аккумуляторы со стабильным напряжением 6 В, что повышает точность измерений и упрощает устройство, тем более что электронные преобразователи работают при входном сигнале постоянного тока.

Вариант 1. Электрическая схема устройства по варианту 1 представлена на рис. 2.

Для пересчета полученного показания падения напряжения V_{II} вольтметра в консистенцию пульпы нужно пересчитать показания V_{II} по выражению (2).

При стабильном исходном напряжении 12 В значение V_B можно вычислить по формуле $V_B = 12 - V_{II}$, тогда

V_{II} , В	6,00	6,1	6,15	6,30	6,5	6,7	6,9	7,00
K_2 , %	0,00	3,40	5,10	10,52	18,20	26,40	35,30	40,00

$$K_2 = (V_{II}/12 - V_{II}) \cdot 100. \quad (6)$$

Удобнее поместить на вольтметре шкалу значения консистенции в зависимости от показания вольтметра V_{II} .

Пересчет показания вольтметра по выражению (6) приведен в таблице.

Как видно из таблицы, значения V_{II} мало отличаются от консистенции K , поэтому шкала вольтметра должна быть растянутой, в вольтметр высокого класса точности. Конечно, удобнее сконструировать электронный прибор с цифровым дисплеем и программой пересчета показаний вольтметра в значение консистенции.

При использовании импортного аналогового двухканального милливольтметра GVT-427В (фирма “GOOD WILL INSTRUMENT” имеется возможность упростить измерительную схему рис. 2. При одновременном включении датчиков воды и пульпы точной стабилизации напряжения 12 В не требуется, поскольку сила тока на обоих датчиках одинакова (датчики включены последовательно) и на отношение падения напряжений V_{II}/V_B отклонение исходного напряжения не влияет. Кроме того, вольтметр GVT-427В оборудован преобразователем напряжения, реализующим деление напряжения на каналах 1 и 2, т.е. имеется возможность сразу получить отношение напряжений на датчиках. При этом из схемы рис. 2 исключаются стабилизатор напряжения и не нужен пересчет показаний вольтметра на консистенцию пульпы, что очень важно. Конечно, работу вольтметра GVT-427В следует испытать в производственных условиях на земснаряде.

Обращаем внимание на особенности изготовления датчиков воды и пульпы. Их сопротивление на воде должно быть равным или иметь отклонения не более 1 %. При большем отклонении схема должна быть дополнена регулировочным резистором, чтобы при показании вольтметра 6 В через датчики проходила чистая вода при $K = 0,00$.

Должны быть проведены испытания на совместимость датчиков и определение силы тока или сопротивления для расчета и принятия решения о подборе необходимого оборудования (стабилизатор напряжения, трансформатор, вольтметр, изолированные провода) под соответствующие параметры тока.

После определения параметров датчиков на реальной воде акватории земснаряда должна быть разработана рабочая документация.

Вариант 2. Консистометр с одной измерительной ячейкой на всасывающем оголовке, периодическим измерением параметров воды при отрыве оголовка от забоя и передачей измеряемой величины IV в память электронного вычислительного устрой-

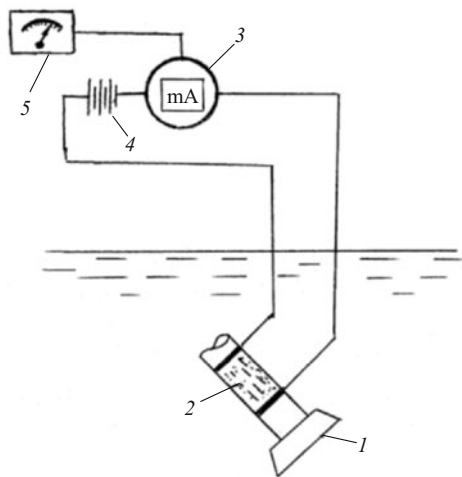


Рис. 3. Схема консистометра с одной измерительной ячейкой с кольцевыми электродами и программным вычислительным устройством: 1 — всасывающий оголовок земснаряда; 2 — размещенная измерительная ячейка для определения тока при заполнении ячейки водой забоя ИВ или последовательно пульпой ИП; 3 — дискретный миллиамперметр с передачей данных измерений в вычислительное устройство; 4 — гальваническая батарея или аккумулятор на 6 В; 5 — микропроцессор — электронное вычислительное устройство, запоминающее значение ИВ и вычисляющее значение консистенции из выражения (7)

ства микропроцессора для дальнейшей обработки по программе, реализуемой выражение

$$K_3 = (I_B/I_{II}) - 1) \cdot 100. \quad (7)$$

Схема этого консистометра приведена на рис. 3.

Преимуществом этого устройства консистометра является применение одной измерительной ячейки, при этом исключаются изготовление двух одинаковых по электрическому сопротивлению ячеек и их корректировка при эксплуатации. Другим важным преимуществом служат измерение параметров тока ячейки и возможность вычисления удельного сопротивления воды забоя и её удельного сопротивления для проектирования вычислительного устройства и подбора приборов. Отклонение от стабильного напряжения питания схемы также не имеет принципиального значения, поскольку реализуется отношение токов на пульпе и воде при одинаковом напряжении.

К недостаткам этого типа консистометра можно отнести необходимость проектирования и изготовления электронного запоминающего и вычислительного устройства — микропроцессора. В настоящее время это не представляет трудности, тем более что алгоритм памяти и вычисления простой.

На модели был проверен принцип работы устройства и определено удельное сопротивление московской водопроводной воды. Приведем этот расчет, который может служить аналогом для определения параметров воды других источников.

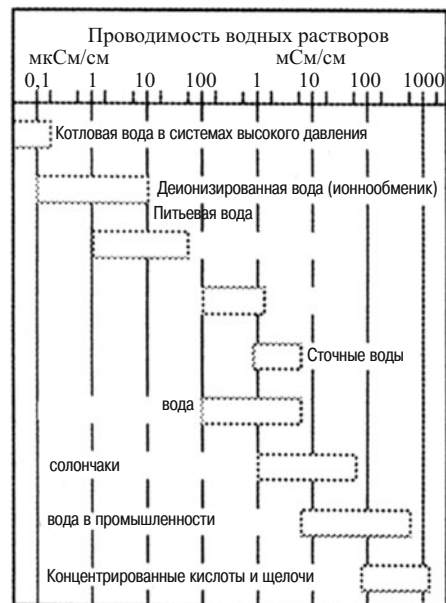


Рис. 4. Проводимость водных растворов

В наших опытах диаметр измерительной ячейки был 9 см, площадь $A = \pi D^2/4 = 63,6 \text{ см}^2$, расстояние (длина проводника) между серединой колец-электродов $L = 11,75 \text{ см}$. Сопротивление R ячейки вычислялось по известной формуле [3]

$$R = U/I, \quad (8)$$

где U — напряжение, в нашем случае 6 В; I — сила тока, А.

В опытах сила тока I определялась по показанию стрелочного миллиамперметра постоянного тока на шкале 10 мА.

В разные дни сила тока $I = 6,8 \text{ мА}$ или $0,0068 \text{ А}$ была постоянной. Из выражения (8) вычислялось сопротивление ячейки $R = 6/0,0068 = 882 \text{ Ом}$. Из выражения (5) вычислялось удельное сопротивление $\rho = R \cdot A/L = 882 \cdot 63,6/11,75 = 4774 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Обратная величина — удельная проводимость $\sigma = 1/\rho = 1/4774 = 0,00021 \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}$. Московскую водопроводную воду можно отнести к питьевой мало минерализованной (рис. 4).

При расчете силы тока в ячейке очень большое значение имеет удельное сопротивление воды, которое для обычной речной воды (мягкой) в зависимости от содержания растворённых минералов 10 – 500 мг/л, отличается в 100 раз (рис. 4) $\rho = 1000 \dots 100000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. При проектировании ячейки и подборе оборудования и диапазонов измерения миллиамперметра следует учитывать этот фактор, чтобы выйти на минимальный ток с целью исключения влияния диссоциации воды. До проектирования ячейки и подбора приборов желательно измерить электропроводность воды карьера стандартным кондуктометром воды.

Были проведены также опыты по определению концентрации смеси путем введения в ячейку изолаторов различного объема и измерения тока. Были достигнуты условные концентрации от 5 до 30 % от объема ячейки. Отклонения от измерения концентрации объемным способом были в пределах 5 % от исходной величины, что при имеющихся измерительных средствах следует признать удовлетворительным.

Для получения минимального тока ячейки нужно знать удельную электропроводность воды ρ . Ее можно получить путем измерения стандартным кондуктометром или путем измерений в модельной ячейке, приведенной выше. Зная удельную электропроводность воды, используя формулы (5), (6) легко определить длину ячейки для получения минимального значения тока с целью снижения влияния электролиза воды.

Выводы

1. Наиболее совершенной и современной является конструкция консистометра с одной измерительной ячейкой и вычислительным микропроцессором.

2. В качестве оптимального датчика для определения средней концентрации пульпы рекомендуется цилиндрическая измерительная ячейка с кольцевыми электродами.

3. В качестве источника питания устройства рекомендуются гальванические батарейки или аккумуляторы с суммарным напряжением 6 В.

4. Для измерения силы тока следует применять дискретный миллиамперметр с точностью измерений не менее 1 %.

5. Электрики и операторы (багермейстеры) должны пройти курс обучения по монтажу и применению консистометра.

Список литературы

1. Кожевников Н. Н., Киселев В. И., Сперанский В. Я., Темников Г. Д. Разработка и внедрение сигнализатора оптимального режима гидротранспорта грунта СОРГГ-2 // Гидротехническое строительство. 1989. № 6. С. 10 – 14.
2. А. с. 1409731 А 1 СССР. Способ калибровки сигнализатора заиливания трубопровода грунтом / Кожевников Н. Н., Сперанский Г. Я., Ухин Б. В. // Открытия. Изобретения. 1988. № 26.
3. Х. Кухлинг. Справочник по физике. — М.: Мир, 1985.

Распределение скоростей и гидравлическое сопротивление при течении в трубах, каналах и речных руслах

Брянская Ю. В., кандидат техн. наук, Байков В. Н., инженер (Московский государственный строительный университет),
Волынов М. А., кандидат техн. наук (Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова)

Рассматривается вопрос о правомерности использования гидравлических закономерностей, полученных для течений в круглых трубах при расчетах открытых каналов и речных русел. С использованием логарифмического и степенного распределения скоростей в рассматриваемых потоках на основе обработки представительного массива данных измерений в трубах, открытых каналах и речных потоках получена новая универсальная связь между коэффициентом гидравлического сопротивления, параметром Кармана и показателем степени в распределении скоростей, обладающая свойством инвариантности для всех рассмотренных течений.

Ключевые слова: гидравлические расчеты, течения в круглых трубах, открытые каналы, речные русла, коэффициент гидравлического сопротивления, параметр Кармана, распределение скоростей.

При гидравлических расчетах каналов, речных русел и водопроводящих гидротехнических сооружений важнейшим параметром является коэффициент гидравлического сопротивления λ , определение которого требует сведений об эквивалентной песочной шероховатости. Никурадзе либо о шероховатости по шкале Маннинга — Павловского. Выбор значения шероховатости опирается на ее качественное описание, что может приводить к заметной неточности определения λ . В тех случаях, когда имеется возможность измерить распределение скоростей в потоке, значение λ может быть

найдено по соотношению [1] между средней и динамической скоростью:

$$\frac{V_{-p}}{u_*} = \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda}}. \quad (1)$$

Однако для определения динамической скорости требуются данные о местном гидравлическом уклоне i :

$$u_* = \sqrt{ghi}, \quad (2)$$

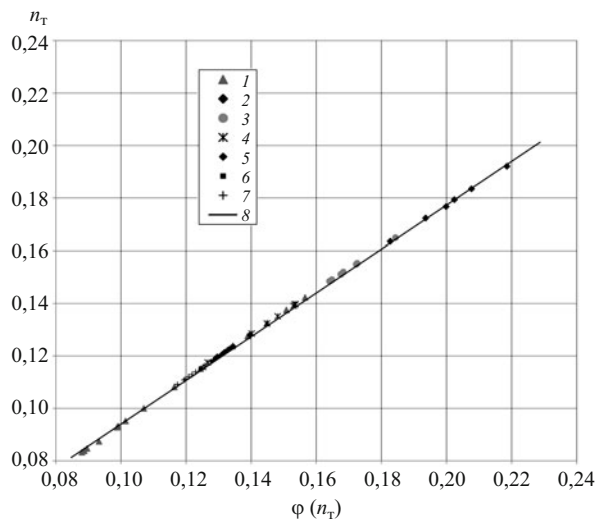


Рис. 1. Сопоставление расчетных данных по формуле (7) с опытными данными И. Никурадзе в гладких и шероховатых трубах:

1 — гладкие трубы; 2–7 — трубы с различной относительной шероховатостью (2 — $r/k_s = 15$; 3 — $r/k_s = 30,6$; 4 — $r/k_s = 60$; 5 — $r/k_s = 126$; 6 — $r/k_s = 255$; 7 — $r/k_s = 507$); 8 — расчетная кривая по формуле (7)

которые, как правило, отсутствуют.

В настоящее время для гидравлических расчетов открытых, в особенности речных, потоков чаще всего применяются закономерности, полученные И. Никурадзе и другими авторами [2] при исследовании течений в трубах, в то же время остаются вопросы на счет обоснованности такого приема. Хотя имеются определенные достижения в исследовании потоков в каналах с различной формой сечения [2], в том числе с использованием подхода, опирающегося на выделение в потоке изолированных ячеек [3], тем не менее вопрос о кинематической структуре потоков с различной формой поперечного сечения остается недостаточно изученным.

В настоящее время принято считать, что использование гидравлического радиуса позволяет получить идентичные динамические характеристики потоков с различной формой поперечного сечения при условии равномерного распределения трения по смоченному периметру, однако это не всегда подтверждается данными измерений. Накопленные данные лабораторных и натуральных измерений позволяют выполнить такое сопоставление достаточно детально.

Для такого сопоставления было использовано распределение скоростей как степенного, так и логарифмического вида в предположении, что они в достаточной мере точно описывают действительное распределение скоростей в потоке на нормали к твердой граничной поверхности трения.

Записывая профиль скорости степенного вида для осесимметричного потока [1]

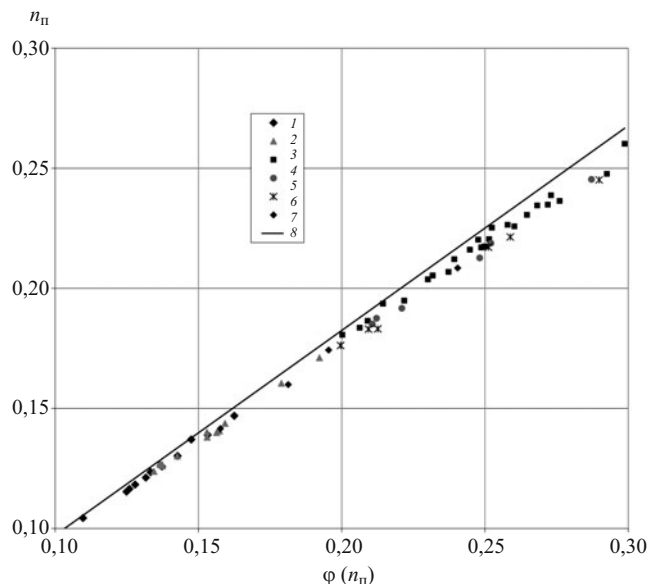


Рис. 2. Сопоставление расчетных данных по формуле (6) с лабораторными измерениями в гладких и шероховатых каналах (данные В. С. Боровкова):

1 — гладкий канал; 2–6 — каналы с искусственной шероховатостью (2 — $\sigma = 1,0$ мм; 3 — $\sigma = 5,0$ мм; 4 — $\sigma = 12,5$ мм; 5 — $\sigma = 8,3$ мм; 6 — $\sigma = 4,15$ мм, где σ — геометрическая высота выступов); 7 — расчетная кривая по формуле (6)

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(\frac{y}{r_0} \right)^n, \quad (3)$$

где u_{\max} — максимальная скорость на оси потока; y — расстояние по нормали к стенке трубы; r_0 — радиус трубы, и используя профиль скорости логарифмического вида для гидравлически гладкой трубы [4]

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{u_* y}{\nu} + C, \quad (4)$$

где κ — параметр Кармана; C — “вторая константа турбулентности”; назначая два произвольных значения $y = y_1$ и $y = y_2$, логарифмируя (3), получаем

$$n = \frac{\ln \frac{u_2}{u_1}}{\ln \frac{y_2}{y_1}}, \quad (5)$$

где u_1 и u_2 — скорости в точках y_1 и y_2 .

Для тех же точек в потоке запишем

$$u_1 = \frac{u_*}{\kappa} \ln y_1 + \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{u_*}{\nu} + C;$$

$$u_2 = \frac{u_*}{\kappa} \ln y_2 + \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{u_*}{\nu} + C.$$

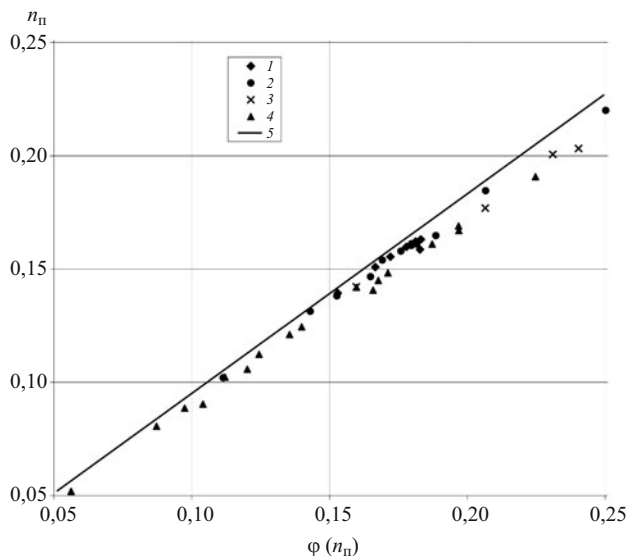


Рис. 3. Сопоставление расчетных данных по формуле (6) с натурными измерениями на реках Москва, Киржач и Клязьма:

1 — р. Клязьма; 2 — р. Киржач; 3 — р. Москва (МИСИ); 4 — р. Москва (Гидропроект); 5 — расчетная кривая по формуле (6)

Вычитая из второго выражения первое, получаем

$$u_2 - u_1 = \frac{u^*}{\kappa} \ln \frac{y_2}{y_1},$$

откуда находим

$$\ln \frac{y_2}{y_1} = \frac{u_1 \left(\frac{u_2}{u_1} - 1 \right)}{\frac{u^*}{\kappa}}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5) получаем

$$n = \frac{\frac{u^*}{\kappa} \ln \frac{u_{\max}}{V_{\text{ср}}}}{V_{\text{ср}} \left(\frac{u_{\max}}{V_{\text{ср}}} - 1 \right)}. \quad (7)$$

Это выражение справедливо как для осесимметричного, так и для плоского потока.

В дальнейшем анализе используются известные соотношения между максимальной и средней скоростью [4]:

для плоского потока

$$\frac{u_{\max}}{V_{\text{ср}}} = 1 + n; \quad (8)$$

для потока в трубе

$$\frac{u_{\max}}{V_{\text{ср}}} = \frac{n^2 + 3n + 2}{2}. \quad (9)$$

В связи с тем, что $n \cong 0,1 \dots 0,2$, слагаемое n^2 мало по сравнению с другими слагаемыми и может быть опущено, тогда для течения в трубе формулу (9) можно записать

$$\frac{u_{\max}}{V_{\text{ср}}} = 1 + 1,5n. \quad (10)$$

С учетом формул (1) и (8) запишем выражение (7) в следующем виде:

для плоского потока

$$n_{\text{п}} = \frac{1}{\kappa} \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{8}} \frac{\ln(1 + n_{\text{п}})}{n_{\text{п}}};$$

для потока в трубе

$$n_{\text{т}} = \frac{1}{\kappa} \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{8}} \frac{\ln(1 + 1,5n_{\text{т}})}{1,5n_{\text{т}}}.$$

Эти соотношения могут быть преобразованы: для потока в широком канале

$$\frac{1}{\kappa_{\text{п}}} \sqrt{\frac{\lambda}{8}} = \frac{n_{\text{п}}^2}{\ln(1 + n_{\text{п}})} = \varphi(n_{\text{п}}); \quad (11)$$

для потока в трубе

Плоский поток																
$n_{\text{п}}$	0,100	0,120	0,130	0,140	0,150	0,160	0,170	0,180	0,190	0,200	0,210	0,220	0,230	0,240	0,250	0,300
$\varphi(n_{\text{п}})$	0,105	0,127	0,138	0,150	0,161	0,172	0,184	0,196	0,208	0,219	0,231	0,243	0,256	0,267	0,280	0,343
Поток в трубе																
$n_{\text{т}}$	0,100	0,120	0,130	0,140	0,150	0,160	0,170	0,180	0,190	0,200	0,210	0,220	0,230	0,240	0,250	0,300
$\varphi(n_{\text{т}})$	0,107	0,131	0,143	0,154	0,166	0,179	0,191	0,203	0,216	0,229	0,242	0,255	0,268	0,281	0,294	0,363

$$\frac{1}{\kappa_T} \sqrt{\frac{\lambda}{8}} = \frac{1,5n_T^2}{\ln(1 + 1,5n_T)} = \varphi(n_T). \quad (12)$$

Значения $\varphi(n_{п})$ и $\varphi(n_T)$, вычисленные по формулам (11) и (12), приведены в таблице.

Сопоставление значений $\varphi(n_{п})$ и $\varphi(n_T)$, представленных в таблице, показывает, что при $n_{п} = n_T$ значения $\varphi(n_{п})$ и $\varphi(n_T)$ достаточно близки друг к другу и к соответствующим значениям n .

Учитывая, что $\varphi(n) = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{\lambda}{8}} = \frac{1}{\kappa} \frac{u_*}{V_{ср}}$, для провер-

ки полученных соотношений были использованы опытные данные И. Никурадзе по распределению скоростей в гладких [5] и шероховатых трубах [6], данные лабораторных измерений в широких гладких и шероховатых каналах, а также данные натурных измерений МИСИ, ВНИИГиМ и Гидропроекта, выполненных на прямолинейных участках рек различной водности. При обработке опытов И. Никурадзе $V_{ср}$ определялась интегрированием профилей скорости, при этом $V_{ср}$ отличалась от $V_{ср}$, определенной И. Никурадзе по расходу. Для открытых потоков в лабораторных и натурных условиях $V_{ср}$ определялась интегрированием эпюры скорости по глубине.

Чтобы избежать априорных гипотез о величине и поведении параметра Кармана, при обработке данных измерений в трубах, в широких лабораторных каналах и натурных измерений в речных потоках по данным измерений распределения скоростей во всех случаях находилось уравнение линии тренда

в координатах $u = \frac{u_*}{\kappa} \ln y + C$, по угловому коэф-

фициенту которой определялась величина $\frac{u_*}{\kappa}$, входящая в $\varphi(n)$.

Результаты обработки опытов И. Никурадзе (рис. 1), данные для лабораторных гладких и шероховатых каналов (рис. 2) и данные натурных измерений на реках (рис. 3) обнаруживают удовлетворительную сходимость с расчетными зависимостями (11) и (12). Некоторое расхождение может быть связано с приближенным характером использованных соотношений и преобразований, а для натурных потоков — со сложностями измерений в натурных условиях.

Таким образом, можно считать, что опытные данные для гладких и шероховатых труб могут быть аппроксимированы следующей зависимостью:

$$\frac{n_T \kappa}{\sqrt{\lambda}} = \frac{0,95}{\sqrt{8}} = 0,337. \quad (13)$$

Для открытых лабораторных широких каналов и речных русел:

$$\frac{n_{п} \kappa}{\sqrt{\lambda}} = 0,312 \dots 0,355. \quad (14)$$

Сопоставляя зависимости (13) и (14), полученные на основании обработки большого и представительного массива разнообразных опытных данных, можно заключить, что комплекс $n\kappa/\sqrt{\lambda}$, объединяющий кинематические и динамические характеристики напорных осесимметричных и открытых безнапорных широких потоков (при относительной ширине более 7), является инвариантом, значение которого для всех случаев колеблется от 0,312 до 0,355 и остается близким к $1/\sqrt{8}$.

Полученный инвариант, являющийся универсальной характеристикой течения и сопротивления открытых и напорных потоков, может быть использован при решении различных задач гидравлики гидротехнических сооружений.

Список литературы

1. *Альтшуль А. Д.* Гидравлические сопротивления. — 2-е изд., доп. и перераб. — М.: Недра, 1982.
2. *Лятин В. Ю.* Гидравлическое сопротивление неравномерных плавноизменяющихся и равномерных потоков в открытых руслах: Монография. — М.: Экспресс-полиграфия МГСУ, 2004.
3. *Скребков Г. П.* Пропускная способность прямоугольного канала с разной шероховатостью боковых стенок: Межвуз. науч. сборник. — Саратов: СПИ, 1975. С. 148 – 154.
4. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя: Пер. с нем. — М.: Наука, 1974.
5. *Никурадзе И.* Закономерности турбулентного движения жидкостей в гладких трубах. Проблемы турбулентности // Сб. переводных статей / Под ред. М. А. Великанова и Н. Т. Швейковского. — М.-Л.: ОНТИ, 1936. С. 75 – 150.
6. *Nikuradse J.* Stromungs gesetze in rauhen Rohren. Verein Deutscher Ingenieure Forschungsheft. № 361, 1933.

Использование математического планирования эксперимента при проектировании и строительстве грунтовых сооружений

Жеребятъев А. В., кандидат техн. наук
(Национальный университет водного хозяйства
и природопользования, г. Ривне, Украина)

На примере грунтовых сооружений Днестровской ГАЭС рассмотрены возможности применения методов планирования эксперимента для уточнения характеристик грунтов в сооружении и оптимизации геотехнического контроля, конструкции и технологии. Предложены новый способ определения нормативных и расчетных характеристик грунтов в насыпи и метод геотехнического контроля.

Ключевые слова: грунтовые сооружения, характеристики грунтов, многофакторные расчеты, математическое планирование эксперимента, “гибкий” гидротехнический контроль.

Увязка проекта грунтового сооружения со свойствами грунтов в разведанных карьерах является актуальной проблемой. При этом большую роль играет назначение соответствующих характеристик грунтов.

Согласно действующим СНиП [1] нормативные и расчетные значения характеристик грунтов (прочность, деформационные и фильтрационные показатели) следует устанавливать посредством статистической обработки результатов полевых и лабораторных исследований. Плотность сложения грунта в земляных насыпных, каменно-земляных и каменнонабросных плотинах, в свою очередь, следует назначать с учетом:

- свойств грунтового материала и расположения его в теле плотины (как по высоте, так и по элементам профиля);
- внешних нагрузок;
- напряженно-деформированного состояния;
- способа отсыпки и уплотнения грунтового материала и интенсивности возведения.

Плотность сложения грунта рекомендуется назначать переменной по высоте плотины. При этом, учитывая изменение его физико-механических свойств в процессе строительства и эксплуатации сооружения, более плотный грунт необходимо размещать в нижней части плотины.

Однако в нормах не определены практические приемы и рекомендации, указывающие, как осуществить увязку неоднородности грунтов с технологией возведения и работой конструкции плотины и как достигнуть оптимальности при решении этих задач. На практике часто невозможно добиться установленной проектом плотности для всего объема карьерного грунта. Иногда при проектировании назначается заниженная величина плотности.

Не принижая полезность существующих подходов к проектированию (метод аналогии, физическое и математическое моделирование), рассмотрим решение этих задач с точки зрения непосредственной количественной оценки свойств грунтов,

связанных с работой конструкции плотины или противодиффузионного элемента, на основе многофакторных эмпирических данных.

Многофакторный анализ на основе математического планирования эксперимента (МПЭ) — это тот инструмент, который позволяет использовать физические показатели грунта, его зерновой состав, влажность, минеральный состав для того, чтобы представить, какими будут основные показатели, определяющие работоспособность сооружения, т.е. его прочность, устойчивость откосов и т.д. Для этой оценки и нужны расчетные показатели, количественно связанные с физическими свойствами грунтов, технологией и напряженным состоянием материала в сооружении.

Профессор Л. Н. Рассказов решил задачу оптимизации конструкции грунтовых плотин на стадии проектирования [2]. Он варьировал расчетными характеристиками грунтов, прочностными и деформационными. Однако эта задача требует определения прочностных и деформационных характеристик с учетом их природной физической неоднородности и технологических, производственных факторов. В настоящей работе на примере грунтовых сооружений Днестровской ГАЭС показано, насколько разброс физических природных показателей влияет на расчетные параметры, и как увязать решение этих вопросов.

В 1989 г. вышли Рекомендации [3], имеющие более широкое методическое значение, представляющие практический интерес для возведения разнообразных грунтовых сооружений (плотины, дамбы хвостохранилищ, золоотвалы, искусственные территории) разными способами — отсыпкой, намывом с применением и без применения технической мелиорации и из разных грунтов — от крупнообломочных до тонкодисперсных — при их повышенной неоднородности. Однако проектные организации, насколько известно автору, пока избегают применять данную методику. Причиной тому, очевидно, являются отсутствие у проектантов и изы-

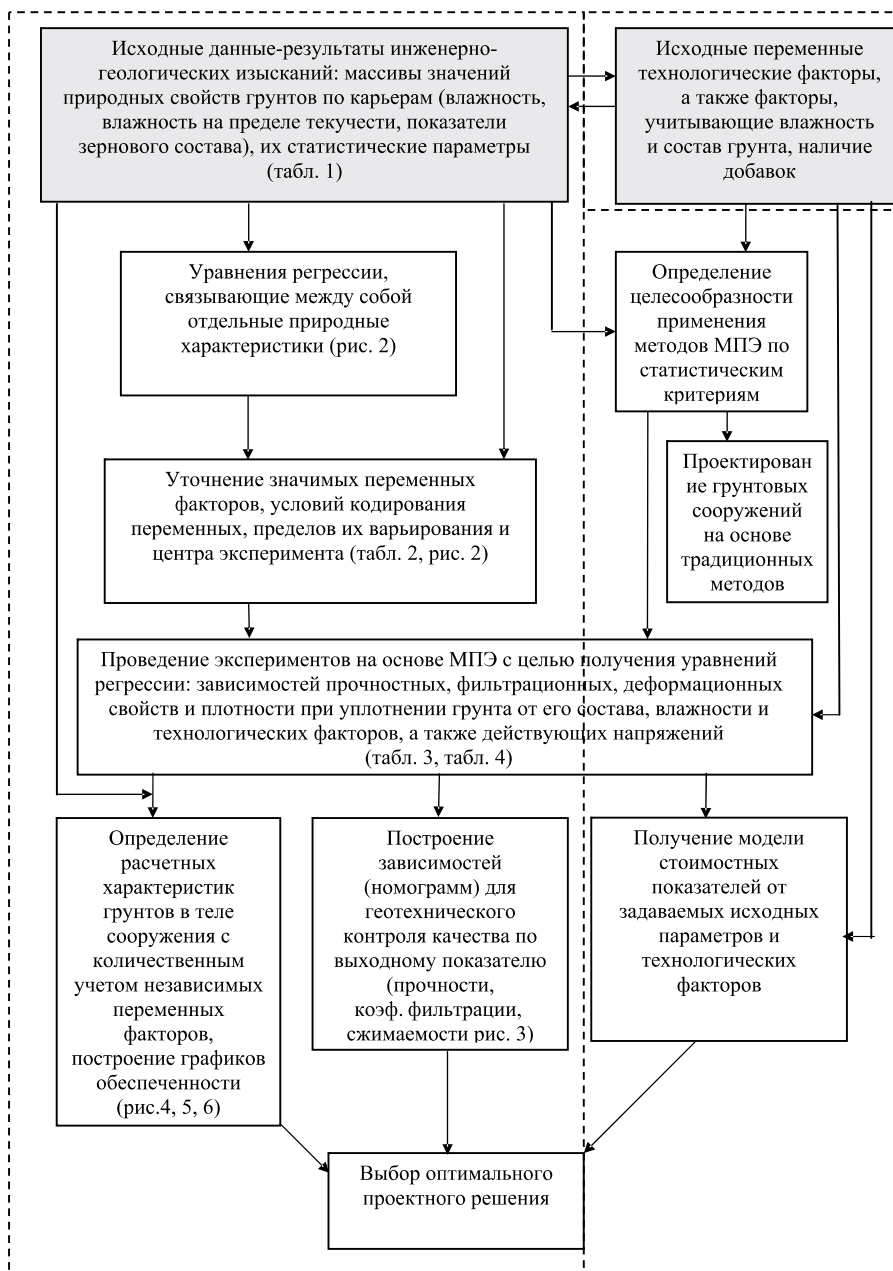


Рис. 1. Структурно-логическая схема многофакторного проектирования грунтовых сооружений на основе МПЭ (пунктиром ограничена часть действий, рассмотренных в данной статье)

скателей навыков в использовании МПЭ на практике и определенная инертность мышления.

Днестровская ГАЭС, одна из крупнейших в мире, строится в Черновицкой области на р. Днестре с 1983 г. Основными функциями Днестровской ГАЭС является регулирование частоты и графика нагрузки в энергосистеме Украины, а также формирование аварийного резерва электроэнергии. Проектом Днестровской ГАЭС предусмотрено введение семи агрегатов суммарной мощностью 2268 МВт в турбинном и 2947 МВт в насосном режиме. По масштабности это шестая ГАЭС в мире и самая мощная в Европе.

Грунтовые сооружения Днестровской ГАЭС входят в состав верхнего бассейна, размещенного

на плато на высоте более 140 м над уровнем воды в р. Днестре, представлены дамбой длиной 7,5 км, высотой 20–25 м и глинистым экраном. Общая площадь верхнего бассейна ГАЭС составляет 250 га. От надежности экрана и дамб зависит не только безаварийная работа гидроагрегатов ГАЭС, но и устойчивость днестровского склона, а значит, и безопасность гидроэнергетического объекта в целом.

Сейчас для ввода в действие первого агрегата Днестровской ГАЭС создана часть верхнего бассейна, которая отделена от остальной части временной дамбой. Положение временной дамбы позволяет обеспечить эксплуатацию первой очереди ГАЭС — трех агрегатов. Общий объем земляных работ для возведения первой очереди сооружений

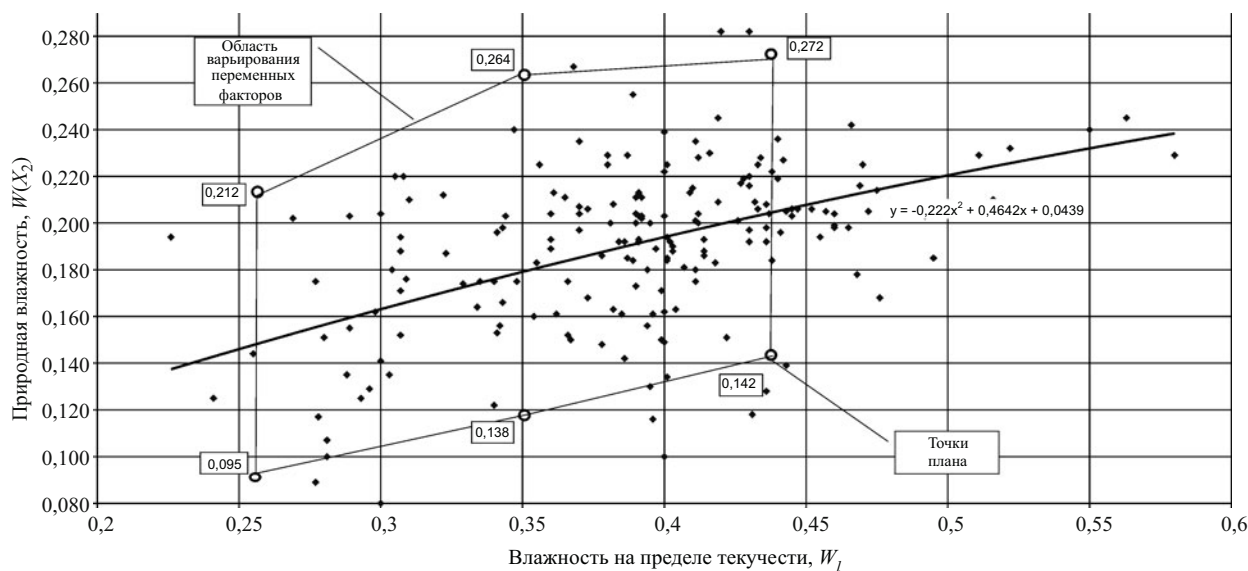


Рис. 2. Точечный график зависимости природной влажности грунта (данные изысканий) от влажности на пределе текучести, план эксперимента по определению коэффициента фильтрации

верхнего бассейна ГАЭС составил примерно 15 млн. м³ грунта.

В ходе изыскательских и проектных работ установлено, что основным фактором, который в первую очередь обеспечивает надежную и безопасную эксплуатацию верхнего бассейна Днестровской ГАЭС, является водонепроницаемость глинистого экрана, и, как следствие, недопущение обводнения днестровского склона на участке основных сооружений.

Конструкция экрана верхнего бассейна Днестровской ГАЭС представляет собой двухметровый слой уплотненного глинистого грунта, который укладывается на бетонную подготовку толщиной 0,5 м на известняковом основании. Уплотнение грунтов в начальной стадии строительства экрана (1987 – 1995 г.) осуществлялось катками статического действия давлением $\sigma = 0,5 \dots 1,0$ МПа до

плотности $\rho_d \geq 1650$ кг/м³ при обеспеченности $p = 90$ % в соответствии с проектом. Коэффициент фильтрации грунта при этом составляет $k_f \leq 1 \cdot 10^{-8}$ см/с. Такое значение коэффициента фильтрации обусловлено необходимостью поддержания природного склона в состоянии равновесия по результатам моделирования процесса фильтрации (для обеспечения сухого состояния откоса).

В зоне размещения полезных выемок верхнего водоема Днестровской ГАЭС залегают четвертичные золово-делювиальные $eo-d Q_4$, делювиально-пролювиальные $d-p Q_{2-3}$ супеси, суглинки и глины, а также неогеновые аллювиальные aN_2^3 глины, которые переходят ниже в песчано-гравийный грунт древнего русла Днестра. Толщина четвертичных отложений — от 2 до 30 – 40 м (в оврагах и балках), неогеновых — 3 – 10 м. Характерной осо-

Т а б л и ц а 1

Статистические характеристики свойств суглинков $eo-dQ_{2-3}$, $d-pQ_{3-4}$, предназначенных для экрана верхнего бассейна Днестровской ГАЭС, полученные по данным изысканий

Показатель	Количество опытных точек n	Среднее значение X_n	Дисперсия S^2	Среднеквадратическое отклонение S	Коэффициент вариаций V
Влажность W , доли ед.	190	0,190	0,0014	0,0378	0,198
Число пластичности I_p , доли ед.	190	0,199	0,0024	0,0488	0,246
Влажность на пределе текучести W_L , доли ед.	190	0,391	0,0039	0,0621	0,159
Содержание песчаных частиц, %	22	24,2	220,8	14,5	0,599
Содержание пылеватых частиц, %	22	48,8	135,2	11,4	0,233
Содержание глинистых частиц, %	22	27,4	64,5	7,8	0,286

Условия планирования эксперимента по определению уплотняемости и коэффициента фильтрации и сопротивления сдвигу грунтов экрана верхнего бассейна Днестровской ГАЭС

Независимые переменные	Формулы перехода к кодированным величинам	Уровни варьирования переменных			Интервал варьирования	
		При влажности на пределе текучести	- 1	0		+ 1
Определение уплотняемости						
Уплотняющее давление σ_c , МПа	$X_1 = \frac{\sigma - 0,6}{0,4}$	-	0,2	0,6	1,0	0,4
Влажность W , доли ед.	$X_2 = \frac{1}{0,27} \left(\frac{W}{0,207 - 0,293W_L + 0,642W_L^2} - 1 \right)$	0,438	0,148	0,202	0,256	0,054
		0,350	0,134	0,183	0,233	0,051
		0,256	0,127	0,174	0,222	0,048
Влажность на пределе текучести W_L , доли ед.	$X_3 = \frac{W_L - 0,347}{0,091}$	-	0,256	0,347	0,438	0,091
Определение коэффициента фильтрации						
Плотность сухого грунта ρ_d , кг/м ³	$X_4 = \frac{\rho_d - 947 - 354W_L + 4785W_L^2}{100}$	0,438	1480	1580	1680	100
		0,350	1500	1600	1700	100
		0,256	1440	1540	1640	100
Коэффициент водонасыщения S_r , доли ед.	$X_5 = \frac{S_r + 1,396 - 11,147W_L + 14,162W_L^2}{0,13}$	0,438	0,64	0,77	0,90	0,13
		0,350	0,64	0,77	0,90	0,13
		0,256	0,40	0,53	0,66	0,13
Определение сопротивления сдвигу (карьер Волошково, для откосной части экрана дамб)						
Нормальные напряжения σ , кПа	$X_{10} = \frac{\sigma - 200}{100}$	-	100	200	300	100
Влажность на пределе текучести, W_L	$X_3 = -238,65W_L^2 + 167,33W_L - 28,242$	-	0,257	0,283	0,37	0,026 0,087

бенностью грунтов, предназначенных для укладки в сооружения верхнего бассейна Днестровской ГАЭС, является неоднородность их зернового состава, влажности, а следовательно, механических свойств и проницаемости в насыпи экрана и дамб. Характеристики грунтов представлены в табл. 1.

В начале строительства экрана верхнего бассейна выяснилось, что достигнуть проектного значения плотности и коэффициента фильтрации в теле экрана во всем объеме карьерного грунта невозможно вследствие его неоднородности. Ответственность сооружений предопределила необходимость поиска технологических приемов для повышения плотности грунта: применение более тяжелых катков, катков с вибрацией, обработка грунтов на карте отсыпки, отсыпка грунтов в воду, кондиционирование грунтов в промежуточных кавалье-

рах, а также конструктивных мероприятий — использование водонепроницаемых мембран. С другой стороны была учтена многофакторная зависимость влияния переменного состава глинистого грунта, влажности и плотность на коэффициент фильтрации грунта в экране. Применительно к откосным частям экрана дамб в качестве определяющих рассматривались также прочностные свойства грунтов.

Коэффициент фильтрации в теле экрана, определенный полевыми методами (28 наливов), по данным Укргидропроекта составляет $k_f = 1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-8}$ см/с. Оптимальная плотность находится в пределах $\rho_d^{opt} = 1,66 \dots 1,78$ г/см³, оптимальная влажность $W^{opt} = 0,16 \dots 0,21$ (27 опытов). Прочностные характеристики (карьер Волошково), угол

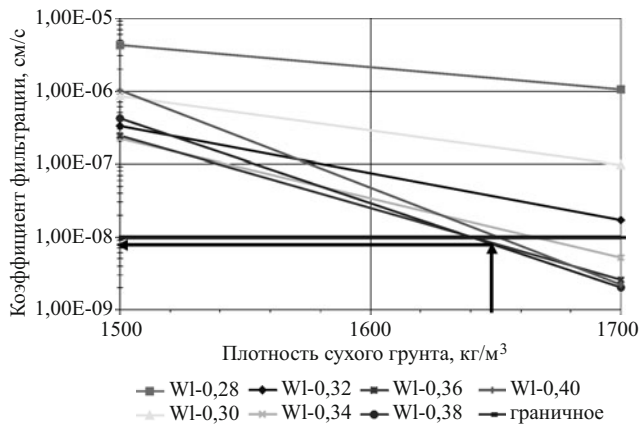


Рис. 3. Зависимость коэффициента фильтрации от плотности сухого грунта и влажности на пределе текучести

внутреннего трения $\varphi = 22 \dots 28^\circ$, удельное сцепление $C = 18 \dots 27$ кПа по данным НУВП.

Структурно-логическая схема многофакторного проектирования, отработанная в процессе строительства верхнего бассейна Днестровской ГАЭС, представлена на рис. 1.

Опыт применения планирования эксперимента [3, 4] в исследованиях грунтов и опыт многофакторного учета свойств грунтов при проектировании показывают, что целесообразность их применения (на основе статистических гипотез и критериев) определяется неоднородностью природных свойств в объеме разведанного карьера. Целесообразно проводить многофакторный анализ уже при коэффициенте вариаций основных физических свойств в природных карьерах, от которых зависят проч-

ность, деформации или фильтрационная способность, имеющих значение $V \geq 0,1$. Как видно из табл. 1, величина коэффициента вариаций показателей грансостава, влажности на пределе текучести и влажности, т.е. тех свойств, от которых зависит плотность в сооружении, водонепроницаемость и прочность грунта [5], превышает эту величину. Таким образом, есть основания использовать в данном случае МПЭ для раскрытия неопределенностей и уточнения влияния технологических факторов на конечные свойства грунта.

Пределы варьирования переменными факторами (влажность $W(X_2)$ и влажность на пределе текучести $W_L(X_3)$, табл. 2) задавались исходя из рассеяния опытных точек, полученного при изысканиях (рис. 2). Выбор этих пределов осуществлялся исходя из условия максимального охвата областью варьирования переменных природных свойств грунтов и возможностей изменения их в сооружении. (При этом область высоких значений влажности на пределе текучести ограничена величиной 0,438, выше которой водопроницаемость грунта в экране будет заведомо меньше требуемой величины при обеспечении монолитной структуры сложения грунта.)

Следует отметить, что свойство МПЭ назначать область переменных независимых факторов существенно отличает его от обычного ("пассивного") эксперимента, у которого данная возможность отсутствует. Поэтому независимые исходные переменные (влажность, влажность на пределе текучести, плотность сухого грунта $\rho_d(X_4)$) в последнем

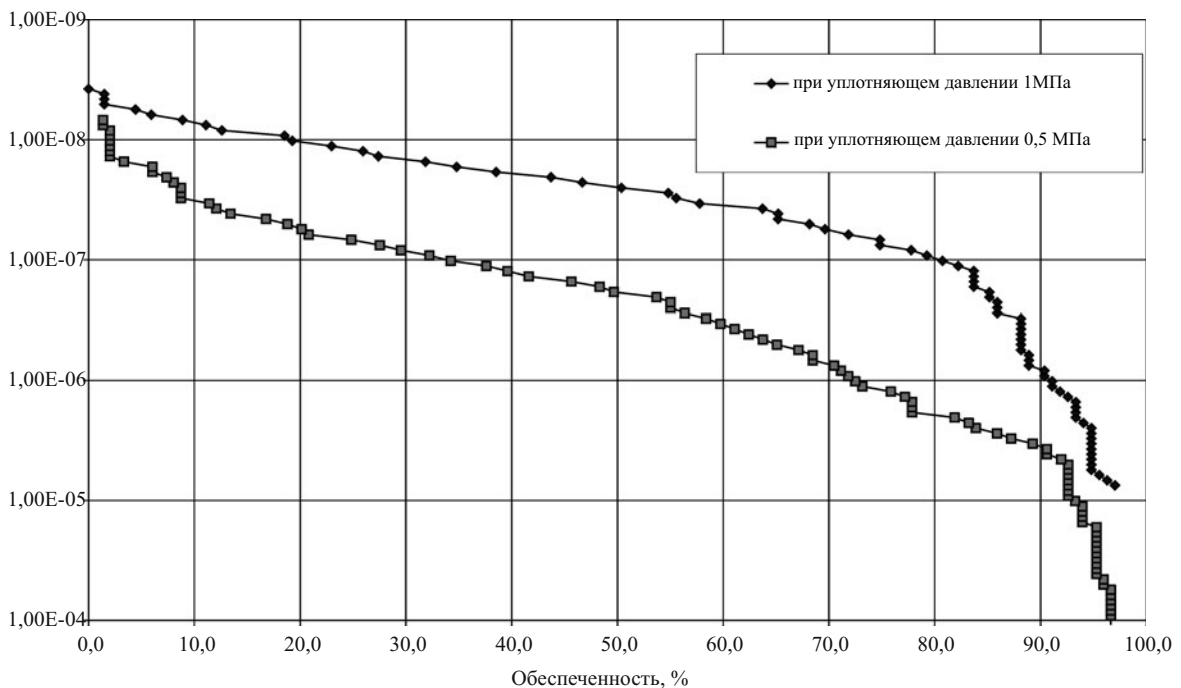


Рис. 4. Графики обеспеченности коэффициента фильтрации грунтов карьера Волошково (предназначенных для наклонной части экрана дамб)

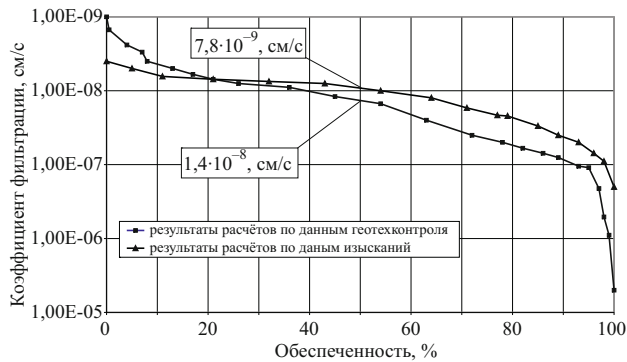


Рис. 5. Прогнозируемые графики обеспеченности коэффициента фильтрации грунтов в горизонтальной части экрана верхнего бассейна Днестровской ГАЭС

случае назначаются случайным образом, а результаты опытов не имеют той представительности, как при использовании МПЭ и могут иметь смещенные значения относительно фактических физических свойств грунтов в сооружении.

Для получения количественных (полиномиальных) зависимостей были использованы ортогональные двухуровневые 2^k и трехуровневые 3^k (k — количество независимых переменных факторов) планы полного факторного эксперимента (табл. 3).

Эксперименты по лабораторному уплотнению грунтов проводили по методике циклических нагрузок [6]. Уплотняющее давление $\sigma_c(X_1)$ изменя-

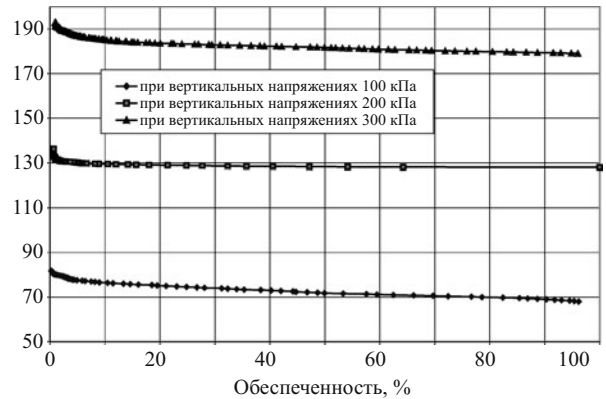


Рис. 6. Графики обеспеченности сопротивления сдвигу при одноплоскостном срезе для суглинков карьера Волошково

лось в пределах 0,2 – 1,0 МПа в соответствии с планом. Количество циклов уплотнения составляло 10. Влажность изменялась в пределах 0,14 – 0,30. Все эксперименты проводили в трех повторениях в каждой точке плана. Кроме того, уравнение (2) в табл. 4 получено в результате регрессионного анализа многофакторной статистической обработкой результатов опытного уплотнения грунтов в экране по методу наименьших квадратов. Полученные уравнения отражают известные из грунтоведения зависимости для связных грунтов (наличие оптимальной влажности и плотности).

Т а б л и ц а 3

Матрица планирования и результаты экспериментов по определению коэффициента фильтрации грунтов экрана верхнего бассейна Днестровской ГАЭС

Точки плана	Факторы		Влажность на пределе текучести W_L	Плотность ρ_d , кг/м ³	Влажность W , д. е.	Результаты эксперимента, коэффициент фильтрации, см/с			Выходной параметр $Y = -\ln k f$
	$X_4(\rho_d)$	$X_5(S_T)$				k_{f1}	k_{f2}	k_{f3}	
1	1	1	0,256	1640	0,156	$4,17 \cdot 10^{-5}$	$3,82 \cdot 10^{-5}$	$3,97 \cdot 10^{-5}$	10,129
2	-1	1	0,256	1440	0,212	$1,88 \cdot 10^{-4}$	$4,17 \cdot 10^{-5}$	$1,30 \cdot 10^{-4}$	8,951
3	1	-1	0,256	1640	0,095	$5,14 \cdot 10^{-5}$	$6,08 \cdot 10^{-5}$	$5,66 \cdot 10^{-5}$	9,792
4	-1	-1	0,256	1440	0,129	$2,42 \cdot 10^{-4}$	$2,58 \cdot 10^{-4}$	$2,49 \cdot 10^{-4}$	8,295
5	1	1	0,350	1700	0,194	$5,22 \cdot 10^{-9}$	$4,19 \cdot 10^{-9}$	$4,36 \cdot 10^{-9}$	19,291
6	-1	1	0,350	1500	0,264	$3,35 \cdot 10^{-9}$	$6,04 \cdot 10^{-9}$	$4,53 \cdot 10^{-9}$	19,220
7	1	-1	0,350	1700	0,138	$2,82 \cdot 10^{-8}$	$3,85 \cdot 10^{-8}$	$3,32 \cdot 10^{-8}$	17,229
8	-1	-1	0,350	1500	0,188	$7,44 \cdot 10^{-6}$	$7,77 \cdot 10^{-6}$	$1,50 \cdot 10^{-7}$	13,096
9	1	1	0,438	1680	0,200	$3,98 \cdot 10^{-9}$	$6,91 \cdot 10^{-9}$	$5,31 \cdot 10^{-9}$	19,066
10	-1	1	0,438	1480	0,272	$4,64 \cdot 10^{-4}$	$9,08 \cdot 10^{-5}$	$5,90 \cdot 10^{-4}$	8,139
11	1	-1	0,438	1680	0,142	$2,01 \cdot 10^{-*}$	$1,35 \cdot 10^{-8}$	$1,66 \cdot 10^{-8}$	17,922
12	-1	-1	0,438	1480	0,194	$9,51 \cdot 10^{-6}$	$2,71 \cdot 10^{-6}$	$2,65 \cdot 10^{-5}$	11,641

Уравнения регрессии (полиномиальные модели), которые были получены в результате опытов по методам планированного эксперимента и на основе регрессионного анализа

№ п/п	Математическая модель	Уравнение регрессии	Статистические критерии			
			S_1^2	S_2^2	$F_{и}$	$F_{табл}$
1	Зависимость плотности сухого грунта от влажности на пределе текучести, влажности и уплотняющего давления	$\rho_d = 1572,8 + 73,1X_1 + 86,8X_2 - 17,5X_3 - 24,2X_1^2 - 15,3X_2^2 - 4,0X_3^2 - 45,8X_1X_2 + 33,9X_1X_3 + 20,7X_2X_3$	3186	13105	4,1	2,1
2	* Зависимость плотности сухого грунта от влажности на пределе текучести и влажности	$Y = -0,004 - 0,676X_2 + 0,006X_3 - 0,305X_2^2 + 0,026X_3^2 + 0,115X_2X_3$	3142	387	8,1	1,3
3	Зависимость коэффициента фильтрации от влажности на пределе текучести, плотности и коэффициента водонасыщения	$Y = 17,21 + 0,57X_5 + 2,01X_4 + 2,45X_3 + 0,001X_5^2 + 0,001X_4^2 - 5,470X_3^2 + 0,02X_4X_5 + 0,42X_5X_3 + 1,82X_4X_3$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$	7,6	5,9
4	Зависимость сопротивления сдвигу от влажности на пределе текучести и действующих нормальных напряжений	$\tau = 125,4 + 0,5X_3 + 54,3X_{10} + 2,9X_3^2 - 2,1X_{10}^2 - 3,3X_3X_{10}$	15,2	2220	146	3,8

* X_1 — уплотняющее давление при циклической нагрузке (кодированное значение); X_2 — влажность (кодированное значение), $X_2 = W - 0,2282/0,226$; X_3 — влажность на пределе текучести (кодированное значение), $X_3 = W_L - 0,3849/0,366$; X_4 — плотность сухого грунта (кодированное значение); X_5 — начальное значение коэффициента водонасыщения (кодированное значение); X_{10} — нормальные напряжения (кодированное значение); $Y = -\ln k_f$, $Y = \frac{\rho_d - 1,6148}{0,520}$; k_f — коэффициент фильтрации; S_1^2 — дисперсия адекватности; S_2^2 — дисперсия относительно общего среднего.

Эксперименты по определению коэффициента фильтрации выполнялись по действующей методике [7] на приборе Ф-1М. Влажность $W(X_2)$, влажность на пределе текучести $W_L(X_3)$, плотность сухого грунта $\rho_d(X_4)$ задавались в соответствии с планом (табл. 3). Прикладывался градиент напора, который равнялся среднему его значению в конструкции экрана $I = 6,0$. В процессе измерения объема воды, которая профильтровалась через образец грунта, вводили температурную поправку. Результаты экспериментов в виде полиномиального уравнения (3) представлены в табл. 4. Это уравнение отражает известную зависимость изменения коэффициента фильтрации от плотности и влажности на пределе текучести. Графическая интерпретация данного уравнения представлена на рис. 3.

Для грунтов, предназначенных к укладке в наклонную часть экрана дамб (карьер Волошково), определялась также зависимость прочности на сдвиг от влажности на пределе текучести и нормальных сжимающих напряжений $\sigma(X_{10})$ (табл. 2, 4).

Опыты во всех случаях проводились с грунтами, отобранными непосредственно в забоях карьеров. Высыхания проб грунтов не допускалось.

В процессе получения полиномиальных уравнений производилась проверка значимости коэффициентов полиномов, статистических критериев однородности дисперсии Кохрена, адекватности и информационной способности Фишера [3, 4]. Статистические параметры уравнений имеют оптимальную величину.

Полученные уравнения имеют вид неполных квадратичных полиномов (табл. 4), которые и использовались в качестве управляющих уравнений для решения поставленных задач. В рассматриваемом случае на основании этих уравнений определялись нормативные и расчетные значения коэффициента фильтрации грунта, прочности на сдвиг в теле экрана Днестровской ГАЭС, а также построение расчетных графиков обеспеченности.

Прогнозирование свойств грунтов, которые укладывались в горизонтальную и наклонные части экрана верхнего бассейна Днестровской ГАЭС,

осуществлялось по данным изысканий и геотехнического контроля на начальной стадии строительства. Для построения графиков обеспеченности прогнозируемых характеристик грунтов и определения их расчетных значений использовалась следующая методика. Для каждой пары частных значений влажности $W_i(X_{2i})$ и влажности на пределе текучести $W_L(X_{3i})$ из выборок данных изысканий по формулам (1), (2) из табл. 4 путем их подстановки в это уравнение рассчитывалось значение плотности сухого грунта в соответствии с результатами экспериментов по уплотняемости на основе МПЭ. При этом моделировались переменные значения уплотняющей нагрузки $\sigma_c(X_1)$ и различные значения влажности грунта и влажности на пределе текучести. Затем для каждой пары значений рассчитывалась величина коэффициента водонасыщения грунта. После этого по формуле (3) табл. 4 теперь уже для каждой тройки значений влажности на пределе текучести, плотности и коэффициента водонасыщения $S_{ri}(X_{5i})$ рассчитывалось значение коэффициента фильтрации грунта. Кодирование и декодирование значений переменных осуществляли по формулам из табл. 2. В результате этих расчетов получен массив значений коэффициента фильтрации грунта и сопротивления сдвигу, по которому производилось построение прогнозируемых графиков обеспеченности при различных технологических факторах и переменных природных параметрах (уплотняющее давление $\sigma_c(X_1)\sigma$ или влажность, рис. 4; сжимающие напряжения $\sigma(X_{10})$ рис. 6).

Нормативное значение коэффициента фильтрации (или другой характеристики, которая рассчитывается по полиномиальным уравнениям) определяли по формуле

$$\hat{Y}_n = \frac{1}{n} \int_{i=1}^n \hat{Y}_i,$$

где \hat{Y}_i — значение характеристики, которое находится по полиномиальному уравнению (табл. 4) при данных значениях независимых переменных факторов (X_{ui}); n — количество опытных точек, включающее весь объем изысканий; i — порядковый номер независимого переменного фактора.

Количественная оценка коэффициента фильтрации грунта в теле экрана показала, что расчетное значение, полученное по данным геотехнического контроля, несколько больше значения, полученного при моделировании уплотнения грунта в опытах и дальнейшего расчета по полиномиальным моделям (рис. 5). При обеспеченности 50 % имеем соответственно $1,4 \cdot 10^{-8}$ см/с для данных геотехконтроля и $7,8 \cdot 10^{-9}$ см/с — прогнозированное значение по

данным изысканий, что не удовлетворяло требуемому значению при моделировании фильтрации из условия необводнения днестровского склона $k_f \leq 1 \cdot 10^{-8}$ см/с при 90 %-ной обеспеченности. В результате этой оценки было рекомендовано переработать верхний (метровый) слой грунта экрана и уложить его с уплотнением вибрационными катками. Такое решение обосновано также и тем, что в результате длительного лежания незащищенного экрана (в период экономического упадка 1995 – 2001 гг.) в его поверхностном слое образовались трещины выветривания.

Для откосных частей экрана дамб определяющим параметром в первую очередь является прочность грунта. Для построения соответствующей математической модели были проведены опыты и получен полином (4) (табл. 4). Данное уравнение позволило существенно уточнить угол внутреннего трения и удельное сцепление, а также провести поверочные расчеты устойчивости с учетом реальных значений плотности, влажности и влажности на пределе текучести.

В дальнейшем находили нормативные и расчетные значения угла внутреннего трения и удельного сцепления по найденным величинам сопротивлений сдвигу. Для этого в полином (4) (табл. 4) подставлялись значения влажности на пределе текучести $W_L(X_{3i})$ из данных изысканий. В результате построены графики обеспеченности сопротивления грунта сдвигу (рис. 6) и найдены расчетные значения угла внутреннего трения и удельного сцепления, которые составляют $\varphi_n = 21,3^\circ$, $c_n = 23,8$ кПа. При этом коэффициент надежности для грунта, найденный для этих случаев, составляет $\gamma_g = 1,004 \dots 1,03$, в то время как при стандартном подходе этот коэффициент $\gamma_g = 1,15 \dots 1,5$. Таким образом, многофакторные расчеты характеристик прочности грунта позволяют повысить надежность определения расчетных показателей и вместе с тем надежность расчетов грунтовых сооружений по первой группе предельных состояний.

Среди преимуществ данного способа определения нормативных характеристик следует отметить: количественный учет всей совокупности физических характеристик, полученных при лабораторном изучении свойств грунтов в процессе изысканий (которые при традиционном способе имеют лишь вспомогательное значение); максимальное приближение нормативного значения к величине математического ожидания искомой характеристики; снижение величины общей дисперсии вследствие центрирования массива данных физических свойств, т.е. увеличение точности определения расчетной характеристики.

Немаловажным аспектом применения МПЭ в практике строительства грунтовых сооружений из неоднородных грунтов является “гибкий” геотехнический контроль. Он заключается в том, что для неоднородных грунтов в качестве контрольного параметра использовалось не фиксированное значение плотности грунта, а значение показателя, определяющего работоспособность грунта, в данном случае — коэффициент фильтрации $k_f \leq 1 \cdot 10^{-8}$ см/с. В случае горизонтального экрана Днестровской ГАЭС использовалось уравнение (3) из табл. 4. С этой целью плотность, влажность и влажность на пределе текучести определялись для каждого образца грунта, отобранного из насыпи, и для этих значений по формуле (3) (табл. 4) рассчитывали значение коэффициента фильтрации. Потом это значение сравнивали с величиной допустимого коэффициента фильтрации $k_f \leq 1 \cdot 10^{-8}$ см/с. Для удобства оперативного контроля проведена графическая интерпретация этой зависимости (рис. 3). Коэффициент фильтрации, удовлетворяющий проектным требованиям, может быть получен для правой нижней части данной номограммы.

Данный способ позволил существенно ускорить процесс отсыпки, поскольку перед этим приходилось останавливать отсыпку при получении плотности ниже 1650 кг/м^3 при “жестком” геотехническом контроле.

Выводы

1. МПЭ позволяет внести четкую логику в процесс определения статистически обоснованных расчетных характеристик грунта, определяющих его работоспособность в сооружении; формализовать условия проведения экспериментов с неоднородными карьерными грунтами и интерпретацию их результатов.

2. Эффективность применения МПЭ при проектировании и строительстве грунтовых сооружений достигается за счет:

количественной увязки природных физических свойств грунтов, значений плотности после уплот-

нения с водопроницаемостью, сопротивлением сдвигу и возможностью их регулирования;

существенно большей представительности в расчетных характеристиках данных изысканий;

увеличения точности определения расчетных характеристик при оптимальных затратах ресурсов.

3. Появляется возможность “гибкого” геотехнического контроля при отсыпке неоднородных грунтов по определяющему работоспособность параметру что облегчает процесс производства и контроля земляных работ.

4. Облегчается принятие обоснованных инженерных решений по выбору оптимальной технологии укладки грунтов и рациональному использованию местных грунтов.

5. Все перечисленное положительно сказывается на надежности расчетов, а значит, и самого сооружения.

Список литературы

1. СНиП 2.06.05-84*. Плотины из грунтовых материалов. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985.
2. Рассказов Л. Н., Орехова И. Л. Оптимизация конструкций грунтовых плотин // Гидротехническое строительство. 1985. № 7. С. 32 – 37.
3. Рекомендации по многофакторной оценке свойств грунтов, укладываемых в земляные сооружения: ПЗ6-87 / ВНИИГ. — Л.: Энергия, 1989.
4. Налимов В. В. Теория эксперимента. — М.: Наука, 1971.
5. Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Зиангиров Р. С. и др. Грунтоведение. — М.: МГУ, 1983.
6. Руководство по лабораторному определению оптимальных значений влажности и объемного веса скелета связных грунтов применительно к уплотнению катками: П08-73 / ВНИИГ. — Л.: Энергия, 1975.
7. Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость: 12 – 83 / ВНИИГ. — Л.: Энергия, 1983.
8. Жеребятьев А. В. Применение методов планирования эксперимента для оптимизации зависимости уплотняемости несвязных крупнообломочных грунтов от зернового состава // Энергетическое строительство. 1987. № 12. С. 39 – 42.
9. Стефанишин Д. В., Жеребятьев О. В. Оцінка надійності ґрунтових гідротехнічних споруд Дністровської ГАЕС // Вісник Національного університету водного господарства і природокористування. 2009. Ч. 1. С. 520 – 530.

Международный конгресс по эксплуатации и реконструкции гидроузлов

Асарин А. Е., доктор техн. наук, Борщ П. С., Юрьев С. В.,
инженеры (ОАО “Институт Гидропроект”)

В конце ноября 2010 г. в г. Сарагоса (Испания) состоялся II Международный конгресс, посвященный вопросам содержания, безопасной эксплуатации и реконструкции речных гидроузлов. Конгресс был организован испанским обществом “Плотины и водохранилища” и водной дирекцией Министерства по охране окружающей среды. В работе конгресса приняли участие более 350 специалистов из 23 стран.

На конгресс было направлено 136 докладов по трем ключевым направлениям: эксплуатация и периодическое техобслуживание ГТС, обеспечение регулирующей способности водохранилищ и управление водными ресурсами, устойчивость и состояние сооружений. Большинство докладов было представлено испанскими инженерами и исследователями. Много докладов представили иранские специалисты.

Каждый рабочий день конгресса начинался с доклада приглашенного лектора. Темы этих сообщений были далеко не тривиальными. Лекция “Сохранение и эксплуатация плотин как элементов культурно-исторического наследия и туристических объектов” была прочитана бразильским инженером Франсиско Родригес Андриоло, тесно сотрудничавшим со специалистами Гидропроекта при строительстве ГЭС Капанда в Анголе. Очень содержательным было сообщение г-на Этьена Фроссарда, технического директора известной консалтинговой фирмы “Coyné et Bellier”, о геологических и технических “сюрпризах” и трудностях при строительстве гидроузла Кудиаг-Асердун в Алжире. Профессор Каталонского политехнического университета г-н Эдуардо Альфонсо Перес де Агрета выступил с глубоким аналитическим обзором причин и процессов оползания берегов эксплуатируемых водохранилищ. В последний день работы конгресса было заслушано еще четыре специальные лекции: о влиянии летучих зол на долговечность бетона плотин, об исследованиях старения бетона, об использовании средств чрезвычайного оповещения и о некоторых конструктивных работах на гидроузлах в бассейне р. Тус.

Из 136 представленных докладов 36 (по 12 на каждой секции) было отобрано для устных презентаций. С такой презентацией на тему “О гидрологической безопасности Саяно-Шушенской ГЭС в период ее восстановления” выступил А. Е. Асарин.

Тематика опубликованных докладов включала следующие вопросы.

Секция 1:

законодательные акты и стандарты, их современный статус и будущие тенденции, соответствие существующих гидроузлов изменениям режимов их использования;

мониторинг, обследования, диагностика и оценка состояния ГТС;

сохранение и эксплуатация, периодические мероприятия в бассейне реки, в водохранилище и на гидроузле;

планирование экстренных затрат капиталовложений.

Секция 2:

управление водными ресурсами, глобальное изменение климата;

заиление водохранилищ и загрязнение отложений, действия по выполнению требований к количеству и качеству воды;

пропуск паводков и гидрологическая безопасность, поддержание в рабочем состоянии водопропускных устройств, повышение пропускной способности водосбросов и сопутствующие мероприятия.

Секция 3:

старые гидроузлы, их модификация в соответствии с современными стандартами и потребностями; текущие разрушительные процессы, долговременные и восстановительные мероприятия;

сейсмические воздействия на безопасность ГТС, мероприятия по приведению ГТС в соответствие с современными стандартами;

мероприятия по сохранению требуемого состояния водохранилищ, оснований сооружений и плотин (земляных, гравитационных, арочных и др.).

В связи с повышенным вниманием со стороны специалистов к вопросам надежности и безопасности гидротехнических сооружений наиболее содержательными оказались доклады о мониторинге и диагностике гидроузлов. В числе докладов по подтеме “Мониторинг и диагностика” следует отметить чрезвычайно интересное сообщение французских специалистов Arteres, Beck, Khan и др. “Оценка поведения плотин и дамб с помощью оптико-волоконных систем” и содержательный обзор неразрушающих методов исследования бетонных плотин, представленный американским инженером Larry D. Olson. Также заслуживает внимания док-

лад испанских инженеров Alberto Foyo и Angela Foyo об обследовании плотин, эксплуатируемых в Испании более 40 лет и не имеющих в достаточном количестве контрольно-измерительной аппаратуры для оценки общей безопасности сооружений. На основе обследования гидротехнических объектов в Испании разработана программа минимально необходимых наблюдений за состоянием сооружений. Доклад специалистов из Швейцарии Patrick de Goumoens и Brenda Quigley (Stucky Ltd.) “Реконструкция и усовершенствование мониторинга, обработка данных для высотной арочной плотины Ингури ГЭС (Грузия)”, также вызывает интерес.

Следует также отметить доклад испанских инженеров Rene Gomez Lopez de Munain, Mario Andreu и др. об управлении эксплуатацией и безопасностью более 53 плотин с помощью информационной системы “CEISER”, которая отслеживает основные показатели безопасности плотин и в случае аварийной ситуации на гидроузле оперативно оповещает заинтересованных лиц.

Наибольшее число докладов (22) было представлено по подтеме “Водопропускные устройства”. В основном они были посвящены ремонтам, реконструкциям и увеличению пропускной способности водосбросов и возможностям перелива воды через гребень плотин из местных материалов. Особый интерес представляет сообщение французского инженера Le Blanc и испанских инженеров Solano и Silva о первом в Южной Америке оборудовании гидроузла затворами “гидроплюс”, что позволило повысить противопаводковый эффект водохранилища гидроузла Урра в Колумбии.

Интересен, хотя и спорен, подход выдающихся испанских инженеров de Andres R-Trelles и Carazw Minguez к оценке гидрологической безопасности существующих плотин. В докладе авторы полемизируют с завышенными требованиями к безопасности ГТС.

В подтеме “Заиление водохранилищ”, примечательны доклады о физических и химических характеристиках донных отложений в водохранилище Ribarroja на р. Эбро и об оригинальном расчетном подходе иранских исследователей Sadat-Helbar и Vozorgzaden к оценке гидравлической крупности наносов. Эти материалы позволяют совершенствовать расчеты и прогнозы русловых процессов в водохранилищах.

Представляется весьма интересным и перспективным доклад иранских инженеров Bolouri Bazaz и Khadem об инструментальном обследовании и расчетных оценках поведения и напряженного состояния каменнонабросной плотины в период начального наполнения водохранилища.

Обращают на себя внимание инструментальное и расчетное исследование водопроницаемости

55-метровой гравитационной плотины Urdalur на р. Alzania в Наварре из укатанного бетона, по результатам которого намечены противофильтрационные мероприятия, и опыт противофильтрационного инъецирования, совершенствования системы дренажа и контроля противодавления на 28-метровой бетонной плотине Portbou в провинции Girona.

Кроме того, были крайне интересны и актуальны как с технической точки зрения, так и с позиций обмена опытом доклады, посвященные уже выполненным или ведущимся в настоящее время реконструкциям гидротехнических сооружений. Так, в докладе швейцарских специалистов Raphaël Leroу и Gaël Micoulet рассмотрена реконструкция арочной плотины Serra (Швейцария, Zwischbergen Valley, кантон Wallis), построенной в 1952 г. К 2009 г. смещение гребня плотины достигло порядка 60 мм. Из-за множественных трещин в теле плотины ее дальнейшая эксплуатация была невозможна. Поэтому приняли срочные меры по скорейшему восстановлению плотины, которые должны были завершиться к концу 2010 г.

На приуроченной к конгрессу выставке были представлены новейшие разработки фирм-производителей исследовательского оборудования и материалов, таких, например, как “Sika” или “Olson Instruments, Inc.”, которые вызвали живой интерес участников конгресса.

II Международный конгресс, посвященный вопросам содержания, безопасной эксплуатации и реконструкции речных гидроузлов, подвел итоги деятельности европейских проектировщиков и исследователей гидротехнических сооружений за последние годы и выявил актуальные темы, интересующие инженерное сообщество. В их числе такие, как использование речных гидроузлов в качестве объектов культурного наследия и туризма, применение информационных систем для обеспечения мониторинга гидротехнических сооружений, ужесточение требований к безопасности ГТС.

Оценивая работу конгресса в целом, следует отметить многообразие и глубину рассмотренных на нем вопросов, его хорошую организацию, качественную работу синхронистов. Около ста докладов испанских специалистов свидетельствуют о высоком техническом уровне проектирования, строительства и эксплуатации гидроузлов в Испании, располагающей наибольшим числом высоких плотин в Европе (более 1200).

Сборник трудов Международного конгресса по эксплуатации и реконструкции гидроузлов, включающий 90 докладов на испанском и 50 на английском языке, имеется в библиотеке института “Гидропроект”.

Поздравление Льву Алексеевичу Золотову

19 апреля 2011 г. исполняется 85 лет выдающемуся ученому, крупному организатору отечественной гидротехнической науки, заслуженному энергетику РФ, почетному академику Российской инженерной академии, профессору Льву Алексеевичу Золотову.

Начиная с 1948 г., после успешного окончания гидротехнического факультета Московского инженерно-строительного института им. В. В. Куйбышева, Лев Алексеевич работал в системе Минэнерго СССР, затем Минэнерго РФ и РАО “ЕЭС России”. За эти годы он прошел путь от инженера Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева до генерального директора Научно-исследовательского института энергетических сооружений РАО “ЕЭС России”. В течение многих лет Лев Алексеевич в должности профессора преподавал в Московском энергетическом институте.

Под руководством Льва Алексеевича проводились исследования и научное обоснование конструктивных и компоновочных решений основных сооружений, гидравлических режимов, строительных материалов, технологического оборудования большинства гидроузлов, сооружаемых в СССР и за рубежом, где при содействии Советского Союза осуществлялось гидроэнергетическое строительство. Среди этих объектов прежде всего следует назвать такие уникальные, как самая высокая в мире арочная плотина Ингури ГЭС, самая высокая в мире плотина из грунтовых материалов Нурекская ГЭС, Токтогульская ГЭС, при строительстве которой впервые в мировой практике гидроэнергетического строительства гидроагрегаты были расположены в два ряда. По предложению Льва Алексеевича компоновка гидроузла с двухрядным расположением гидроагрегатов была принята и реализована на ГЭС Лидзяся, построенной на р. Хуанхе в Китае.

Под руководством Льва Алексеевича и при его непосредственном участии получили научное обоснование и путевку в жизнь новые инженерные решения гидротехнических сооружений Братской, Усть-Илимской ГЭС на р. Ангаре, Красноярской и Саяно-Шушенской ГЭС на р. Енисее, а также Асуанской высотной плотины на р. Ниле в Египте, ГЭС Хоабинь на р. Да во Вьетнаме, Евфратского гидроузла на р. Евфрате в Сирии и многие другие.

Лев Алексеевич внес большой вклад в развитие атомной энергетики страны. Под его руководством и при его личном участии проводились исследования и были научно обоснованы новые инженерные решения основных сооружений крупнейших в



мире атомных электростанций с реакторами РБМК: Курской, Чернобыльской, Смоленской и других.

Лев Алексеевич как высококвалифицированный специалист в области гидравлических и гидроэнергетических исследований гидротехнических сооружений и оборудования в течение многих лет избирался вице-президентом Международной ассоциации по гидротехнике и гидравлическим исследованиям (МАГИ). Он является членом Международной комиссии по большим плотинам (ICOLD), членом редколлегии журнала

“Гидротехническое строительство”. В течение многих лет избирался в Тушинский районный Совет народных депутатов г. Москвы.

За выдающиеся достижения в области науки и техники Лев Алексеевич удостоен многих государственных и ведомственных наград Советского Союза, Российской Федерации, зарубежных государств. Он награжден орденом “Трудового Красного Знамени”, медалями “За доблестный труд в Великой Отечественной войне”, “За доблестный труд в ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина”, “Ветеран труда”. Ему присвоены высокие звания “Лауреат премии Совета Министров СССР”, “Заслуженный энергетик Российской Федерации”, “Заслуженный энергетик Государств Содружества”, “Почетный энергетик СССР”. За разработку и научное обоснование новых инженерных решений Лев Алексеевич награжден двумя золотыми, двумя серебряными и бронзовыми медалями ВДНХ СССР.

Лев Алексеевич — автор более 200 научно-технических трудов, в том числе монографий, учебных и методических пособий для студентов гидроэнергетических факультетов, научно-технических статей по наиболее актуальным проблемам современной энергетики. Имеет 13 зарубежных патентов и 11 изобретений в области гидроэнергетики и гидротехники.

В настоящее время Лев Алексеевич активно работает вице-президентом ассоциации “Гидропроект”, в СРО НП “ЭНЕРГОПРОЕКТ” возглавляет направление стандартизации и нормативно-методической документации, входит в состав руководящего органа Совета ветеранов энергетиков Минэнерго РФ.

Коллеги и друзья, научная и инженерная общественность, редколлегия и сотрудники журнала “Гидротехническое строительство” сердечно поздравляют Льва Алексеевича с юбилеем и желают ему крепкого здоровья и успехов в дальнейшей деятельности.

Поздравление Анатолию Евгеньевичу Александрову

2 марта 2011 г. исполнилось 80 лет со дня рождения Анатолия Евгеньевича Александрова — старшего бригадного инженера по наладке гидроэнергетического оборудования Центра инжиниринга гидроэлектростанций ОАО “Фирма ОРГРЭС”.

После окончания в 1954 г. гидроэнергетического факультета Московского энергетического института А. Е. Александров был направлен молодым специалистом в Государственный трест “ОРГРЭС”, где и трудится непрерывно в течение 56 лет. Уже самые первые работы, выполненные им в составе наладочных бригад ОРГРЭС на Усть-Каменогорской, Фархадской, Эзминской и других ГЭС, показали, что в отрасль пришел незаурядный талантливый инженер. В конце 1950-х гг. под его руководством впервые были проведены испытания гидротурбин в насосном режиме сначала на гидроагрегате Нижнесвирской, а затем на агрегате Верхнесвирской ГЭС мощностью 45 МВт. Эти испытания дали первые материалы для создания обратимых гидроагрегатов будущих ГАЭС.

Присущее молодому оргрэсовцу А. Е. Александрову стремление к глубоким знаниям по широкому кругу вопросов, связанным с эффективностью, надежностью и безопасностью действующего оборудования гидроэлектростанций, постоянный упорный труд по многостороннему исследованию гидроагрегатов сделали его одним из наиболее высококвалифицированных специалистов страны в области наладки и испытаний гидроэнергетического оборудования ГЭС. Под его руководством и при его участии были проведены работы по освоению и наладке гидроэнергетического оборудования на многих гидроэлектростанциях СССР.

Опыт проведенных вибрационных испытаний на многих ГЭС, начиная с гидроагрегатов Братской ГЭС с установленными на них временными рабочими колесами турбин, позволил отработать методику эксплуатационного контроля вибрации. В результате были разработаны и введены отраслевые нормативные документы по проведению эксплуатационного контроля вибрационного состояния гидроагрегатов.

В 60 – 70 гг. А. Е. Александров проводил широкие исследования работы подпятников гидрогенераторов на Братской, Усть-Илимской, Красноярской, Жигулёвской, Волжской, Саратовской, Воткинской, Днепродзержинской, Новосибирской, Плявиньской и других ГЭС. Был организован анализ опыта эксплуатации подпятников практически всех гидроэлектростанций страны. Начиная с конца 70-х - начала 80-х гг. XX в. А. Е. Александров активно участвовал в освоении и внедрении эластичных металлопластмассовых сегментов (ЭМП-сегментов) для подпятников гидроагрегатов совместно со специалистами Куйбышевского авиационного института, Чебоксарского завода “Энергозапчасть” и ряда ГЭС. После испытаний на ряде ГЭС и освоения производства



ЭМП-сегментов в течение короткого времени была проведена замена баббитовых сегментов на ЭМП-сегменты практически на всех ГЭС страны. В результате этой масштабной работы была решена проблема надежности подпятников гидрогенераторов - одного из самых повреждаемых в тот период узлов гидроагрегатов. На основе полученного опыта был выпущен ряд методических и нормативных документов по эксплуатации подпятников, требования и нормы которых действуют в настоящее время.

За успехи в трудовой деятельности, большой творческий вклад в развитие отечественной гидроэнергетики А. Е. Александров награжден орденом “Знак Почета”, медалями СССР и России. Он является почетным энергетиком, почетным гидроэнергетиком, заслуженным работником “ЕЭС России”, отмечен многими почетными отраслевыми знаками, медалями ВДНХ СССР. В 1985 г. за разработку тяжело нагруженных эластичных металлопластмассовых опор скольжения и внедрение их на гидроагрегатах крупнейших гидроэлектростанций коллективу специалистов, в том числе А. Е. Александрову, была присуждена Государственная премия СССР.

А. Е. Александров известен за пределами нашей страны. Его приглашали для выполнения работ и консультаций, связанных с исследованиями и наладкой гидроагрегатов ГЭС в Марокко, Чехию, Болгарию, Швецию; он участвовал в разработке международных стандартов по гидроэнергетическому оборудованию.

Опыт практических работ А. Е. Александрова отражен более чем в 60 опубликованных работах: журнальных публикациях, книгах, нормативно-технических документах. Им написана монография “Подпятники гидроагрегатов” (1975 г.), он участвовал в составлении “Справочника по ремонту и модернизации гидрогенераторов”. А. Е. Александров в течение многих лет является членом редколлегии журнала “Гидротехническое строительство”.

Свое 80-летие А. Е. Александров встречает на своем рабочем месте в фирме “ОРГРЭС”. За последние годы он выполнил большую работу по наладке гидроэнергетического оборудования на ряде ГЭС и ГАЭС в Болгарии, активно участвует в создании систем диагностики состояния гидроагрегатов для Жигулевской ГЭС и Загорской ГАЭС.

Высокая квалификация, творческий подход к решению сложных технических задач, необычайное трудолюбие, искреннее уважение к товарищам по работе создали А. Е. Александрову заслуженный авторитет среди отечественных и зарубежных гидроэнергетиков.

Редколлегия журнала “Гидротехническое строительство”, коллектив ОАО “Фирма ОРГРЭС”, друзья и коллеги сердечно поздравляют Анатолия Евгеньевича Александрова с юбилеем, желают ему крепкого здоровья, душевных сил, дальнейших творческих успехов в работе.

Завершение основной фазы строительства гидроузла “Три ущелья”; первый опыт эксплуатации

Золотов Л. А., Шайтанов В. Я., профессора (ассоциация “Гидропроект”)

Крупнейшая в мире гидроэлектростанция “Три ущелья” расположена в Китае на р. Янцзы близ г. Саньдоупин в провинции Хубей. Основными целями строительства ГЭС “Три ущелья” являются: выработка электроэнергии, улучшение условий судоходства и увеличение объема грузоперевозок по р. Янцзы, предотвращение разрушительных паводков в среднем и нижнем течении реки путем аккумулирования стока водохранилищем гидроузла.

Строительство плотины было закончено в 2006 г. За исключением судоподъемника, все сооружения, предусмотренные первоначальным проектом ГЭС “Три ущелья”, полностью построили к 30 октября 2008 г., когда 26-й гидроагрегат был введен в промышленную эксплуатацию. Каждый из 26 гидроагрегатов ГЭС имеет установленную мощность 700 МВт. Шесть дополнительных гидроагрегатов, установленных в подземном машинном здании, будут введены в эксплуатацию не ранее 2011 г. Таким образом, общее количество гидроагрегатов ГЭС “Три ущелья” достигнет 34, включая два небольших гидроагрегата по 50 МВт для собственных нужд гидроэлектростанции. Общая установленная мощность ГЭС “Три ущелья” составит 22,5 тыс. МВт (рис. 1).

С момента ввода в эксплуатацию первого агрегата 10 июля 2003 г. до сентября 2009 г. ГЭС “Три ущелья” выработала 348,4 млрд. кВт·ч электроэнергии, что позволило компенсировать более одной трети затрат на возведение гидроузла.

В Китае завершение основной фазы строительства гидроузла “Три ущелья” рассматривается как крупное достижение в инженерном и экономическом развитии народного хозяйства, в решении социальных проблем. Так, например, в ходе создания гидроузла китайские машиностроительные заводы освоили выпуск крупнейших в мире гидротурбин и гидрогенераторов; а с пуском ГЭС сделан существенный вклад в сокращение выбросов парниковых газов на замещаемых тепловых электростанциях. Вместе с тем создание гигантского гидроузла привело к утрате ряда археологических памятников, к затоплению многих освоенных территорий, к существенным изменениям в экологической обстановке на территории, примыкающей к гидроузлу; повысило опасность возникновения оползней по берегам созданного водохранилища. Общее количество людей, переселенных из зоны затопления водохранилища, достигло 1,3 млн. человек.

И в Китае, и за границей имеется как положительная, так и негативная оценка последствий строительства гидроузла “Три ущелья”. В частности, строительство гидроузла окажет негативное воздействие на со-

хранение популяции зимующего в Китае сибирского журавля (осталось 3–4 тыс. особей) и может способствовать исчезновению на р. Янцзы речного дельфина.

Идея строительства крупной гидроэлектростанции на р. Янцзы в районе трех ущелий была первоначально высказана Сунь Ятсеном в 1919 г. Он считал, что на р. Янцзы ниже трех ущелий может быть построена гидростанция мощностью 30 млн. л. с. (22,371 МВт). В 1932 г. правительство Чан Кайши начало подготовительные работы по строительству ГЭС, однако в 1939 г. японские войска оккупировали прилегающие районы и все работы были прекращены.

В 1944 г. главный инженер Бюро мелиорации США J. Savage предложил проект энергетического освоения ресурсов р. Янцзы, в США были направлены на стажировку 54 китайских инженера. Был выполнен ряд работ по схемам использования, изысканиям, экономическим оценкам и проектированию гидросооружений, однако в период гражданской войны в Китае китайское правительство в 1947 г. остановило все работы. После образования КНР в 1949 г. Мао Цзедун поддержал проект освоения р. Янцзы, но первоначальным объектом для строительства была принята ГЭС Гечжоуба. А затем экономические проблемы страны, связанные с Большим скачком и Культурной революцией, замедлили процесс строительства. В 1958 г. с провозглашением политики “Пусть расцветают сто цветов” ряд инженеров, выступавших против проекта комплексного освоения р. Янцзы, были отстранены от проектирования.

В 1980-х гг. идея комплексного освоения р. Янцзы возродилась. В 1992 г. Собрание народных представителей Китая утвердило планы строительства гидроузла “Три ущелья”. Из 2633 депутатов 1767 проголосовали за, 177 — против, 664 — воздержались и 25 депутатов не приняли участие в голосовании.

Строительство плотины началось 14 декабря 1994 г. Ожидалось, что гидроузел будет введен в эксплуатацию в 2009 г., однако включение в состав гидроузла дополнительных сооружений, таких, как правобережное подземное машинное здание с шестью гидроагрегатами по 700 МВт, и комплексного судоподъемника отодвинуло окончательный пуск гидроузла “Три ущелья” на 2011 г. (возможно, пуск судоподъемника может состояться только в 2014 г.).

К концу 2008 г. плотина подняла уровень воды до отметки 172,5 м. Бетонная плотина имеет длину 2331 м и высоту 185 м. При возведении всех бетонных сооружений гидроузла уложено 27,0 млн. м³ бетона и перемещено 102,6 млн. м³ грунта. Когда уровень воды перед плотинной поднимется максимально



Рис. 1. Гидроэлектростанция “Три ущелья”

на 175 м над уровнем моря (или на 110 м над уровнем воды в нижнем бьефе), образуется водохранилище длиной 660 км и средней шириной 1,12 км, содержащее 39,3 км³ воды. Общая площадь водохранилища составит 1045 км². В зону затопления попадает 632 км² сельскохозяйственных земель, что существенно меньше затопления земель, вызванного строительством гидроузла Итайпу в Бразилии (1350 км²).

Общая стоимость строительства гидроузла “Три ущелья” оценивается в 180 млрд. юаней, что составляет 12 % годового бюджета КНР. К концу 2008 г. общие затраты достигли 148,365 млрд. юаней, среди которых 64,613 млрд. юаней затрачено на строительство, 68,557 млрд. юаней — на переселение жителей из зоны затопления и 15,195 млрд. юаней — обслуживание кредитов. Затраты на строительство гидроузла будут полностью компенсированы, когда гидроэлектростанция выработает 1 трлн. кВт · ч, получив доход от продажи электроэнергии в 250 млрд. юаней. Ожидается, что полная компенсация затрат произойдет через 10 лет после пуска ГЭС на полную мощность.

Финансирование строительства гидроузла “Три ущелья” осуществлялось из специального фонда, включающего доходы от продажи электроэнергии, вырабатываемой ГЭС Гечжоуба; займы, предоставленные Китайским банком развития, китайскими и зарубежными коммерческими банками; корпоративные бонды и др.

Каждая провинция, получающая электроэнергию от ГЭС “Три ущелья”, облагалась дополнительным налогом в 7 юаней за 1 МВт · ч, дополнительный налог на остальные провинции составлял 4 юаня за 1 МВт · ч. Тибет был освобожден от дополнительной платы за электроэнергию.

ГЭС “Три ущелья” будет крупнейшей в мире среди электростанций всех типов. Ее мощность составит 22 500 МВт, в составе ГЭС 32 главных гидроагрегата мощностью по 700 МВт и 2 агрегата мощностью по 50 МВт для собственных нужд.

Из 32 основных гидроагрегатов 14 установлены в левобережном здании ГЭС, 12 — в правобережном и остальные 6 — в подземном здании ГЭС у правого берега р. Янцзы. Ожидаемая среднегодовая выработка ГЭС “Три ущелья” достигает 100 млрд. кВт · ч, т.е. на 18 % больше первоначально намечаемой выработки электроэнергии на ГЭС — 84,7 млрд. кВт · ч, что связано с принятым в 2002 г. решением об установке дополнительных шести гидроагрегатов в подземном здании ГЭС.

Вес каждого главного гидроагрегата составляет 6 тыс. т, установленная мощность — свыше 700 МВт. Расчетный напор турбины — 80,6 м, максимальный — 113,0 м, расход воды — 600–950 м³/с в зависимости от располагаемого напора. Гидротурбины типа “Френсис” совместного производства европейских фирм “VGS” и “Alstom” имеют диаметр рабочего колеса 9,7/10,4 м и скорость вращения 75 об/мин.

Гидрогенератор имеет внешний диаметр статора 24,1/20,9 м и внутренний — 18,5/18,8 м, высота статора 3,1/3,0 м. Нагрузка на подшипник — 5050/5500 т. Средний КПД гидроагрегата — 94 %, максимальный — 96,5 %. Генераторное напряжение — 20 кВ. Согласно условиям контракта, гидроагрегаты ГЭС “Три ущелья” изготавливались и поставлялись двумя консорциумами: в один из них входили европейские фирмы “Alstom”, “ABB Group”, “Kvaerner” и китайская компания “Haerbin Motor”, в другой — “Voith”, “General Electric”, “Siemens”(VGS) и китайская компания “Oriental Motor”. Передача китайским компани-

ям технологии на изготовление части турбин и генераторов была оговорена условиями контрактов на поставку основного оборудования ГЭС “Три ущелья”.

С пуском 14 агрегатов, расположенных в левобережном машинном здании, началась выработка электроэнергии на ГЭС “Три ущелья”. Первый гидроагрегат (№ 2) введен в эксплуатацию 10 июля 2003 г. Полностью агрегаты левобережного здания ГЭС введены в эксплуатацию 7 сентября 2005 г. с пуском агрегата № 9. Полная установленная мощность левобережной ГЭС 9800 МВт была достигнута 18 октября 2006 г. после того, как уровень воды в водохранилище поднялся до отметки 156 м (рис. 2). 12 агрегатов, расположенных в правобережном машинном здании, также находятся в эксплуатации, которая началась 11 июня 2007 г. с пуском агрегата № 22.

Шестой агрегат (№ 17) запущен 18 декабря 2007 г., после чего суммарная мощность ГЭС “Три ущелья” составила 14 100 МВт и превысила мощность ГЭС Итайпу (Бразилия) 14 000 МВт. ГЭС “Три ущелья” стала крупнейшей в мире.

Сооружение подземного здания ГЭС с шестью гидроагрегатами началось в декабре 2008 г. и в настоящее время продолжается.

К сентябрю 2009 г. установленная мощность ГЭС “Три ущелья” составила 18 300 МВт, что на 4300 МВт превысило мощность ГЭС Итайпу, крупнейшей по тому времени гидроэлектростанции мира. Суммарная выработка электроэнергии на ГЭС “Три ущелья” к 16 сентября 2009 г. составила 348,4 млрд. кВт · ч с момента пуска первого агрегата. В июле 2008 г. выработка составила 10,3 млрд. кВт · ч, впервые превысив месячную выработку электроэнергии в 10 млрд. кВт · ч. В июне 2009 г., когда расход реки превысил 24 тыс. м³/с, мощность гидроэлектростанции составила всего 16 100 МВт, что объясняется недостаточным напором в период паводка.

В августе 2009 г. во время паводка ГЭС “Три ущелья” короткий период работала с полной проектной выработкой. В течение сухого сезона, с декабря по март, выработка электроэнергии ограничивается расходами реки. При достаточных расходах выработка электроэнергии лимитируется располагаемой мощностью.

В 2008 г. выработка ГЭС “Три ущелья” ограничивалась несколькими факторами. Во-первых, большую часть года гидроэлектростанция работала при отметках верхнего бьефа ниже 175 м, что снижало потенциальную энергию потока. Во-вторых, перед паводком с целью создания объема для запасов воды уровень верхнего бьефа снижался до 145 м. Кроме того, гидроэлектростанция не была введена на полную мощность до конца года.

Ежегодная выработка электроэнергии на ГЭС “Три ущелья” представлена в таблице.

До 2 июля 2008 г. Государственная сетевая корпорация и Южно-китайская энергетическая сеть продавали электроэнергию по “плоской” шкале 250 юаней за 1000 кВт · ч. После этой даты установлена различная плата для отдельных провинций в зависимости от того, откуда они получают электроэнергию.



Рис. 2. Левобережное машинное здание ГЭС “Три ущелья”

Всего девять провинций и два города получают электроэнергию непосредственно от ГЭС “Три ущелья”, что учитывается повышенной платой. Стоимость линий электропередачи (с инфраструктурой) составляет около 34,387 млрд. юаней. Сооружение линий электропередачи было завершено в декабре 2007 г., на год раньше планового срока.

Вырабатываемая ГЭС “Три ущелья” электроэнергия передается потребителю линиями переменного тока 500 кВ ГЭС “Три ущелья” — Центральный Китай общей мощностью 12 тыс. МВт и линиями постоянного тока общей мощностью 7200 МВт для энергоснабжения юга Китая и г. Шанхая.

По данным Национальной комиссии Китая по реформам и развитию, на производство электроэнергии тепловыми электростанциями требуется 366 г угля на 1 кВт · ч. При полном развитии ГЭС “Три ущелья” снизит затраты угля на 31 млн. т в год и предотвратит выбросы в атмосферу 100 млн. т парниковых газов, миллионов тонн пыли, 1 млн. т серного диоксида, 370 тыс. т окиси азота, 10 тыс. т окиси углерода и значительного количества ртути. Гидроэнергетика сократит также затраты на добычу, сортировку и транспорт угля из северных провинций Китая. С 2003 по 2007 г. электроэнергия, произведенная на ГЭС “Три ущелья”, привела к экономии 84 млн. т стандартного угля, сокращению выбросов двуокиси углерода на 190 млн. т, двуокиси серы на 2,29 млн. т и окиси азота на 980 тыс. т.

С 2004 по 2007 г. через судоходные шлюзы гидроузла “Три ущелья” было перевезено 198 млн. т грузов. По сравнению с существовавшей до постройки плотины системой перевозки грузов по р. Янцзы использование судов и барж большей грузоподъемности уменьшило выбросы двуокиси углерода на 10 млн. т, а также снизило стоимость перевозки грузов по реке на 25 %.

Строительство плотины и водохранилища ГЭС “Три ущелья” вызвало необходимость оценки ряда явлений, связанных с условиями эксплуатации и безопасностью гидроузла, а именно: наносов, поступающих в водохранилище и сейсмического воздействия на сооружения гидроузла.

Современные оценки показывают, что около 80 % площади водосбора гидроузла “Три ущелья” подверг-

нется эрозии, в результате которой в водохранилище будет поступать 40 млн. т твердых наносов ежегодно. Переселение людей из зоны затопления водохранилища вызовет дальнейшее уменьшение площадей, покрытых лесом, а также увеличение эрозии почв на территориях, занятых переселенцами для сельскохозяйственных нужд.

Прекращение периодических неконтролируемых паводков уменьшит эрозию берегов р. Янцзы. Плотины гидроузла “Три ущелья” снизит количество ила, поступающего в дельту. Вместе с тем отложившиеся в водохранилище перед плотиной наносы могут уменьшить выработку электроэнергии, а также перекрыть водосбросные отверстия плотины и вызвать (в определенных условиях) ее разрушение, как это произошло на плотине Ванqiao Dam в 1975 г. Критическим является количество наносов, поступивших в водохранилище, на уровне 530 млн. т в год, при котором возникает опасность, что отложившиеся перед плотиной наносы могут перекрыть входные отверстия турбинных водоводов. Однако, поскольку в Китае с 2006 г. начато строительство четырех гидроузлов с высокими плотинами на р. Янцзы выше по течению и на ее притоках, фактическое количество наносов, поступающих в водохранилище ГЭС “Три ущелья”, будет меньше первоначально прогнозируемого.

Сокращение поступления наносов в р. Янцзы ниже гидроузла “Три ущелья” может иметь следующие последствия:

речное русло станет более податливым к воздействию паводков;

г. Шанхай, расположенный на расстоянии 1600 км от гидроузла “Три ущелья”, будет получать меньше наносов, что сделает речное русло в дельте реки более податливым к размывам и, в свою очередь, может повлиять на устойчивость прибрежных участков территории крупнейшего города Китая;

сократится кормовая база и, соответственно, численность биологических видов, обитающих в нижнем течении р. Янцзы (вплоть до полного их исчезновения).

Вызванные наведенными землетрясениями пиковые ускорения грунта возрастают с увеличением нагрузок, связанным с наполнением водохранилища, что может привести к образованию оползней по берегам и повреждению верховой грани грунтовых плотин. В мае 2009 г. произошло два оползня в ущелье

Wuxia, при которых с берега в водохранилище было сброшено 50 тыс. м³ и 20 тыс. м³ скальных пород.

Водоохранилище “Три ущелья” существенно улучшило положение с очисткой сточных вод крупнейшего г. Chongqing и его пригородов. Согласно данным Министерства охраны окружающей среды Китая, около 50 новых очистных установок могут очищать 1,84 млн. т сточных вод в день, что составляет 65 % от необходимого объема. Всего в реку сбрасывается 1 млрд. т неочищенных сточных вод ежегодно. Строительство плотин существенно снижает очищающую способность водотока и повышает загрязняющую нагрузку. Стоимость очистки сточных вод оценивается в 2,8 млрд. юаней ежегодно.

Залесенная водосборная площадь гидроузла “Три ущелья” в настоящее время составляет 10 %, вдвое меньше, чем в 1950-х гг. Согласно заключению ФАО площадь лесов в регионе к 2008 г. увеличилась на 6 тыс. км². В то же время в период 90-х гг. прошлого века потери залесенных территорий составили 13 тыс. км². После катастрофического паводка 1998 г. Китай принял усиленные меры для развития лесного хозяйства, направленные главным образом на залесение бассейна р. Янцзы выше створа гидроузла “Три ущелья”.

Наиболее важной задачей гидроузла “Три ущелья” является контроль паводков на р. Янцзы. В нижнем течении реки проживают миллионы человек, расположены крупнейшие города Wuhan, Nanjing, Shanghai, значительные сельскохозяйственные районы и индустриальные центры Китая. Регулирующая способность водохранилища составляет 22 км³. Этот объем регулирования способен сократить повторяемость крупных паводков с 1 раза в 10 лет до 1 раза в 100 лет.

В паводок 1954 г. р. Янцзы затопила 193 тыс. км², 33 169 человек погибло и 18 884 тыс. человек было эвакуировано. Был затоплен г. Ухань с 8-миллионным населением, находившийся под водой три месяца. На 100 дней было прекращено движение по железной дороге Jingguang. В 1998 г. на этой же территории паводок вызвал разрушения на миллиарды долларов, 2039 км² сельскохозяйственных земель было затоплено, пострадало более 2,3 млн. человек, 1526 человек погибло.

В начале августа 2009 г. через створ сооружений гидроузла “Три ущелья” прошел наибольший паводок за пять лет. Пропускная способность плотины была ограничена 40 тыс. м³/с. Вода перед плотиной поднялась с отметки 145,13 м 1 августа до 152,88 м 8 августа. В водохранилище было задержано 4,27 км³ воды, расход в реке за плотиной был снижен до 15 тыс. м³/с.

Во время сухого сезона, с декабря по март, каждый год проводились попуски воды из водохранилища, что давало возможность обеспечить водой население, промышленность и сельское хозяйство в нижнем течении реки, а также улучшить условия судоходства (рис. 3). При этом отметка воды в водохранилище опускалась с 175 до 145 м, создавая объем для задержания воды в следующий дождливый сезон. Сбрасываемая вода использовалась для производства

Год	Количество агрегатов	Выработка электроэнергии, млрд. кВт · ч
2003	6	8,607
2004	11	39,155
2005	14	49,090
2006	14	49,250
2007	21	61,600
2008	26	80,812
2009	26	79,470



Рис. 3. Водосбросная плотина ГЭС “Три ущелья”

электроэнергии на ГЭС Гечжоуба. С момента заполнения водохранилища до проектной отметки в 2003 г. гидроузел “Три ущелья” дополнительно сбросил в нижний бьеф 11 млрд. м³ воды для улучшения водоснабжения городов и населенных пунктов во время сухого сезона. В июле 2010 г. сбрасываемый расход гидроузла достиг 70 тыс. м³/с, что значительно превысило сбросной расход в паводок 1998 г. и привело к тяжелым потерям в ряде городов, расположенных в среднем и нижнем течении р. Янцзы — Jiangxi, Fujian, Sichuan, Yunnan.

Строительство шлюзов на гидроузле “Три ущелья” должно повысить грузооборот на р. Янцзы с 10 млн. до 100 млн. т ежегодно и снизить стоимость перевозок на 30 – 37 %, значительно улучшить условия судоходства, поскольку все опасные пороги на реке уйдут под воду (рис. 4).

Двухниточный судоходный шлюз имеет пять ступеней шлюзования, время шлюзования составит около 4 ч. Максимальное водоизмещение шлюзуемого судна — 10 тыс. т. (Критики проекта считают, что заиливание верховьев водохранилища в течение нескольких лет сделает крупные порты, такие, например, как Chongqing, недоступными для этих крупных судов). Каждая камера шлюза имеет размеры 280 × 35 × 5 м (длина, ширина, глубина на королё). Это на 30 м длиннее, чем камера шлюза водной системы на р. Святой Лаврентий в Канаде, но вдвое меньше по глубине. До строительства гидроузла “Три ущелья” объем судоходства на р. Янцзы в створе гидроузла составлял 18 млн. т в год. С 2004 по 2007 г. через судоходный шлюз пропущено 198 млн. т.

В дополнение к судоходному шлюзу в составе гидроузла строится судоподъемник, способный пропускать теплоходы водоизмещением 3 тыс. т. Размеры камеры судоподъемника 120 × 18 × 3,5 м, высота вертикального перемещения 113 м, время подъема судна 30 – 40 мин. При проектировании судоподъемника возникли технические сложности, связанные со значительными колебаниями бьефов: судоподъемник должен надежно работать при колебании нижнего



Рис. 4. Судоходный шлюз гидроузла “Три ущелья”

бьефа до 12 м и верхнего — до 30 м. Судоподъемник не был построен к моменту официального пуска судоходных сооружений гидроузла 20 мая 2006 г. Его возведение началось в октябре 2007 г. и может затянуться до 2014 г.

К июню 2008 г. из зоны затопления гидроузла “Три ущелья” было переселено 1,24 млн. жителей, главным образом в провинции Hubei с населением 60,3 млн. человек и в г. Chongqing с пригородами с населением 31,44 млн. человек. Около 140 тыс. жителей было переселено в другие провинции. Переселение было закончено к 22 июля 2008 г.

Водоохранилище длиной 600 км при подъеме уровня воды на 175 м затопило около 1300 археологических памятников и исторических мест. Культурные и исторические реликвии перемещены на более высокие отметки, однако неоткрытые памятники затоплены и утрачены. То же произошло с крупногабаритными памятниками, переместить которые не было возможности.

Через несколько дней после заполнения водохранилища на сооружениях гидроузла “Три ущелья” обнаружили около 80 волосяных трещин. После нескольких месяцев эксплуатации на затворах глубоководных водосбросов были замечены признаки кавитационных разрушений. В процессе строительства 163 тыс. бетонных образцов из гидротехнических сооружений были подвержены испытаниям на прочность и деформации; результаты испытаний подтвердили высокое качество бетона плотины.

Для повышения эффективности работы гидроузла “Три ущелья” и снижения поступления наносов в водохранилище на одном из главных притоков р. Янцзы — Jinsha строится четыре крупные гидроэлектростанции: Wudongde, Baihetan, Xiluodu, Xiangjiaba. Их общая мощность равна 38 500 МВт, что в 2 раза превышает установленную мощность ГЭС “Три ущелья”. В настоящее время на гидроэлектростанциях Xiluodu и Xiangjiaba развернулось строительство основных сооружений, на Baihetan идут подготовительные работы, а проект Wudongde находится в стадии утверждения.

Памяти Юрия Михайловича Инюшина

21 января 2011 г. после тяжелой болезни скончался бывший главный инженер Всесоюзного треста “Спецгидроэнерго-монтаж”, крупный специалист по монтажу гидроагрегатов Юрий Михайлович Инюшин.



Юрий Михайлович родился в 1935 г. в Ленинграде в семье выдающегося советского гидростроителя, начальника строительства Усть-Каменогорской и Бухтарминской гидроэлектростанций, Героя Социалистического труда Михаила Васильевича Инюшина. После окончания в 1958 г. гидротехнического факультета Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина Юрий Михайлович был направлен во Всесоюзный трест “Спецгидроэнерго-монтаж”, в котором проработал 35 лет. Работал мастером Шаорского монтажного участка на монтаже гидроагрегатов в Грузинской ССР, прорабом на монтаже гидроагрегатов Бухтарминской ГЭС в Казахстане, руководил в 1961 – 1965 гг. монтажом гидрогенераторов Братской ГЭС. В 1965 г. молодого талантливого инженера направили в Египет главным инженером монтажного управления “Спецгидроэнерго-монтаж” по монтажу гидроагрегатов Асуанской ГЭС. В 1968 – 1970 гг. он работал заместителем управляющего треста. В 1970 г. в Таджикской ССР организовал Нурекский монтажный участок на строительстве Нурекской ГЭС и стал его начальником, оставаясь одновременно заместителем управляющего треста. Под его руководством были введены в эксплуатацию первые гидроагрегаты Нурекской ГЭС и гидроагрегаты Чарвакской ГЭС в Узбекистане. В 1973 г. Юрий Михайлович стал руководителем группы советских

специалистов по монтажу гидроагрегатов ГЭС Капивара в Бразилии. В 1976 г. по приказу министра энергетики СССР Юрий Михайлович был назначен главным инженером Всесоюзного треста “Спецгидроэнерго-монтаж”. В этой должности в полной мере проявились его организаторские и инженерные качества. Он активный участник строительства многих гидроэлектростанций СССР: Зейской, Усть-Илимской, Колымской, Курпсайской, Саяно-Шушенской, Майнской, Загорской ГАЭС и др. Он инициатор и руководитель проекта проектирования, изготовления, поставки и сдачи в эксплуатацию гидромеханического оборудования пяти судовых шлюзов канала Кейтеле-Пяйяанне в Финляндии. Последние годы Юрий Михайлович являлся президентом и генеральным директором южноамериканской энергетической компании.

Ю. М. Инюшин пользовался большим авторитетом среди гидростроителей, у специалистов проектных институтов и заводов-изготовителей гидросилового оборудования. Его заслуги отмечены орденом “Знак Почета” и медалями СССР. Ему было присвоено почетное звание “Заслуженный строитель РСФСР”. Он автор большого числа изобретений и технических статей по теории и практике монтажа гидроагрегатов.

Ушел из жизни энергичный и обаятельный человек, отдавший свои знания и опыт делу гидроэнергетики нашей страны. Светлая память о Юрии Михайловиче Инюшине сохранится в воспоминаниях всех, кто знал этого замечательного человека и работал с ним.

Сдано в набор 24.01.2011. Подписано в печать 23.03.2011. Формат 60×84 1/8.

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

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

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

Отпечатано в типографии издательства “Фолиум”

Конференция по безопасности гидроэлектростанций

11 – 12 мая 2011 года в г. Москве НП «Гидроэнергетика России» совместно с ОАО «РусГидро» проводят научно-практическую конференцию «Повышение эффективности управления системой безопасности ГЭС» на примере расследования причин аварии и опыта восстановления Саяно-Шушенской ГЭС.

Конференция проводится при поддержке:

- Комиссии Совета Федерации по естественным монополиям;
- Комитета по энергетике Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации;
- Комитета по природным ресурсам, природопользованию и экологии Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации;
- Министерства энергетики Российской Федерации;
- Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору;
- Федерального агентства водных ресурсов;
- Российского национального комитета Международной комиссии по большим плотинам;
- Электроэнергетического совета СНГ.

Партнеры Конференции: ОАО «Иркутскэнерго», ОАО «Красноярская ГЭС», ОАО АК «Якутскэнерго», ОАО «Генерирующая компания», ОАО «Башкирэнерго», ОАО «Богучанская ГЭС», ОАО «УК ГидроОГК», ОАО «Силовые машины», Ассоциация «Гидропроект», ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», ОАО «НИИЭС», ОАО «Ленгидропроект», ОАО «Мособлгидропроект», ОАО «Институт Гидропроект», ГОУ ДПО «Институт повышения квалификации государственных служащих».

Целью проведения Конференции является обобщение опыта, полученного при ликвидации аварии, произошедшей 17 августа 2009 г. на Саяно-Шушенской ГЭС, и его использование при совершенствовании управления систем безопасности гидроэлектро-станций.

В Конференции примут участие представители ведущих научно-исследовательских, изыскательских, проектных институтов, ремонтных и строительно-монтажных организаций, главных инженеров гидроэлектростанций России.

Предполагается издание итогового сборника докладов серии проведенных конференций с условным названием: «Саяно-Шушенская ГЭС: причины, последствия и уроки аварии».

С регламентом работы и программой Конференции, составом Организационного комитета и Редакционной группы можно ознакомиться в разделе «Конференции и рабочие совещания» на сайте НП «Гидроэнергетика России».

Оргкомитет

Контактная информация: сайт: www.hydropower.ru.

Тел/факс: (499) 120-03-72

e-mail: info@hydropower.ru

Контактное лицо: Чепик Светлана Евгеньевна

ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ

на журнал «Гидротехническое строительство»

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

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

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

В России подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи.

Условия подписки можно найти в Объединенном каталоге

«Пресса России. Подписка-2011»

(Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы)

70224 — индекс журнала «ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»

Редакционная коллегия:

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

Адрес редакции:

Москва, Волоколамское шоссе, д. 2, к. 73

Почтовый адрес редакции:

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

ЗАО НТФ «Энергопрогресс»

Тел./факс: (495) 741-49-81

E-mail: gts1930@yandex.ru

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