



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.

№ 9

сентябрь

2011

Содержание

Беллендир Е. Н. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева – 90 лет на службе энергетике	8	Дымант А. Н., Кузнецов Е. И., Прокопович В. С. Литые асфальтобетонные диафрагмы грунтовых плотин	47
Ивашинцов Д. А., Пак А. П. Деятельность ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева по координации и научной организации выполнения государственных и отраслевых научно-технических программ	11	Панов С. И., Кривоногова Н. Ф. Научные аспекты гидротехники Крайнего Севера.	55
Пак А. П. Формирование единой общегосударственной системы нормативных документов по проектированию гидротехнических и энергетических сооружений и их оснований	17	Храпков А. А., Цейтлин Б. В., Скворцова А. Е. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных конструкций энергетических сооружений	60
Бакановичус Н. С., Векслер А. Б., Климович В. И., Прокофьев В. А., Судольский Г. А., Шаталина И. Н., Швайнштейн А. М. Гидравлические и ледотермические исследования гидротехнических сооружений в работах ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева	23	Храпков А. А., Гинзбург С. М., Скоморовская Е. Я. Исследования по обоснованию прочности бетонных и железобетонных конструкций гидросооружений	68
Левина С. М., Штильман В. Б. Исследования по обеспечению надёжности оборудования гидротехнических сооружений ГЭС и АЭС	32	В. Б. Судаков Основные разработки и исследования ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева в области бетона и бетонных работ	75
Гольдин А. Л. Работы ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева в области оснований гидротехнических сооружений	37	Свердлин Б. Л., Ищук Т. Б., Николаева О. С. Исследования систем технического водоснабжения и охладителей тепловых и атомных электростанций	83
Глаговский В. Б., Гольдин А. Л., Радченко В. Г. Исследования в области строительства плотин из грунтовых материалов	43	Василевский А. Г. Участие ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева в создании Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений	88
		Глаговский В. Б., Финагенов О. М. Сооружения на континентальном шельфе.	95

**Коллективу ОАО «ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева» в связи
с 90-летием со дня образования**

Дорогие коллеги!

С искренним удовольствием поздравляю ваш институт с 90-летним юбилеем!

Судьба ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева напрямую связана с историей становления и развития отечественной энергетики.

Основное направление деятельности института – научное обоснование создания и эксплуатации всех крупных гидроэлектростанций страны, обеспечение надежности и безопасности гидротехнических сооружений. Силами ВНИИГ были выполнены научные исследования и обоснования проектов таких известных во всем мире ГЭС, как Братская, Красноярская, Саяно-Шушенская, Колымская, Курейская, Камская, Воткинская, проводится научно-техническое сопровождение строящихся объектов – Бурейской, Богучанской, Усть-Среднеканской, Зарамагской ГЭС.

Значителен вклад ВНИИГ в научное обоснование объектов тепловой энергетики и атомных электростанций. С конца 80-х годов институт принимает активное участие также в обосновании и разработке проектов сооружений на морском шельфе.

Неоценимо участие сотрудников ВНИИГ в развитии гидротехнической и гидроэнергетической науки. В вашем институте были созданы признанные во всем мире научные школы и работают ведущие специалисты в области гидравлики, фильтрации, механики грунтов, общих принципов подбора составов гидротехнического бетона, математического моделирования.

Поздравляя коллектив ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» с 90-летием, желаю его сотрудникам крепкого здоровья, успехов в научной и творческой деятельности, а самому ВНИИГ - процветания и плодотворной работы на благо России.

Министр энергетики
Российской Федерации

С. И. Шматко



Дорогие друзья!

Поздравляю коллектив ОАО «ВНИИТ им. Б.Е. Веденеева» с 90-летием со дня учреждения!

За годы своей истории ВНИИТ прошел путь от научно-мелиорационного института, назначением которого была разработка научных основ и технических приемов новых, более совершенных методов искусственного увлажнения почвы, а также орошения и осушения, до лидера гидротехнической и гидроэнергетической науки СССР и России. Во ВНИИТ были созданы и успешно развивались научные школы в области фильтрации, гидравлики, строительной механики и теории упругости, механики грунтов и гидротехнических сооружений. Результаты исследований ученых института воплощены в целом ряде отечественных и зарубежных гидравлических, тепловых и атомных электростанций, в сооружениях на шельфе.

В сложные постперестроечные года вам удалось сохранить не только свою лабораторную и производственную базу, оснащенную приборами и установками для экспериментальных исследований, а также основной состав ведущих ученых и специалистов. Деятельность ВНИИТ – это пример функционирования отраслевого научного центра страны.

Сегодня первоочередными задачами, в решении которых коллектив вашего института принимает активное участие, являются: завершение строительства Бурейской, Ирганайской и Зармагагских ГЭС. Идет работа по вопросам реализации новых масштабных проектов в гидроэнергетике. Серьезное внимание ВНИИТ уделяется работам, выполняемым для Санкт-Петербурга, Ленинградской области и в других субъектах Северо-Западного федерального округа. Ваш институт активно участвует в международном научно-техническом сотрудничестве.

Поздравляю ВНИИТ с 90-летним Юбилеем, выражаю уверенность, что и в будущем институт будет отмечен славными делами на благо энергетики страны. Желаю всем сотрудникам ВНИИТ крепкого здоровья и дальнейших творческих успехов.

Полномочный представитель
Президента Российской Федерации
в Северо-Западном федеральном округе



И. Клебанов



ГУБЕРНАТОР САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

*Коллективу
Всероссийского научно-исследовательского
института гидротехники*

им. Б.Е. Веденеева

Дорогие друзья!

Рада поздравить коллектив Всероссийского научно-исследовательского гидротехники имени Б.Е. Веденеева с 90-летием этого прославленного предприятия!

Трудовая биография вашего института тесно связана с историей нашей страны и нашего города. На счету ваших предшественников – проектирование первенцев гидроэнергетики, героическая оборона Ленинграда и строительство «Дороги жизни», освоение энергетических ресурсов Урала и Сибири.

Сегодня Институт имени В.Е. Веденеева – известный в мире бренд. Результаты труда ученых и специалистов института воплощены на многих гидро-, тепло- и атомных станциях, построенных в нашей стране и далеко за ее пределами. Сегодня здесь успешно работают над созданием новейших технологических платформ для добычи нефти и газа на континентальном шельфе.

Хочу выразить особые слова благодарности сотрудникам института за активное участие в реализации важнейших городских проектов – строительстве метро, стадионов, бассейнов, реставрации исторических памятников. Вы внесли неоценимый вклад в создание жизненно важного для Санкт-Петербурга объекта – Комплекса защитных сооружений от наводнений.

Уверена, что впереди у вашего сплоченного коллектива много новых свершений и побед.

Желаю всем сотрудникам института здоровья, оптимизма, благополучия, дальнейших успехов в труде на благо России и Санкт-Петербурга!

Губернатор Санкт-Петербурга

В.И. Матвиенко



РусГидро

Открытое акционерное общество «РусГидро»

Коллективу ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»

Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Веденеева отмечает свое 90-летие. Поздравляя коллектив с юбилеем, испытываю особенные чувства. Немного найдется в российской гидроэнергетике коллективов со столь богатой историей. Будучи всего на год моложе плана ГОЭЛРО, институт, первоначально именовавшийся мелиоративным, принимал самое активное участие в создании первенцев отечественной энергетики, в том числе знаменитых Волховской и Днепровской ГЭС. За свою долгую и славную трудовую биографию коллектив института приложил руку к проектированию и эксплуатации более 160 ГЭС и 60 тепловых и атомных электростанций.

Сегодня ВНИИГ — это головной институт ОАО «РусГидро», осуществляющий научно-исследовательские, внедренческие, опытно-конструкторские работы в области гидротехнического, энергетического, промышленного и гражданского строительства, водного хозяйства, разработчик основных государственных и ведомственных правовых и нормативно-технических документов по гидротехническим сооружениям. Учеными института выполнены научные исследования по обеспечению надежности и безопасности большинства ГЭС компании.

ВНИИГ — один из ключевых научно-исследовательских институтов, участвующих в реализации программы инновационного развития ОАО «РусГидро». Институт располагает высоким уровнем компетенции, который базируется на сочетании классической научной школы и современных вызовов практики, на оперативности и мобильности персонала, позволяющим выполнять работы для многих отраслей энергетики.

ОАО «РусГидро» поставило перед собой амбициозную задачу тотальной модернизации производства, укрепления своих лидирующих позиций на российском рынке. Уверен, что ВНИИГ как один из мозговых центров компании окажется на высоте намеченных целей и будет эффективно осуществлять комплексное управление нашими проектами.

В день 90-летнего юбилея желаю институту дальнейшего развития его творческого потенциала на благо развития гидроэнергетики России.

Здоровья и благополучия каждому сотруднику института!

Председатель правления

Е. В. Дод

Сотрудникам ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»

От имени Санкт-Петербургского научного центра РАН и от себя лично сердечно поздравляю коллектив ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» с 90-летним юбилеем института!

Научные труды сотрудников ВНИИГ широко известны гидротехникам и гидроэнергетикам страны и всего мира, рекомендации ученых института позволили создать надежные отечественные ГЭС, ТЭС и АЭС, выполнить научное обоснование ряда зарубежных энергетических объектов. По нормам, разработанным под руководством ВНИИГ, выполняются проекты, строятся и эксплуатируются все гидротехнические сооружения в стране.

На протяжении последних десятков лет ученые ВНИИГ тесно сотрудничают с различными институтами Российской академии наук. Это сотрудничество является весьма плодотворным. В 2010 году ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» присвоен статус научной организации Санкт-Петербурга, находящейся под научно-методическим руководством РАН.

В связи с юбилеем желаю сотрудникам ВНИИГ и в будущем крупных научных свершений для дальнейшего развития энергетики и благополучия страны.

С наилучшими пожеланиями

Вице-президент РАН,
Председатель Санкт-Петербургского научного
центра РАН, лауреат Нобелевской премии, академик

Ж. И. Алферов

Исполняется 90 лет ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» — крупнейшему научному институту страны в области гидроэнергетики и гидротехнических сооружений. Институт прошел славный путь — от основанного в 1921 году «Научно-мелиоративного института» до «Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники имени Б. Е. Веденеева».

Институт принимал активное участие в реализации плана ГОЭЛРО, его научные разработки были положены в основу проектов Волховской, Днепровской, Свирских, Нивских и других ГЭС построенных в предвоенные годы.

В послевоенные годы институт внес большой вклад в восстановление народного хозяйства страны. Но наибольшего уровня развития институт достиг в период реализации крупнейших гидроэнергетических проектов СССР: Волжских, Братской, Красноярской, Саяно-Шушенской и многих других.

Сегодня ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева является ведущей научной организацией отрасли. В институте создана современная, динамично развивающаяся школа гидротехники, способная решать практически любые научные проблемы, возникающие сегодня при проектировании и строительстве гидротехнических объектов. Хорошо известные научные разработки ВНИИГ во многих областях гидротехники, включая: расчетные обоснования гидротехнических сооружений, инженерной гидравлики и теории движения грунтовых вод, теоретические основы и практические методы создания гидротехнического бетона, исследования грунтов и оснований гидротехнических сооружений, разработка систем контроля состояния сооружений и многие другие.

Институт не ограничивается чисто научными исследованиями. Его сотрудники постоянно ведут контроль выполнения разработанных ими технологий непосредственно на строящихся объектах. Большая работа ведется институтом по определению безопасности и надежности действующих гидротехнических сооружений.

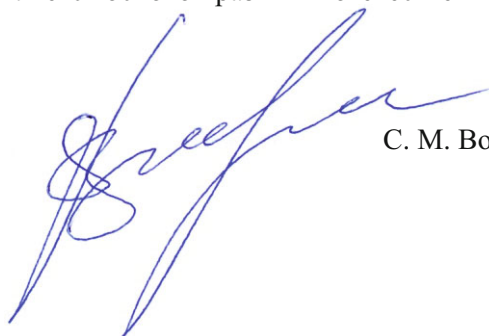
В последние годы сфера научной деятельности института существенно расширилась. Ведутся работы в области исследования сооружений тепловых и атомных станций, морских сооружений в шельфовой зоне и других.

Важнейшим направлением деятельности института является создание нормативной базы отрасли. За последние годы разработаны десятки регламентов, пособий, рекомендаций и других нормативных и методических документов.

Все разработки института находятся на самом высоком мировом уровне, что подтверждается его участием в крупнейших международных профессиональных организациях, включая Международный комитет по большим плотинам (ICOLD).

ОАО «Ленгидропроект» сердечно поздравляет весь коллектив ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» со знаменательной датой, желает дальнейших успехов в совершенствовании научной базы гидротехники, что является основой развития отечественной гидроэнергетики!

Генеральный директор
ОАО «Ленгидропроект»



С. М. Воскресенский

Уважаемые коллеги!

Руководство и коллектив ОАО «Институт Гидропроект» от всей души поздравляет вас со знаменательной датой – 90-летием со дня основания Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им.

Б.Е.Веденева! Столь внушительный многолетний опыт работы вашего института является бесценным.

Для гидроэнергетики – это целая эпоха, а история **ВНИИГ им.Б.Е. Веденева** – это история ее становления. Сегодня состояние энергетической отрасли исчисляется сотнями электростанций. И в основу проектирования и строительства этих объектов легли теоретические и экспериментальные исследования вашего института. В результате этой громадной работы в стране сформировалась отечественная школа гидроэнергетики, собственная научная база, которая пользуется заслуженным признанием как в России, так и во всем мире. В институте выполнены научные исследования для **160** гидроэлектростанций, более **60** тепловых и атомных электростанций, в том числе ряда зарубежных энергетических и водохозяйственных объектов.

Несмотря на то, что прошло много лет, уникальный научный опыт, накопленный годами, позволяет институту встретить этот юбилей в полном расцвете творческих сил и вести активную научную деятельность. Коллектив института принимает активное участие в важнейших для нашей страны проектах – в завершении строительства Бурейской, Ирганайской, Зарамагских и Богучанской ГЭС. Прорабатывает вопросы реализации новых не менее актуальных для отечественной гидроэнергетики проектов – Южно-Якутского гидроэнергетического комплекса, строительства Нижнебурейской ГЭС, ГАЭС в Европейской части России. При этом институт успешно решает вопросы по научному обоснованию строительства первой в мире ледостойкой нефтяной платформе «Приразломной» в Баренцевом море, обоснованию проектов Сахалин I и II и активно ведет исследования для ТЭК на шельфе.

Неоспоримый научный авторитет **ВНИИГ им. Б.Е. Веденева** и его безупречная репутация позволяет вести и нормотворческую деятельность. Еще с середины прошлого века институт является главной организацией в СССР, чьи стандарты легли в основу всей нормативно-методической документации в области гидротехнического строительства страны. Наступили новые времена, и, как и прежде, институт является главным законодателем в области гидротехники, став разработчиком Федерального закона «Специальный технический регламент «О безопасности гидротехнических сооружений».

«Институт Гидропроект» благодарит **ВНИИГ им. Б.Е. Веденева** за плодотворное сотрудничество и крепкую многолетнюю дружбу. В течение стольких лет вы оказываете помощь российским гидротехникам, что является большим достижением и заслуживает достойного празднования. В день **90-летия** желаем специалистам института дальнейшего процветания и новых свершений!

Генеральный директор
ОАО «Институт Гидропроект»



Павел Шестопалов

ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева — 90 лет на службе энергетике

Беллендир Е. Н., Генеральный директор ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»,
доктор техн. наук

Изложены основные этапы создания и становления института. Отмечен большой вклад в формирование научных школ и в развитие отечественной энергетики. Приведены основные направления деятельности института, особое внимание уделено инновационным разработкам.

Ключевые слова: научное обеспечение, строительство, эксплуатация, ГЭС, ТЭС, АЭС, шельф, надежность и безопасность гидротехнических сооружений, инновационные разработки.



90-летний юбилей ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева – это прекрасный повод для подведения итогов работ, выполненных в прошедшие годы, и для определения задач на будущее.

Институт, созданный в 1921 г. для решения задач по обеспечению водными ресурсами южных

районов России и территории Средней Азии, после принятия плана ГОЭЛРО был ориентирован на решение проблем строительства гидроэнергетических объектов страны. Дальнейшая судьба института была напрямую связана со становлением и развитием отечественной энергетики.

В 20 – 30 годах прошлого столетия деятельность ВНИИГ определялась необходимостью строительства низко- и средненапорных гидроузлов на скальных основаниях. Характерной особенностью деятельности специалистов института было их участие в создании и формировании теоретического фундамента современной гидротехнической науки. В начале 30-х годов институт становится ведущей научно-исследовательской организацией страны по проблемам гидроэнергетики и энергетического строительства.

В годы Великой Отечественной войны в институте решались задачи военного характера и проводились работы по вводу в строй малых и средних ГЭС на Урале, в Сибири и Средней Азии.

После войны в Советском Союзе необходимо было восстанавливать промышленность, сельское хозяйство, транспорт и многое другое, разрушенное войной, для этого нужно было воссоздать энергетические объекты. Роль ученых и инженеров в решении этих задач особая — в кратчайшие сроки разработать новые материалы, технологии, конст-

рукции для ведения восстановительных работ и начала нового строительства энергетических объектов.

50 – 80-е годы — пик энергетического строительства, годы удивительные, интересные и трудные. Освоение Волги, Днепра, Дона, рек Сибири, Дальнего Востока, Средней Азии, Прибалтики, Кавказа. Строительство высоконапорных гидроузлов в сложнейших природно-климатических, инженерно-геологических, гидрологических, сейсмических условиях требовало от ученых и инженеров ВНИИГ решения принципиально новых важнейших задач в различных областях, исследований, технологий строительства и т.д. В эти же годы институт занимает видное место в исследованиях систем технического водоснабжения и охладителей тепловых и атомных станций, а также фундаментов широкого спектра мощности для ТЭС.

Со дня своего основания основой деятельностью института было и есть получение новых научных знаний, необходимых для решения практических задач гидротехники и гидроэнергетики. Поэтому во ВНИИГ выполнялись научные исследования, результаты которых вносили и вносят существенный вклад в гидротехническую науку. На базе научных достижений создавались признанные в стране и во всем мире научные школы в области гидравлики, фильтрации, механики грунтов, механики разрушения бетона, общих принципов подбора составов гидротехнического бетона, математического моделирования, исследований гидротехнических сооружений из грунтовых материалов, бетонных и железобетонных конструкций.

Отличительной особенностью представителей научных школ ВНИИГ является сочетание в одном лице известного ученого и крупного инженера-практика. Назовем лишь некоторых из славной когорты ученых-инженеров ВНИИГ: академики Н. Н. Павловский, Б. Г. Галеркин, член-корр. Флорин В. А. АН СССР; Б. В. Проскураков, И. И. Леви, М. Ф. Складнев, Д. Д. Лаппо, П. Д. Евдокимов, Д. Д. Сапегин, С. Г. Гутман, К. А. Мальцов, П. И. Васильев, В. В. Стольников, О. А. Савинов,

С. Я. Эйдельман, В. Б. Судаков, А. А. Храпков, А. Л. Гольдин, Л. П. Трапезников, Д. А. Ивашинцов, С. Г. Шульман, И. С. Шейнин, А. П. Епифанов и др.

С конца 1980-х годов институт принимает активное участие в обосновании и разработке проектов сооружений на шельфе.

К началу XXI в., когда началось возобновление строительства ранее начатых гидроэнергетических объектов, ВНИИГ располагал высокопрофессиональным составом специалистов и хорошо оборудованной экспериментальной базой. Это дало возможность занять активную позицию и в исследованиях по новым объектам.

В настоящее время основными направлениями деятельности ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева являются:

проведение комплексных исследований по научному обоснованию надежной и безопасной эксплуатации действующих объектов энергетики:

гидравлических электростанций: Братской, Красноярской, Саяно-Шушенской, Колымской, Курейской, Камской, Воткинской, Саратовской, Иркутской и др.;

тепловых электростанций: Ставропольской, Рефтинской, Сургутской, Рязанской, Ириклинской и других ТЭС, Киришской, Луганской, Барабинской и других ГРЭС;

атомных электростанций: Ленинградской, Нововоронежской, Смоленской, Калининской, Ростовской, Запорожской, Курской и др.;

научно-техническое сопровождение строящихся объектов: Бурейской, Богучанской, Усть-Среднеканской, Зарамагской и других ГЭС;

разработки и исследования, связанные с проектированием и строительством перспективных гидротехнических сооружений в северной строительной-климатической зоне и в сейсмически активных регионах;

создание правовой нормативно-методической базы по проектированию, строительству и эксплуатации энергетических сооружений;

научно-методическое сопровождение завершения строительства Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений;

выполнение работ для организаций электроэнергетического комплекса России и зарубежных стран;

проведение специальных исследований и разработка технических решений по уникальным сооружениям и конструкциям для освоения углеводородных месторождений на континентальном шельфе Арктики и о. Сахалин.

Особое место в деятельности института занимают разработки по оценке надежности и безопасности гидротехнических и энергетических сооружений на основе представлений и методов современной теории надежности сложных технических и

природно-технических систем (с учетом экстремальных природных и техногенных воздействий):

системный анализ надежности грунтовых ГТС (на этапах проектирования, возведения и эксплуатации);

методы оценки надежности накопителей (золашлакоотвалы, хвостохранилища и т.п.);

методы оценки надежности механического оборудования (затворы, облицовки водопроводящих трактов и т.п.);

анализ гидротермического режима водохранилищ-охладителей ТЭС и АЭС с учетом случайных факторов;

методы оценки надежности конструкций АЭС при экстремальных воздействиях;

методы оценки надежности зданий и сооружений при сейсмических воздействиях.

В 2011 г. Совет директоров ОАО «РусГидро» утвердил программу инновационного развития на 2011 – 2015 гг. Данная программа разработана на основании поручений Президента РФ по результатам работы Комиссии по модернизации и технологическому развитию экономики и Стратегического плана ОАО «РусГидро» на период до 2015 г. с перспективой до 2020 г.

Программа инновационного развития ОАО «РусГидро» — это документ с длительным горизонтом планирования, который позволяет осуществлять стратегические планы развития компании и наращивания необходимых компетенций.

ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» является одним из ключевых научно-исследовательских институтов в реализации программы инновационного развития ОАО «РусГидро». Для решения этих важных и сложнейших задач ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева располагает высоким и разносторонним уровнем компетенций, базирующимся на сочетании классической научной школы и современной постоянно развивающейся лабораторной базы, на оперативности и мобильности персонала, позволяющим выполнять работы практически для всех энергетических объектов.

В предлагаемом читателям юбилейном номере журнала приведены статьи по основным направлениям деятельности института, поэтому здесь приводим только перечень основных направлений инновационной деятельности ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева:

обоснование новых конструкций водосбросных сооружений (ступенчатый водосброс Богучанской ГЭС);

внедрение гибридного моделирования гидравлических процессов в гидроэнергетике;

организация экспериментальной базы для волновых воздействий;

разработка новых составов и технологии возведения плотин из грунтовых материалов с негрунтовыми противофильтрационными элементами (асфальтобетонная диафрагма плотины Богучанской ГЭС);

комплексный анализ геофильтрационного режима основания сооружений Загорской ГАЭС с учетом влияния строительства ГАЭС-2;

разработка математических моделей системы «плотина — основание» для Саяно-Шушенской ГЭС в программных комплексах «COSMOS» и ANSYS с учетом поэтапности возведения и нагружения, образования и развития разуплотнения на контакте бетон — скала, субгоризонтальных трещин и раскрытия межстолбчатого шва;

разработка проекта информационно-диагностической системы Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений;

разработка составов высокопрочного бетона класса В60 (Ленинградская АЭС-2), высокопрочных, тяжёлых и особо тяжёлых бетонов (Нововоронежская АЭС-2);

разработка специальных технических условий и проекта основания гравитационного типа платформы Аркутун-Даги (проект Сахалин-1).

К основным инновационным процессам при организации НИОКР относятся мероприятия в области IT-технологий: внедрение в практику расчетных обоснований проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений и оснований математического моделирования на базе программных комплексов ANSYS, PLAXIS, MODFLOW с использованием новой вычислительной системы (вычислительный кластер) на базе HP Blade System.

Дальнейшее строительство гидроузлов в районах Сибири, Дальнего Востока и вечной мерзлоты предопределяет необходимость инновационных разработок для грунтовых плотин:

инновационных конструктивно-технологических решений для высоких плотин с негрунтовыми противофильтрационными устройствами, в том числе композитного типа, а также с применением геосинтетических материалов;

подходов и методов моделирования трехмерного термонапряженного состояния высоких грунтовых ГТС;

подходов и методов оценки сейсмостойкости высоких грунтовых плотин;

технологий возведения противофильтрационных устройств методами струйной цементации (комбинированных или аналогичных), особенно для временных перемычек и дамб.

Кадровая политика в институте занимает особое место. В настоящее время работают 20 докторов и 69 кандидатов наук.

ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева — единственная организация в ОАО «РусГидро», где одновременно существуют аспирантура, докторантура и диссертационный совет. Аспирантура в институте организована в 1932 г. За эти годы сотрудниками ВНИИГ и сотрудниками смежных организаций успешно защищено свыше 400 докторских и кандидатских диссертаций по различным гидротехническим специальностям. С 2000 по 2011 г. в совете Д 512.001.01 защищены 33 кандидатских диссертации и 14 докторских. Диссертации были представлены и сотрудниками института, и сотрудниками смежных организаций отрасли из различных регионов России (Москва, Санкт-Петербург, Сибирь, Северный Кавказ и др.).

В качестве аспирантов, докторантов и соискателей в настоящее время в институте обучаются свыше 30 человек как сотрудников института, так и специалистов Колымской, Бурейской, Богучанской ГЭС и других организаций. Во ВНИИГ работают свыше 100 сотрудников в возрасте до 35 лет. Обучение и повышение квалификации этих специалистов являются одним из условий для закрепления молодых научных работников в институте и отрасли.

Последние годы для ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева характерны устойчивый рост объемов выполняемых работ, повышение востребованности научно-технических разработок института и выход на новые рынки сбыта научно-технической продукции. Все это позволяет руководству и сотрудникам института с оптимизмом смотреть вперед и ставить новые амбициозные задачи на ближайшую и долгосрочную перспективу.

Деятельность ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева по координации и научной организации выполнения государственных и отраслевых научно-технических программ

Ивашинцов Д. А., доктор техн. наук,

Пак А. П., кандидат техн. наук (ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”)

Обобщен опыт работы ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева как головной организации по координации и научной организации выполнения государственных и отраслевых научно-технических программ, приведен перечень этих программ. На примере государственной научно-технической программы 0.01.275 показаны особенности координационной работы головной организации, основные научные результаты. Освещен также вклад института в решение научных проблем для АЭС, ТЭС, по энергетическому оборудованию, водным ресурсам, сейсмическому воздействию и др.

Ключевые слова: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, координация, научная организация, государственные и отраслевые научно-технические программы, основные научные результаты.

ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” обладает большим опытом разработки, координации и научной организации выполнения государственных и отраслевых научно-технических программ (проблем). Начавшееся в 1950-е гг. освоение энергетических ресурсов рек СССР было связано с необходимостью строительства гидроэлектростанций с высокими плотинами в суровых климатических условиях на многоводных реках Сибири и Дальнего Востока (Братская, Красноярская, Вилюйская, Мамаканская, Колымская ГЭС и др.), в горных, в том числе сейсмических, районах Средней Азии и Кавказа (Нурекская, Токтогульская, Рогунская, Ингурская, Чиркейская ГЭС и др.), а также со строительством в европейской части страны новых типов гидроэлектростанций — гидроаккумулирующих (Киевская, Загорская, Днестровская и др.). Это потребовало срочного проведения соответствующих научных исследований, и в 50–60-х гг. основные исследования в области гидроэнергетического строительства в СССР стали вестись по единым общегосударственным координационным планам с привлечением к этим работам не только организаций Минэнерго СССР, но и многих вузов, институтов АН СССР, а также организаций других министерств и ведомств.

Распоряжением № 138 Совета Министров СССР от 11 января 1950 г. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева был отнесен к числу ведущих научно-исследовательских учреждений страны.

В целях повышения отдачи, ликвидации дублирования и сокращения сроков разработок, концентрации сил на главных направлениях научно-технического прогресса Государственным комитетом по науке и технике Совета Министров СССР были разработаны предложения по координации деятельности научно-исследовательских организаций. Эти предложения были сформулированы в письме № 17–18 от 6 декабря 1952 г., в нем же был приведен перечень организаций, признанных ведущими

и обязанных проводить координацию научно-исследовательских работ по соответствующим темам. От Министерства электростанций СССР ведущими были определены ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, ТНИСГЭИ и Теплоэлектропроект.

ВНИИГ должен был осуществлять координацию деятельности научно-исследовательских организаций по следующим темам: способы гашения энергии водных потоков и борьба с потерями воды из каналов и водохранилищ и вредными влияниями фильтрации в гидротехнических сооружениях (уплотнение грунтов, кольматаж, прогнитофильтрационные завесы и т.п.), устойчивость бетонных и земляных гидротехнических сооружений на мягких грунтах, повышение долговечности бетонных гидротехнических сооружений (борьба с трещинообразованием, разрушением от мороза и т.д.), обжатые и напряженно-заанкеренные бетонные и железобетонные конструкции для гидротехнического строительства.

Постановлением № 877 Совета Министров СССР от 6 августа 1958 г. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева утверждается головной организацией, отвечающей за разработку важнейших научных проблем и координацию научно-исследовательских работ в отрасли “Гидротехническое строительство” по вопросам: виды, типы сооружений, методология их проектирования и расчета.

На первой стадии проведения работ в планах НИР 1960–1965 гг. — проблемы № 49 (1959–1960), № I–XII (1961–1962), № 5518–5520 (1963), № 2315–2316 (1964), № 0.010-06 — первостепенное внимание уделялось вопросам выбора и разработки рациональных типов сооружений, их компоновке, созданию методов исследований и расчета, выбору строительных материалов и технологическим приемам возведения гидросооружений. Эти исследования потребовали расширения состава и объема научно-исследовательских работ, создания специализированных экспериментальных

баз, новых экспериментальных установок и стендов, оснащения их современной аппаратурой. В соответствии с Постановлением СМ СССР № 877 была проведена реконструкция экспериментальной базы ВНИИГ и создан Сибирский филиал ВНИИГ в г. Красноярске.

ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева становится основным научным центром и экспериментальной базой в области гидроэнергетики и гидроэнергетического строительства, головной организацией, осуществляющей координацию научной деятельности в области гидротехники. В таблице приводится перечень государственных и отраслевых программ (проблем), ответственность за выполнение которых в период 1966 – 1998 гг. была возложена на ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева.

Основной проблемой в области гидроэнергетического строительства в 1971 – 1975 гг. была научно-техническая проблема 0.01.275, входящая в Государственный план развития народного хозяйства СССР на 1971 – 1975 гг. Сущность проблемы была обусловлена общей тенденцией развития гидроэнергетического строительства в СССР в этот период, а именно строительством мощных гидроэлектростанций на многоводных реках в суровых климатических условиях Сибири и высоконапорных ГЭС на Кавказе и в Средней Азии.

В выполнении НИР по проблеме 0.01.275 принимало участие более 90 организаций Минэнерго СССР, Минводхоза СССР, Минморфлота и Минречфлота РСФСР, Минсельхоза СССР, Госстроя СССР и союзных республик, институтов Академии наук и т.д. Проблема содержала 19 заданий, включающих 128 тем. По 7 заданиям ВНИИГ был ведущей организацией, по 10 — Гидропроект, по 2 — Оргэнергострой.

ВНИИГ как головная научно-исследовательская организация координировал проведение научно-исследовательских работ по проблеме 0.01.275. Было организовано 14 межведомственных координационных комиссий при ВНИИГ по основным проблемам гидротехники: основания и земляные сооружения (П. Д. Евдокимов, Д. Д. Сапегин); расчеты и конструкции бетонных и железобетонных гидросооружений (К. А. Мальцов, И. Б. Соколов); гидротехническое строительное производство (А. П. Бечин); гидротехнический бетон (В. В. Стольников, В. Б. Судаков); надежность системы “турбоагрегат — фундамент — основание” (И. С. Шейнин); сейсмостойкость гидросооружений (О. А. Савинов); натурные исследования гидросооружений (В. В. Блинков); фильтрация воды в грунтах и сооружениях (В. И. Аравин); инженерная гидравлика (М. Ф. Складнев); гидравлика промышленных сооружений (А. В. Аверкиев, И. И. Макаров); ледотермика водоемов и водотоков (И. Н. Соколов);

гидротехника Крайнего Севера (В. Е. Ляпин); народнохозяйственная эффективность водных ресурсов (Г. О. Левит); защита от коррозии и кавитации (Ю. У. Эдель).

В состав координационных комиссий входили представители научно-исследовательских, проектных, учебных и отдельных строительных организаций страны, участвующих в разработке научных тем. Комиссии осуществляли составление общих планов научно-исследовательских работ с распределением тем между отдельными исполнителями и с установлением сроков выполнения по ним; проводили обсуждения рабочих программ и методики исследований; оценку и обобщение результатов работ; разрабатывали мероприятия и предложения, направленные к ускорению темпов выполнения научно-исследовательских работ в области гидротехнического строительства и достижению наибольшего народнохозяйственного эффекта от их внедрения.

Одним из основных методов работы комиссий являлось проведение периодических координационных совещаний, в частности тематических совещаний по обсуждению отдельных научных проблем и вопросов плана научно-исследовательских работ. Материалы тематических совещаний представляли большой научный и практический интерес для широкого круга специалистов — научных работников, проектировщиков и строителей. Для концентрации этих материалов, быстрой реализации решений координационных совещаний и внедрения результатов научных работ в практику строительства и проектирования ВНИИГ как головной институт предпринимает издание “Трудов координационных совещаний” по научным работам в области гидротехники. Всего было издано 122 выпуска Трудов и 41 выпуск материалов конференций и совещаний, так с 1978 г. стали называться “Труды координационных совещаний”.

Координационная работа велась руководителями работ по заданиям проблемы 0.01.275, назначенным приказом Главниипроекта № 24 от 26 февраля 1971 г., а также по заданиям и темам других научно-технических проблем.

Научным руководителем работ по проблеме 0.01.275 был назначен директор ВНИИГ М. Ф. Складнев (приказ Минэнерго СССР № 319/р от 31 октября 1972 г.).

Кратко изложим результаты НИР по заданиям, по которым ВНИИГ был ведущей организацией.

Разработаны принципы и методы инженерно-геологической схематизации оснований, усовершенствована теория механики скальных пород, разработаны принципы геомеханического моделирования системы “плотина — основание”, предложены методы расчета устойчивости плотин и бере-

Научно-технические программы, которые координировал ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева как головная организация

№ п/п	Шифр проблемы (программы)	Наименование проблемы (программы)	Сроки выполнения (годы)	Основания для проведения работ	Документ, подтверждающий назначение головной организации
	2				
1	Государственная научно-техническая программа 0.01.250	Разработать новые экономичные конструкции мощных высоконапорных ГЭС и эффективные способы их возведения для районов сурового климата, повышенной сейсмичности и вечной мерзлоты, применительно к условиям Токтогульской, Рогунской, Саянской, Усть-Илимской и др. ГЭС, в том числе плотины из местных материалов, железобетонных гидросооружений облегченного типа и подземные машинные залы и энергетические водоводы в скальных грунтах	1966 – 1970	Постановление № 375 ГКНТ Совета Министров СССР от 9.12.1967 г. Раздел “Энергетика и энергетическое машиностроение”	Приказ № 50 по Министерству энергетики и электрификации СССР от 27.03.1970 г.
2	Государственная научно-техническая программа 0.01.275	Разработать мероприятия по более эффективному использованию гидроэнергоресурсов, внедрить прогрессивные конструкции и методы возведения комплексных гидроузлов и гидроэлектростанций (в том числе гидроаккумулирующих), сооружаемых в сложных природных условиях, с использованием более совершенных гидроагрегатов и строительной техники	1971 – 1975	Постановление № 410 ГКНТ Совета Министров СССР от 26.10.1970 г. Приложение № 45. Раздел “Электроэнергетика”	Приказ № 138 по Министерству энергетики и электрификации СССР от 03.06.1971 г.
3	Государственная научно-техническая проблема 0.01.05	Создать энергетическое оборудование и гидротехнические сооружения гидро- и гидроаккумулирующих электростанций для сложных природных условий	1976 – 1980	Постановление № 430 ГКНТ Совета Министров СССР от 26.11.1976 г. Приложение № 5. Раздел “Электроэнергетика”	Приказ № 69 по Главинпроекту Минэнерго СССР от 20.05.1976 г.
4	Государственная научно-техническая программа ГКНТ СМ СССР	О проведении научно-исследовательскими учреждениями Министерства энергетики и электрификации СССР, Министерства энергетического машиностроения и Госстроя СССР дополнительных научно-исследовательских работ по разработке виброизолированного фундамента под турбоагрегат мощностью 1000 МВт на 1500 об/мин	1978 – 1983	Постановление № 283 ГКНТ Совета Министров СССР от 22.06.1978 г.	Постановление № 283 ГКНТ Совета Министров СССР от 22.06.1978 г.
5	Государственная научно-техническая проблема 0.55.08	Разработать и внедрить новые технические решения и технологию строительства гидроэлектростанций в сложных природно-климатических условиях, а также гидроаккумулирующих электростанций и энергетических комплексов	1981 – 1985	Постановление № 134/592/281 Госстроя СССР и Госплана СССР от 31.12.1980 г. Приложение № 4. Раздел “Строительство”	Приказ № 204-а по Минэнерго СССР от 22.09.1981 г.
6	Общесоюзная научно-техническая программа 041 055.081	Энергетическое строительство. Разработать и внедрить экономичные технические решения для создания мощных гидравлических и гидроаккумулирующих электростанций, использования энергии средних, малых рек и морских приливов, уникальных морских сооружений для защиты от наводнений, а также технологию их скоростного строительства (гидроэнергетическое строительство)	1986 – 1990	Постановление № 10 Госстроя СССР от 30.01.1986 г.	Приказ № 79 Минэнерго СССР от 19.02.1986 г.

№ п/п	Шифр проблемы (программы)	Наименование проблемы (программы)	Сроки выполнения (годы)	Основания для проведения работ	Документ, подтверждающий назначение головной организации
	2				
7.	Отраслевая научно-техническая программа 0.04	Провести научное обоснование развития гидроэнергетики на длительную перспективу с учетом современных социально-экономических и экологических требований, обеспечить безопасную эксплуатацию гидроэнергетических объектов (Экологически чистая гидроэнергетика)	1991 – 1995	Указание № Д-51 – 14 по Минтопэнерго РФ от 16.04.1992 г.	Указание № Д-51 – 14 по Минтопэнерго РФ от 16.04.1992 г.
8	Отраслевая научно-техническая программа 0.12	Совершенствование гидротехнических сооружений и систем золоудаления и технического водоснабжения тепловых электростанций в целях повышения эффективности, надёжности и экологической безопасности ТЭС	1991 – 1995	Указание № Д-100 – 14 по Минтопэнерго РФ от 09.07.1992 г.	Указание № Д-100 – 14 по Минтопэнерго РФ от 09.07.1992 г.
9	Отраслевая научно-техническая программа 0.05	Гидроэлектростанции и энергетические сооружения	1996 – 1998	Приказ № 7/2-а по РАО “ЕЭС России” от 18.01.1996 г.	Приказ № 7/2-а по РАО “ЕЭС России” от 18.01.1996 г.

гов ущелий по предельным состояниям, проведены комплексные фильтрационные исследования, разработаны новые составы инъекционных растворов для закрепления скальных оснований (задание 0.01.280, П. Д. Евдокимов, Д. Д. Сапегин, соисполнители Гидропроект и Оргэнергосторой).

Разработаны методы изучения и прогнозирования сейсмических воздействий на гидросооружения различного типа, их основания и берега ущелий; организованы сейсмические станции на Ингурской, Чиркейской, Токтогульской, Нурекской и других ГЭС; проведены теоретические исследования, связанные с переходом на расчет гидросооружений по спектральной методике (задание 0.01.281, О. А. Савинов, соисполнители Гидропроект, ГрузНИИЭГС, ИСМиС, МИСИ, ЛПИ и др.).

Получили дальнейшее развитие теоретические методы механики грунтов: теории консолидации, прочности и устойчивости грунтовых сооружений; разработаны новые конструкции плотин с водопорными элементами из металла, асфальтов, полимерных материалов; результаты исследований внедрены на строительстве Усть-Хантайской, Усть-Илимской, Нурекской, Вилуйской и других ГЭС (задание 0.01.282, П. Д. Евдокимов, М. П. Павич).

Разработаны методы расчета на ЭВМ основных бетонных сооружений совместно с основанием по предельным состояниям; проведены исследования на упругих, прочностных и геомеханических моделях бетонных плотин Ингурской, Зейской, Курпсайской и других ГЭС; обоснованы новые критерии оценки прочности бетона, учитывающие вид

сложного напряженного состояния, микротрещинообразование, длительность нагружения, фильтрацию воды; предложены новые принципы армирования бетона (дисперсное армирование), экономичного размещения арматуры у отверстий и проемов; разработаны новые конструкции бетонных плотин для районов Крайнего Севера, в том числе из замороженного бетона (задание 0.01.284, К. А. Мальцов, И. Б. Соколов).

Разработаны эффективные конструкции водосбросных сооружений высоконапорных гидроузлов для районов с суровым климатом на многоводных реках, безнапорных и напорных водосбросов с расходами до 60 м³/с с поверхностными затворами пролетом 50 – 60 м и глубинными затворами на нагрузку до 10 тыс. т; предложены методы гидравлического и гидродинамического расчета водосбросов, пропускающих большие массы воды и льда, а также конструктивные и технологические мероприятия по защите бетонных сооружений от коррозии и кавитации; результаты исследований внедрены на Саяно-Шушенской, Рогунской, Бурейской и других ГЭС (задание 0.01.289, Ф. Г. Гунько, соисполнители Гидропроект, ГрузНИИЭГС, Гидросталь, ЛПИ, МИСИ, КазНИИЭ и др.).

Начато создание единой системы натурных исследований состояния ответственных гидротехнических сооружений, изучены вопросы организации натурных наблюдений, разработаны новые типы КИА, организовано ее промышленное изготовление, образованы автоматизированные комплексы для натурных наблюдений на Саяно-Шушенской и других ГЭС (задание 0.01.290, В. В. Блинков, соис-

полнители Гидропроект, Оргэнергострой, Гипроводхоз, Союзморниипроект, Гидроречтранс и др.).

При выполнении работ по заданию 0.01.291 были предложены новые виды строительных материалов для гидротехнического строительства:

бетоны высокой прочности приготовленные на высокоактивных цементах, шлакопортландцементе; бетоны с повышенной морозоустойчивостью; бетоны с добавками, регулирующими сроки схватывания др. Разработаны технологии бетонирования “литыми” бетонами и бетонами без крупных заполнителей, “льдобетонами” и т.п., а также ускоренные методы контроля прочности (В. Б. Судачков);

гидроизоляционные материалы, битумно-полимерные композиции, эпоксидные и др. Разработаны методы расчета и конструирования полимерных, пленочных экранов; созданы новые виды гидроизоляции бетона асфальтокерамзитобетонами, асфальтошлакобетонами и др., уплотнение деформационных швов полимерными герметиками (С. Н. Попченко).

Соисполнителями НИР по этому заданию были Гидропроект, Оргэнергострой, ГрузНИИЭГС, Союзморниипроект, ВНИИГиМ, ИФХ, Гидроспецстрой и др.

Кроме работ по проблемам, перечисленным в приведенной таблице, ВНИИГ участвовал как соисполнитель в решении следующих проблем, входящих в Государственный план развития народного хозяйства СССР:

0.01.225. Создать новые эффективные конструкции энергетического оборудования гидроэлектростанций, имеющие более высокие эксплуатационные характеристики и экономические показатели;

0.01.025. Создать и освоить в эксплуатации мощные высоконадежные автоматизированные энергетические блоки (котел — турбина — генератор — трансформатор), провести научные исследования и опытные работы по дальнейшему повышению параметров пара и единичных мощностей энергетических блоков;

0.01.325. Разработать научные основы и мероприятия по комплексному и эффективному использованию в народном хозяйстве водных ресурсов страны и охране их от загрязнения;

0.54.325. Разработать и внедрить новые эффективные системы транспорта высокой производительности для перемещения грузов на дальние расстояния, включая ленточные конвейеры для крупнокузовых грузов, трубопроводный, пневматический и гидравлический транспорт; создать и внедрить экономичные конструкции однопорельсовых грузовых дорог;

0.71.075. Создать и освоить новые способы и средства комплексной переработки и использова-

ния твердого топлива, обеспечивающие значительное повышение его эффективности в народном хозяйстве и предотвращение загрязнения окружающей среды;

0.74.375. Создать улучшенную карту сейсмического микрорайонирования и провести микрорайонирование крупных городов и промышленных центров и строек, расположенных в сейсмических районах. Разработать методику выявления предвестников землетрясений. Исследовать и определить по натурным наблюдениям параметры колебательного процесса типовых зданий, промышленных сооружений и плотин при сильных землетрясениях. Разработать научно обоснованную шкалу и систему измерения сейсмической балльности. Разработать методы расчета зданий и сооружений на сейсмические воздействия с учетом действительного характера деформаций зданий и сооружений и создать новые экономичные конструкции для строительства в сейсмических районах.

Для тепловых и атомных электростанций были проведены комплексные исследования систем технического водоснабжения Печорской, Углегорской, Березовской, Лукомльской ГРЭС, Магаданской ТЭС, Смоленской, Южно-Украинской АЭС и др.; исследования, связанные с созданием экономичных конструкций фундаментов для турбоагрегатов большой единичной мощности (Костромская ГРЭС); исследования по комплексному использованию золошлаковых отходов ТЭС.

Помимо указанных проблем ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева являлся ответственным за выполнение отдельных заданий I уровня, таких, как:

“Провести исследования, разработать и обосновать конструкцию системы турбоагрегат — фундамент — основание с низкочастотной виброизоляцией для турбоагрегата мощностью 200 – 300 МВт и провести ее модельные испытания” (задание 0.01.031П, 1971 – 1976 гг.);

“Разработка и внедрение бессточных систем гидрозолоудаления тепловых электростанций и рациональных методов складирования золы, обеспечивающих защиту водных объектов от загрязнений” (задание 0.85.02.04.02.04, 1976 – 1980 гг.);

“Сейсмостойкость ТЭС, подстанций и сетей (задание 02), сейсмостойкость энергетического оборудования (задание 03), совершенствование нормативной и информационной базы (задание 04)” ОНТП 0.11 “Сейсмостойкость энергетических объектов” в 1992 – 1995 гг.; идентичные задания (03, 05, 07) в 1996 – 1998 гг.

С 1975 по 1989 г. за успехи при выполнении комплексных программ по решению заданий важнейших научно-технических проблем в области энергетики ВНИИГ как головная организация десять раз награждался переходящим Красным Зна-

менем ЦК КПСС, Совета Министров СССР, ВЦСПС и ЦК ВЛКСМ, пять раз заносился на Всесоюзную Доску почета; дважды институт награждался памятными знаками “За высокую эффективность и качество работы”.

Решением коллегии Госстроя России от 10 ноября 1993 г. были подтверждены функции ВНИИГ им. Б. Е. Веденева как головной организации по направлению научных исследований в области гидротехнических сооружений и экологических технологий энергетики, а также по разработке новых и пересмотру действующих нормативных документов по гидротехническим сооружениям.

Координационная деятельность института проводилась вплоть до 2002 г. С образованием в 2004 г. ОАО “ГидроОГК” по инициативе председателя Правления В. Ю. Синюгина восстановлена традиция проведения научно-технических конференций на базе ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденева”. Первая конференция “Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии” была проведена в декабре 2005 г., пятая — в ноябре 2010 г. В соответствии с приказом ОАО “ГидроОГК” № 122 от 11 августа 2006 г. (актуализирован 21 июля 2010 г. приказом ОАО “РусГидро”) были установлены ежегодные денежные премии ОАО “ГидроОГК” за лучшие научно-исследовательские работы в области гидроэнергетики и утверждены положения о награждении заслуженных ученых-ветеранов и молодых уче-

ных-гидроэнергетиков. Вручение премий за лучшие НИР и награждение заслуженных ученых ветеранов и молодых проходят в торжественной обстановке на пленарных заседаниях научно-технических конференций “Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии”.

В работах по координации участвовали ведущие ученые и научные деятели ВНИИГ и организаций-соисполнителей. Перечислить всех не представляется возможным. Однако мы, авторы данной публикации, много лет бывшие в числе тех, кто участвовал в координационной деятельности, считаем своим долгом назвать трех человек, внесших неоценимый вклад в это дело. Это М. Ф. Складнев — директор ВНИИГ, бессменный руководитель координационных программ; его главный помощник известный ученый и крупный инженер М. Павчич и инженер З. П. Романовская.

С 2010 г. в ОАО “РусГидро” образуется инвестиционный фонд, средства которого предполагается направлять, в том числе, на финансирование задельных научно-технических разработок. При планировании этих разработок, координации работ организаций-соисполнителей, оценки результатов выполненных НИР ОАО “РусГидро” может воспользоваться опытом координационной деятельности по государственным и отраслевым научно-техническим программам.

Формирование единой общегосударственной системы нормативных документов по проектированию гидротехнических и энергетических сооружений и их оснований

Пак А. П., кандидат техн. наук (ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”)

Приведены основные положения деятельности ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева по формированию единой общегосударственной и отраслевой системы нормативных документов по проектированию гидротехнических сооружений и их оснований, направлениях развития технического нормирования по гидротехническим сооружениям. Перечислены основные СНиПы, ГОСТы, СТО, разработанные специалистами института, а также результаты основных научных разработок, внедренных в практику гидротехнического и гидроэнергетического строительства.

Ключевые слова: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, техническое нормирование, СНиПы, ГОСТы, рекомендации, СТО, внедрение результатов основных НИР.

Нормативные документы для проектирования первых гидротехнических объектов разрабатывались в самих проектных организациях. Так, например, в институте “Гидропроект” были выпущены “Нормы и технические условия проектирования гидротехнических сооружений гидроэлектростанций”, в которых при обосновании прочности бетонных и железобетонных конструкций за основу, естественно, за неимением других, принимались общестроительные нормы и технические условия проектирования. Опыт проектирования, строительства и эксплуатации гидроузлов, результаты выполненных экспериментальных исследований показали, что конструкции элементов гидротехнических сооружений, технология их возведения и условия работы материалов существенно отличаются от таковых для промышленных и гражданских сооружений. Это обусловило необходимость разработки самостоятельных нормативных документов, что стало особенно актуальным в послевоенные годы, когда в стране началось освоение гидроэнергетических ресурсов Сибири и Дальнего Востока, Кавказа и Средней Азии.

Разработкой нормативно-методических документов ВНИИГ начал заниматься практически со дня основания. К работе по их составлению были привлечены ведущие специалисты института, многие из которых еще в конце 1930-х — начале 40-х гг. участвовали в рассмотрении и обсуждении выпускавшихся центральным проектным кабинетом Гидропроекта норм, технических условий и инструкций Главгидроэнергостроя Народного комиссариата электростанций СССР для проектирования гидротехнических сооружений ГЭС. Один из первых нормативных документов “Временные технические условия для проектирования и сооружения фильтрующих дамб на железных дорогах” [1] был разработан в 1932 г. Н. П. Пузыревским.

В связи с развитием в 1930-е гг. в нашей стране гидротехнического строительства возникла необходимость в создании целой группы нормативных до-

кументов, в связи с чем в 1935 – 1938 гг. во ВНИИГ было создано Бюро технических условий и норм проектирования гидротехнических сооружений, возглавляемое И. А. Гиршканом, а затем А. А. Пичужкиным. В 1940 – 1941 гг. были разработаны и введены в действие ряд ТУиН [2 – 6]. Все ТУиН перед утверждением рассматривались специальной экспертной комиссией Народного комиссариата электростанций СССР (затем Министерства электростанций СССР). В этих документах рассматривался и решался широкий круг вопросов, они явились основой для разработки последующих нормативных документов.

Первый нормативный документ, охватывающий все разделы ледотермики и ледотехники, появился в 1939 г. — “Нормы расчета гидротехнических сооружений, возводимых в условиях зимнего режима”. Этот норматив широко использовался в инженерной практике даже в 1960-е гг. В его составление внесли вклад сотрудники ВНИИГ Д. Н. Бибииков, Н. Н. Петруничев, А. М. Естифеев, Г. С. Шадрин, А. И. Пехович.

Это был период, когда нормативные документы по гидроэнергетике разрабатывались и утверждались ведомством и для ведомства (Министерства электростанций СССР).

С 1959 г. нормативные документы по гидротехническим сооружениям разрабатывались по планам Государственного комитета Совета Министров СССР по делам строительства (Госстрой СССР) и утверждались этим комитетом по представлению соответствующего министерства или ведомства. Таким образом, статус нормативных документов был поднят до общегосударственного уровня. Одним из первых документов из этой серии были строительные нормы СН 55 – 59 “Нормы и технические условия проектирования бетонных и железобетонных гидротехнических сооружений”, разработанные ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева при участии института “Гидропроект” им. С. Я. Жука, ТНИС-ГЭИ им. А. В. Винтера и НИИЖБ.

В 1960 г. были введены в действие СН 123-60 “Нормы и технические условия проектирования бетонных гравитационных плотин на скальных основаниях”, разработанные ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева совместно с Ленинградским отделением института “Гидроэнергопроект”. В этом документе впервые рассматривались вопросы совместной работы сооружения со скальным основанием. В нем были регламентированы основные требования, предъявляемые к скальным основаниям плотин; рассмотрены вопросы, связанные с устройством противофильтрационных завес, дренажа основания, площадной цементации, с расчетами прочности оснований и устойчивости плотин; регламентированы различные расчетные схемы сдвига; даны структура коэффициента запаса устойчивости и его допустимые значения: для основного сочетания нагрузок 1,3 – 1,15, для особого — 1,1 – 1,05.

В начале 1960-х гг. была поставлена задача создания комплексной системы нормативных документов по проектированию сооружений, обеспечивающей с заданной вероятностью их надежность и безопасность при оптимальных технико-экономических показателях. Началом создания такой системы нормативных документов в гидротехническом строительстве были разработка и ввод в действие в 1962 – 1965 гг. целой группы СНиПов на проектирование гидротехнических сооружений, в составлении которых одно из ведущих мест занимал ВНИИГ:

СНиП 11-И. 1-62 “Гидротехнические сооружения речные. Основные положения проектирования” (ведущий разработчик ВНИИГ);

СНиП -Б. 3-62 “Основания гидротехнических сооружений. Нормы проектирования” (ведущий разработчик ВНИИГ);

СНиП II-И.4.62 “Плотины земляные насыпные. Нормы проектирования” (ведущий разработчик ВНИИВОДГЕО);

СНиП — П.5-62 “Плотины земляные намывные. Нормы проектирования” (ведущий разработчик ВНИИВОДГЕО);

СНиП II-И.6-62 “Плотины каменно-набросные. Нормы проектирования” (ведущий разработчик ВНИИВОДГЕО);

СНиП II-И. 10-65 “Подпорные стены гидротехнических сооружений. Нормы проектирования” (ведущий разработчик институт “Гидропроект” им. С. Я. Жука);

СНиП II-И.12-67 “Бетонные и железобетонные гравитационные плотины на нескальных основаниях. Нормы проектирования” (ведущий разработчик ВНИИГ);

СНиП-И.14-09 “Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Нормы проектирования” (ведущий разработчик ВНИИГ).

В 1973 г. взамен СНиП II-И.4-62, 5-62; 6-62 была введена в действие глава СНиП II-53-73 “Плотины из грунтовых материалов”, разработанная ВНИИГом и Гидропроект с участием треста “Гидромеханизация”, ВНИИВОДГЕО, Союзводпроект, МИСИ и других организаций.

Система нормативных документов в области проектирования гидротехнических сооружений окончательно сложилась в середине 70-х гг. прошлого века. С 1 июля 1975 г. введен в действие СНиП II-50-74 “Гидротехнические сооружения речные. Основные положения проектирования”, позднее утверждены СНиП II-57-75 “Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)”, СНиП II-16-76 “Основания гидротехнических сооружений”, СНиП II-55-79 “Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения”, СНиП II-54-77 “Плотины бетонные и железобетонные”, СНиП II-56-77 “Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений”. В разработке этих СНиПов ведущими организациями были ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева и Гидропроект им. С. Я. Жука. В работе также участвовали Гипропротранс, Ленинградское отделение института “Теплоэлектропроект”, СКБ “Мосгидросталь”, ГосНИОРХ, Ленгипроводхоз, ЛенморНИИпроект, ЛПИ, ОИИМФ, ЛИВТ и другие организации. При разработке этой группы нормативных документов ВНИИГу пришлось преодолеть значительные трудности, связанные с нежеланием некоторых крупных специалистов других организаций перейти от традиционных методов расчета с единым коэффициентом запаса на метод предельных состояний с частными коэффициентами безопасности.

Концептуальные положения расчета по предельным состояниям обсуждались на многочисленных совещаниях, в том числе на технических советах Минэнерго СССР, у заместителя председателя Госстроя СССР А. А. Борового, на специальном заседании НТО энергетической промышленности. Результаты обсуждения принципиальных основ метода расчета по предельным состояниям и данных опытного проектирования подтвердили прогрессивность этого метода и необходимость включения его в нормативные документы по проектированию гидротехнических сооружений.

В первой половине 1980-х гг. по заданию Госстроя СССР и ГлавНИИпроект Минэнерго СССР были начаты работы по пересмотру всей группы СНиПов, введенных в действие в 1973 – 1979 гг., что дало возможность в 1984 – 1987 гг. ввести в действие следующие СНиПы:

СНиП 2.06.04-82 “Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)”;

СНиП 2.06.05-84 “Плотины из грунтовых материалов”;

СНиП 2.06.09-84 “Туннели гидротехнические”;

СНиП 2.06.06-85 “Плотины бетонные и железобетонные”;

СНиП 2.02.02-85 “Основания гидротехнических сооружений”;

СНиП 2.06.01-86 “Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования”;

СНиП 2.06.08-87 “Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений”;

СНиП 2.06.07-87 “Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения”.

В разработке СНиП 2.06.01-86 участвовало большое число организаций различных министерств и ведомств СССР и РСФСР. Положения этого документа распространяются на проектирование как речных, так и морских гидротехнических сооружений, в том числе портовых, нефтегазопромысловых и др. Это обеспечило единые принципы оценки надежности всех гидротехнических сооружений. Приведены классы этих сооружений в зависимости от социального, экономического и экологического ущерба, связанного с их разрушением или ухудшением условий эксплуатации.

Наряду с работами по разработке нормативных документов во ВНИИГ велась также работа по разработке государственных и отраслевых стандартов (ГОСТ, ОСТ). Основной тематикой ГОСТов и ОСТов были вопросы технологии бетона и бетонных работ в гидротехническом строительстве. Используя результаты наиболее значимых разработок и исследований, специалисты ВНИИГ разработали, а Госстрой СССР утвердил и ввел в действие следующие ГОСТы:

ГОСТ 4795-68 “Бетон гидротехнический. Общие требования” (утвержден в 1949 г., переработан в 1959 г.);

ГОСТ 4796-49 “Бетон гидротехнический. Признаки и нормы агрессивности воды-среды”;

ГОСТ 10268-80 “Бетон гидротехнический. Технические требования к заполнителям” (утвержден в 1949 г., как ГОСТ 4797-49, переработан в 1969 г.);

ГОСТ 4798-49 “Бетон гидротехнический. Методы испытаний материалов для его приготовления”;

ГОСТ 4801-49 “Бетон гидротехнический. Проектирование составов”;

ГОСТ 310.5-80 “Цементы. Метод определения теплоты гидротации”;

ГОСТ 24316-80 “Бетоны. Методы определения тепловыделения при твердении”;

ГОСТ 25818-83 “Зола-унос тепловых электростанций как добавка к бетонам. Технические условия”;

ГОСТ 25592-83 “Смесь золошлаковая тепловых электростанций для бетона”;

ГОСТ 10060-49 “Бетон. Методы контроля морозостойкости бетона”;

ГОСТ 34-4618-73 “Бетон гидротехнический. Методы испытаний бетона” (утвержден в 1949 г., как ГОСТ 4800-49, переработан в 1973 г.).

Основными разработчиками этих ГОСТов были В. В. Стольников и В. Б. Судаков.

В 1973 г. был утвержден ГОСТ 19185-73 “Гидротехника. Основные понятия. Термины и определения”, разработанный ВНИИГом (Н. С. Розанов, И. Е. Дубровский, А. А. Никольский) и Гидропроект (И. Л. Сапир, Л. Б. Шейнман, М. Д. Глезин).

В 1981 г. М. В. Печенкин и М. Г. Селянинов разработали ГОСТ 8.439-81 “Расходы воды в напорных трубопроводах методом площадь-скорость”, который утвердил Госстандарт СССР.

В 2002 г. началась работа по пересмотру всех СНиПов по гидротехнике. Работа закончилась в первом полугодии 2003 г., однако Госстрой России успел рассмотреть и утвердить только один СНиП 33-01-2003 “Гидротехнические сооружения. Основные положения” (взамен СНиП 2.06.01-86). А 27 декабря 2002 г. вышел Федеральный закон “О техническом регулировании” № 184-ФЗ, который вступил в силу 1 июля 2003 г. и изменил всю идеологию технического нормирования в стране. Законом установлено, что техническое регулирование — это правовое регулирование отношений в области установления, применения и исполнения обязательных требований к продукции или к связанным с ними процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, а также в области установления и применения на добровольной основе требований к продукции, процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнению работ по оказанию услуг и правовое регулирование отношений в области оценки соответствия. В соответствии с этим страна переходит к разработке и принятию двух видов документов в сфере технического регулирования: технических регламентов и документов в области стандартизации.

Технические регламенты должны устанавливать обязательные для применения и исполнения требования к объектам технического регулирования (продукции), в том числе зданиям, строениям и сооружениям, или к связанным с требованиями к продукции процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, ре-

лизации и утилизации. Технические регламенты принимаются в целях:

защиты жизни или здоровья граждан, имущества физических или юридических лиц, государственного или муниципального имущества;

охраны окружающей среды, жизни или здоровья животных и растений;

предупреждения действий, вводящих в заблуждение приобретателей.

Принятие технических регламентов в иных целях не допускается.

К документам в области стандартизации, используемым на территории Российской Федерации, относятся:

национальные стандарты;

правила стандартизации, нормы и рекомендации в области стандартизации;

применяемые в установленном порядке классификации, общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации;

стандарты организаций;

своды правил.

Со дня вступления в силу Федерального закона № 184 впрямь до вступления в силу соответствующих технических регламентов требования к продукции или к связанным с ними процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, установленные нормативными правовыми актами Российской Федерации и нормативными документами федеральных органов исполнительной власти, подлежат обязательному исполнению только в части, соответствующей целям:

защиты жизни или здоровья граждан, имущества физических или юридических лиц, государственного или муниципального имущества;

охраны окружающей среды, жизни или здоровья животных и растений;

предупреждения действий, вводящих в заблуждение приобретателей.

Технические регламенты должны быть приняты в течение семи лет со дня вступления в силу Федерального закона № 184, т.е. в период 2003 – 2010 гг. Обязательные требования к продукции, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, в отношении которых технические регламенты в указанный срок не были приняты, прекращают действие по его истечении.

Следует также подчеркнуть, что в соответствии с логикой Федерального закона “О техническом регулировании” предполагалась следующая последовательность разработки документов в сфере технического регулирования: первыми должны разрабатываться технические регламенты, а затем национальные стандарты, стандарты организаций,

содействующие соблюдению требований технических регламентов. В гидротехнике эта последовательность была нарушена и первыми начали разрабатываться стандарты организаций — стандарты РАО “ЕЭС России”, затем ОАО “ГидроОГК” (ОАО “РусГидро”).

Работа по разработке технического регламента “О безопасности гидротехнических сооружений” была включена в план Правительства Российской Федерации, и в 2005 – 2007 гг. ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” по договору с Минпромэнерго РФ вело эту работу. Разработанный проект текста технического регламента был согласован с 12 министерствами и ведомствами Российской Федерации и был направлен для согласования в администрацию Правительства РФ, а по ее указанию должна была рассматриваться в межведомственной комиссии при Минпромэнерго. Однако работа не была завершена в связи с принятием Федерального закона о внесении изменений в Федеральный закон “О техническом регулировании” от 1 мая 2007 г. № 65-ФЗ, по которому до 1 января 2010 г. должны быть приняты 17 первоочередных технических регламентов. Технический регламент “О безопасности гидротехнических сооружений” в этот список не вошел.

В 2008 г. по инициативе ОАО “ГидроОГК” и ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” РАО “ЕЭС России” заказало ВНИИГ работу по разработке проекта технического регламента “О безопасности гидротехнических сооружений электрических станций”. Проект технического регламента был рассмотрен в более чем 15 организациях и компаниях, был одобрен рабочей комиссией ОАО “РусГидро” по техническому нормированию и стандартизации и по представлению председателя Правления РусГидро был передан в Государственную Думу. В 2010 г. проект регламента от имени депутатов Государственной Думы (В. А. Пехтин и др.) был представлен для рассмотрения и начала процедуры утверждения в Президиум Госдумы РФ. В настоящее время эта работа приостановлена в связи с образованием Таможенного Союза и ЕврАзЭС.

Тем временем в стране продолжалась работа по техническому регулированию, особенно в отрасли строительства. В частности, многие специалисты дискутировали вопрос об обязательности или добровольности выполнения требований нормативных документов, принятых в свое время федеральными органами исполнительной власти. 30 декабря 2009 г. был принят Федеральный закон “Технический регламент о безопасности зданий и сооружений” № 384-ФЗ. В соответствии с частью 1 статьи 6 этого Федерального закона Правительство Российской Федерации утверждает перечень национальных стандартов и сводов правил (частей таких

стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований № 384-ФЗ. Распоряжением Правительства РФ от 21 июня 2010 г. № 1047-р такой перечень, куда вошли и восемь СНиПов по гидротехническим сооружениям, был утвержден.

Кроме документов государственного уровня во ВНИИГ с 40-х гг. прошлого столетия разрабатывались еще ведомственные нормативные документы, а также рекомендации по отдельным вопросам проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений [10]. Рекомендации были опытным полигоном, где новые, полученные в результате выполнения научно-исследовательских работ решения проходили проверку проектными, строительными и эксплуатационными организациями и затем использовались при разработке государственных и ведомственных нормативных документов.

Содержание нормативных документов по основным направлениям гидротехники были изложены в “Известиях ВНИИГ” [7 – 9]. Разработка нормативных документов, подготовленных во ВНИИГ, велась по следующим направлениям:

- речная гидравлика, гидравлика открытых русел и акваторий;

- водопропускные и водосбросные сооружения гидроузлов;

- гидротурбинные блоки и затворные камеры водопроводящих трактов;

- ледовые проблемы бьефов и сооружений;

- система технического водоснабжения и охладителей тепловых и атомных электростанций;

- гидромеханизация и гидрозолоудаление;

- основания и грунтовые сооружения;

- бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений.

Нормативные документы, разработанные ВНИИГ, всегда были основаны на результатах последних научных достижений в области гидротехнических сооружений и гидротехнического строительства. В частности, в них нашли отражение:

- расчеты по методу предельных состояний;

- методы определения нагрузок и воздействий, характерных в основном для гидротехнических сооружений: волновых, ледовых, от судов, температурных;

- разбивка гидротехнических сооружений на классы;

- вероятностный анализ для обоснования принимаемых технических решений системы “сооружение — основание”;

- учет объемного напряженного состояния при определении расчетных сопротивлений бетона, а для нескальных оснований и сооружений I класса — метод трехосного сжатия;

- расчет фильтрационных объемных и поверхностных сил в теле и основании плотин с учетом коэффициента эффективного противодействия;

- уменьшение значения обеспеченности нормативных сопротивлений бетона для массивных гидротехнических сооружений и др.

Как уже упоминалось, в соответствии с Федеральным законом “О техническом регулировании” Правительство Российской Федерации утверждает программы разработки технических регламентов, которые полностью и частично финансируются за счет федерального бюджета и которые ежегодно должны уточняться и опубликовываться. При этом закон допускает, что технические регламенты также могут быть разработаны вне утвержденной программы.

В связи с тем что разработка технических регламентов по гидроэнергетике по разным обстоятельствам затягивалась руководством РАО “ЕЭС России” было принято решение об интенсификации работ по разработке стандартов организаций (СТО) РАО “ЕЭС России”, а потом ОАО “ГидроОГК” (ОАО “РусГидро”). Работа эта выполнялась и выполняется по традиционной в современных экономических условиях схеме — через посредников. Тендеры на разработку стандартов организаций выигрывают ИНВЭЛ и НП “Гидроэнергетика России”, которые затем заключают договоры субподряда с организациями, имеющими соответствующих специалистов.

Таким образом, ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” участвовало в разработке следующих СТО:

- СТО 17330282.27.140.002-2008 “Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Условия создания. Нормы и требования”;

- СТО 17330282.27.140.003-2008 “Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования”;

- СТО 17330282.27.140.017-2008 “Механическое оборудование гидротехнических сооружений ГЭС. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования”;

- СТО 70238424. 27.140.026-2009 “Гидроэлектростанции. Оценка и прогнозирование рисков возникновения аварий гидротехнических сооружений. Нормы и требования”;

- СТО 70238424. 27.140.029-2009 “Гидроэлектростанции. Контроль качества производства работ в процессе строительства. Нормы и требования”;

- СТО 70238424. 27.140.035-2009 “Гидроэлектростанции. Мониторинг и оценка технического состояния гидротехнических сооружений в процессе эксплуатации. Нормы и требования”;

СТО 70238424. 27.140.037-2009 “Гидроэлектростанции. Научное обоснование создания гидроэнергетических объектов. Нормы и требования”;

СТО 70238424. 27.140.035-2009 “Гидроэлектростанции. Долговременные наблюдения за развитием техноприродных процессов в зоне взаимодействия оснований и сооружений. Нормы и требования”.

Работой по этим СТО в институте руководил А. Г. Василевский, а в разработке самих СТО принимали участие А. Л. Гольдин, В. Б. Судаков, В. Б. Штильман, О. М. Финагенов, В. С. Кузнецов, Н. Ф. Кривоногова.

Большой вклад в разработку нормативных документов по проектированию гидротехнических сооружений за всю историю их создания внесли многие сотрудники ВНИИГ. Кроме уже перечисленных это С. С. Антонов, В. И. Аравин, Б. В. Архангельский, А. М. Архипов, В. С. Баумгарт А. З. Басевич, Б. Н. Беллендир, А. И. Боткин, Е. Н. Борщевский, С. С. Бушканец, П. И. Васильев, А. Б. Векслер, О. К. Воронков, Ц. Г. Гинзбург, Б. С. Гимейн, Готлиф, Л. В. Горелик, Л. А. Гордон, В. Б. Глаговский, М. Г. Гладков А. М. Гуреев, Ф. Г. Гунько, Д. П. Дубяго, В. Н. Дурчева, А. А. Евневич, П. Д. Евдокимов, В. Н. Жиленков, М. А. Зубрицкая, А. Я. Иохельсон, Н. А. Кандыба, А. В. Караваев, В. Н. Карнович, А. Д. Кауфман, Б. Г. Картелев, Д. Д. Лаппо, М. С. Ламкин, Н. Д. Красников, Т. Ф. Липовецкая, В. А. Логунова, К. А. Мальцов, Мелещенко, В. А. Мелентьев, А. Е. Минарский, А. Л. Можевитинов, В. И. Новоторцев, Н. Н. Павловский, Л. Н. Павловская, М. Павчич, Л. Б. Певзнер, Попов, Г. Х. Праведный, В. С. Прокопович, Н. П. Пузыревский, В. Г. Радченко, Н. С. Розанов, Г. Л. Рубинштейн, О. А. Савинов, Д. Д. Сапегин, И. Б. Соколов, Е. А. Смирнов, А. П. Троицкий, Л. П. Трапезников, Э. А. Фрейберг, Л. П. Фрадкин, В. А. Флорин, А. А. Храпков, И. Н. Шаталина, Н. Ф. Щавелев, А. В. Швецов, А. М. Швайнштейн, Р. А. Ширяев, С. Г. Шульман, Р. Р. Чугаев, Г. А. Чугаева, С. Я. Эйдельман, Л. А. Эйслер, Г. Б. Яппу.

Активное участие в создании рассмотренных в статье нормативных документов принимали спе-

циалисты Госстроя СССР: А. М. Бойко, Е. А. Троицкий, М. М. Борисова, Д. В. Петухов, В. А. Кулиничев, Ф. В. Бобров.

ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева накопил значительный опыт по разработке, пересмотру основных нормативно-технических документов государственного и отраслевого уровня и является признанным лидером в этих вопросах в России и постсоветском пространстве. В связи с важностью этого направления для будущего развития гидроэнергетики одной из важнейших задач является сохранение и развитие потенциала ВНИИГ в данной деятельности.

Список литературы

1. *Временные* технические условия для проектирования и сооружения фильтрующих дамб на железных дорогах. 1932.
2. *ТУ 24-102-40*. Технические условия и нормы определения геотехнических характеристик грунта. 1941.
3. *ТУ 24-103-40*. Технические условия и нормы проектирования гидротехнических сооружений. Геотехнические расчеты оснований. 1941.
4. *ТУ 24-105-40*. Технические условия расчета фильтрации под гидротехническими сооружениями. 1941.
5. *ТУ 24-104-40*. Технические условия и нормы проектирования гидротехнических сооружений. Земляные насыпные плотины. 1941.
6. *Деривационные* каналы гидроэлектростанций. Технические условия и нормы проектирования гидротехнических сооружений. — Л.: Госэнергоиздат, 1948.
7. *Векслер А. Б., Макаров И. И., Печенкин М. В., Шаталина И. Н., Швайнштейн А. М., Шрагин Н. В.* Нормативно-методические документы в области гидравлики сооружений и оборудования гидравлических и тепловых электростанций // *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1997. Т. 230. С. 321 – 343.
8. *Сапегин Д. Д., Пак А. П., Ширяев Р. А., Липовецкая Т. Ф.* Основные этапы формирования системы нормативных документов по проектированию оснований гидротехнических сооружений и плотин из грунтовых материалов // *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1997. Т. 231. С. 615 – 646.
9. *Караваев А. В., Пак А. П.* Нормативные документы по проектированию бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений // *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*, 1997. Т. 232. С. 315 – 326.
10. *Перечень* нормативно-технических документов по гидротехнике, разработанных ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. По состоянию на 1 мая 2006 г. — СПб., 2006.

Гидравлические и ледотермические исследования гидротехнических сооружений в работах ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева

Бакановичус Н. С., кандидат техн. наук,
Векслер А. Б., ведущий научн. сотрудник,
Климович В. И., доктор физ.-мат. наук,
Прокофьев В. А., Судольский Г. А., Шаталина И. Н.,
Швайнштейн А. М., кандидаты техн. наук
(ОАО "ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева")

Статья посвящена развитию гидравлических и ледотермических исследований от даты создания института до наших дней. Отмечены основные научные направления деятельности, которые легли в основу проектирования, строительства и эксплуатации крупнейших гидроузлов страны.

Ключевые слова: гидравлические и ледотермические исследования, научные направления, научное обоснование, компоновки водосбросных сооружений, кавитация, аэрация, пропуск расходов воды, неустановившееся движение воды, численные алгоритмы, программный комплекс FLOW-3D®, волна прорыва, транспорт наносов, термический и ледовый режимы бьефов, ледовые нагрузки, гидравлический удар, обмерзание механического оборудования.

Гидравлические и ледотермические исследования для обоснования проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений являются одним из основных направлений в деятельности ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева.

Создание гидравлических лабораторий и определение их научной направленности в 20 – 30-е годы осуществлялось под руководством и при непосредственном участии крупнейших ученых гидравликов и гидротехников Н. Н. Павловского, М. А. Великанова, В. Е. Тимонова, А. А. Сабанеева, И. В. Егиазарова. Определяющее влияние на развитие гидравлических и ледотермических исследований в институте в предвоенные и послевоенные годы оказали И. И. Леви, А. Н. Рахманов, М. Д. Чертоусов, П. А. Войнович, Р. Р. Чугаев, Б. В. Проскуряков, М. Ф. Складнев, А. П. Зегжда, М. А. Дементьев, Д. И. Кумин, С. В. Избаш, А. Н. Патрашев, А. И. Шварц, М. Э. Факторович, А. С. Абелев, Ф. Г. Гунько, Д. Н. Бибигов. Их трудами и организаторским талантом были созданы научные коллективы, обеспечившие не только дальнейшее развитие инженерной гидравлики и гидроледотермики как научных дисциплин, но и разработавшие гидравлическое обоснование великих гидроэнергетических строек 1950 – 1980-х гг. [1].

В гидравлических лабораториях ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, его Сибирского филиала (г. Красноярск) и Днепродзержинского отделения в 1950 – 1980 гг. выполнялись исследования сооружений Новосибирского, Братского, Камского, Цимлянского, Горьковского (Нижегородского), Каховского, Кременчугского, Днепродзержинского, Дубоссарского, Бухтарминского, Чарвакского, Кайраккумского, Мингечаурского, Красноярского, Плявиньского, Чиркейского, Миатлинского, Вилюйского, Зейского, Усть-Хантайского, Саяно-Шушенского, Колымского, Ирганайского, Днестров-

ских (ГЭС и ГАЭС), Константиновского и других гидроузлов Советского Союза, а также ряда зарубежных стран Наглу (Афганистан), Саньмынься (Китай). Проводилось обоснование гидротехнических сооружений крупных тепловых электростанций, портов на Черном, Балтийском и Каспийском морях, на Дунае, Енисее и Амуре. Были развернуты широкие многосторонние исследования для обоснования проекта и строительства сооружений Комплекса защиты Ленинграда — Санкт-Петербурга от наводнений. Результатом выполнявшихся научных разработок явилось создание методов исследований, рекомендаций по выполнению расчетов и составлению прогнозов различных гидравлических явлений, с которыми приходится сталкиваться в процессе проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений.

Исследования гидравлики сооружений и их оборудования. Гидравлические исследования гидротехнических сооружений характеризуются комплексным подходом к изучению всей совокупности процессов, происходящих в периоды строительства и эксплуатации объектов. Значительное внимание при этом всегда уделялось теории подобия и вопросам гидравлического моделирования сооружений и явлений, а также сопоставлению результатов исследований на моделях и в натуре. Работы этого направления были обобщены в монографиях С. В. Избаша, А. П. Зегжды, И. И. Леви. Сопоставление результатов измерений различных гидравлических характеристик (например, пульсаций давления и аэрации) на действующих водосбросах и их моделях показало приемлемое для практики совпадение изучаемых на лабораторных моделях процессов с натурными.

Широко развернувшееся строительство гидроузлов на равнинных реках предопределило одно из основных направлений инженерной гидравлики



Рис. 1. Общий вид деформации русла нижнего бьефа на пространственной модели Усть-Среднеканской ГЭС (масштаб 1:120)

для условий мягких оснований — проблему сопряжения бьефов, гашения избыточной кинетической энергии и предотвращения опасных местных размывов дна и берегов. В этом направлении проводились работы по сопряжению бьефов с помощью донного гидравлического прыжка и поверхностных режимов. Для случаев плоской и пространственной задач определялись границы смены различных типов поверхностных и поверхностно-донных режимов течения. Исследовались различные устройства для гашения избыточной кинетической энергии в нижнем бьефе и мероприятия по креплению русла на послепрыжковом участке, по маневрированию затворами многопролетных водосбросов (А. А. Сабанеев, А. Н. Рахманов, Д. И. Кумин, Ф. Г. Гулько, Л. В. Мошков, М. Ф. Складнев, В. Е. Ляпин, Т. П. Проворова и др.). Были разработаны схемы и конструкции для интенсификации гашения энергии за счет соударения струй (М. Э. Факторович).

Выполнялись исследования местных размывов рек за гидроузлами среднего и низкого напора, при этом учитывались неоднородность состава несвязных грунтов и возможность образования отмостки (И. И. Леви, В. С. Кнороз, А. А. Кручинина, К. С. Попова).

Исследования кавитации, аэрации и местных разрушений скалы в нижнем бьефе в значительной степени были обусловлены начавшимся в 1960-х гг. строительством высоконапорных гидроузлов. Исследования кавитации проводились на специально созданных стендах, обеспечивающих скорости течения, близкие к натурным, или моделирование атмосферного давления. Были получены данные о возможности развития кавитации на гасителях различного типа, на поворотах водоводов, за неровностями обтекаемых поверхностей; установлены характеристики вакуумных водосливов, а также ха-

рактеристики кавитационной стойкости бетонов и других материалов (Н. И. Жаров, Б. Г. Картелев).

Исследования аэрации потока во ВНИИГ были начаты П. А. Войновичем и А. И. Шварцем. Позднее были проведены исследования самоаэрации открытых потоков на моделях и в натуре (Н. Б. Исаченко), исследования способов управления бурными потоками (Т. С. Артюхина, В. Ф. Циликин). Были рассмотрены различные случаи подвода воздуха в трубчатые и туннельные водосбросы, подвод воздуха в пристенные слои потока для устранения кавитационной эрозии. Различные аспекты этих проблем как в общей постановке, так и для конкретных объектов решались Н. А. Елисеевым, А. Г. Соловьевой, Г. Л. Рубинштейном, А. М. Швайнштейном и др.

При изучении разрушений скалы в нижнем бьефе струей, отбрасываемой носком-трамплином, учитывались структура скального основания, размеры и форма отдельностей скалы, сцепления между ними. Разные аспекты этой проблемы рассматривались А. Г. Соловьевой, Г. Л. Рубинштейном, Г. А. Юдицким. Механизм силового воздействия потока на скальную отдельность анализировался Г. А. Юдицким и Ю. Г. Жарковым. Проведенные в 2008 – 2009 гг. исследования [2] подтвердили блочный механизм размыва скальных пород: разрушение скального массива происходит при скоростях, достаточных для нарушения связей между отдельностями и существенно меньших, чем скорости, при которых могло бы происходить «размывание» скального монолита.

Экспериментальные исследования пульсаций давления и нагрузок на различные элементы водосбросов и на плиты крепления проводили Д. И. Кумин, Н. А. Преображенский, Г. А. Юдицкий. Определялись суммарные нагрузки на плиты крепления различных размеров (Г. А. Юдицкий, А. А. Исачев), а также пульсации давления в точках плиты с определением нагрузок на основании статистического осреднения по ее площади (А. М. Швайнштейн, Т. П. Проворова и др.). Теоретическое рассмотрение воздействия потока на блоки крепления было выполнено Л. В. Мошковым, В. В. Бухановым, С. М. Мищенко.

При гидравлическом обосновании трубчатых и туннельных водосбросов рассматривались конструктивные мероприятия, позволявшие предотвратить появление зон опасного понижения давления. Для строительных туннелей установлен диапазон характеристик потока, при которых смена безнапорного и напорного режимов течения сопровождается неблагоприятными явлениями, в том числе в условиях, когда цилиндрические участки туннелей имеют различные поперечные сечения. Установлены статистические характеристики пульсаций давления при смене режимов течения в закрытых водосбросах [3]. Этим вопросам существенное внимание уделялось в работах М. Э. Факторовича,



а)



б)

Рис. 2. Сброс воды через крайние водосбросные пролеты Бурейского гидроузла: а — на пространственной модели масштаба 1:120 (вид с нижнего бьефа); б — в натуре, 2009 г. (вид с гребня плотины)

Г. Л. Рубинштейна, А. Ф. Буркова, А. М. Швайнштейна, В. В. Буханова, Г. К. Дерюгина, Г. А. Судольского. Определялись гидравлические характеристики и оптимальные конструкции затворов и затворных камер различного типа (А. С. Абелев, Д. А. Ивашинцов, Н. В. Шрагин, Л. Л. Дольников), а также их гидроупругое взаимодействие с потоком (Л. В. Мошков).

При изучении гидравлических условий пропуска расходов в период строительства гидроузлов проводились исследования режима течения в стесненном русле, исследования взаимодействия временных сооружений, ложа реки и потока, конструкций временных сооружений, методов перекрытия русла (С. В. Избаш, А. И. Шварц). Для стесненного перемычками русла предложены способы определения скоростей течения, уклонов свободной поверхности, размывов, крупности камня крепления. Показана возможность применения при выполнении соответствующих мероприятий (устройство оголовка, обеспечивающего отрывное обтекание перемычки, системы шпор) продольной грунтовой перемычки при скоростях в стесненном русле до 10 м/с (Г. Л. Рубинштейн, А. А. Кручинина). Обоснованы различные способы перекрытия русел: с фронтальной и торцевой отсыпкой банкета, с помощью двух банкетов (С. В. Избаш, А. Ф. Бурков и А. П. Войнович).

Была обоснована возможность пропуска расходов через нижнюю часть плотины, выполненную в виде гребенки, и через строящиеся здания гидроэлектростанций (Ф. Г. Гунько, А. С. Абелев, А. Г. Соловьева, Г. Л. Рубинштейн и др.). Для ряда гидроузлов, возводимых в условиях северной климатической зоны, на основе исследований обоснован пропуск расходов до 10 000 м³/с через береговые строительные каналы. На их тракте наблюдались околоритические режимы течения, а скорости течения достигали 20 м/с (А. П. Войнович, А. М. Швайнштейн, Г. А. Судольский). Был обоснован пропуск значительных расходов кратковременного паводка через гребень недостроенной грунтовой плотины (В. Е. Ляпин).

В 1990 – 2010 гг. было выполнено гидравлическое обоснование компоновок и конструкций водопропускных сооружений строящихся Бурейского, Усть-Среднеканского, Богучанского, Ирганайского гидроузлов, проектируемых Нижнебурейского и Нижнезейского. Для этих гидроузлов наибольший интерес представляют следующие технические решения.

Для эксплуатационного водосброса Усть-Среднеканского гидроузла при больших удельных расходах и слабых грунтах русла отводящего канала решена сложная задача защиты от подмыва жёсткого крепления за водобойным колодцем и площадкой ОРУ, расположенной на выходе из отводящего канала (Г. К. Дерюгин). Удовлетворительное решение удалось предложить для уточнённого расчётного расхода через гидроузел, равного 14 500 м³/с (рис. 1). Была отработана также конструкция эксплуатационного глубинного водосброса, рассчитанного на расход около 17 000 м³/с и оборудованного плоскими рабочими затворами, перекрывающими выходное сечение 12 × 6 м (А. М. Швайнштейн).

При возведении Бурейского гидроузла были проведены гидравлические исследования всех этапов пропуска строительных расходов (А. М. Швайнштейн): низководных грунтовых затопляемых перемычек, пропуска расходов последовательно через стесненное высоководными перемычками русло, через левобережный канал и через строительные глубинные водосбросы. Для эксплуатационного поверхностного водосброса, рассчитанного на пропуск расчетного расхода 9500 м³/с, на завершающем этапе гидравлических исследований обоснован отказ от выполнения пяти отдельных стен и предложена конструкция трамплинов-виражей в крайних пролетах, позволяющая сосредоточить воздействие сбросного потока в осевой части узкого отводящего канала, исключить подмыв левого берега и отдельной стены между водосбросом и ГЭС (В. А. Прокофьев, Г. К. Дерюгин, Г. А. Судольский). Испытания работы водосливной плотины Бурейского гидроузла, выполненные в 2008 –

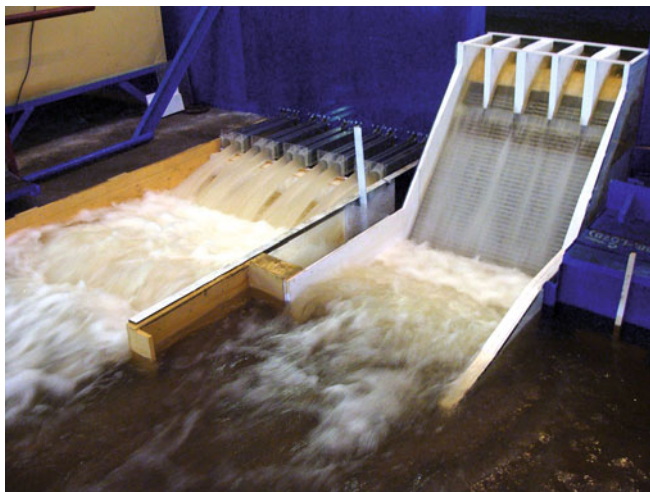


Рис. 3. Общий вид режима течения при работе ступенчатого и трубчатого водосбросов Богучанской ГЭС на пространственной модели масштаба 1:75

2009 гг., показали хорошее совпадение как характеристик отбрасываемых струй, так и параметров размыва отводящего канала водосброса на модели и в натуральных условиях (рис. 2).

Для обоснования проекта Ирганайского гидроузла были исследованы условия пропуска расходов через совмещенный строительно-эксплуатационный водосброс, а также размывов и условий сопряжения бьефов (Ю. Г. Жарков). В результате исследований наклонного участка эксплуатационного водосброса были разработаны требования к обработке неровностей бетона обтекаемой высокоскоростным потоком поверхности с допущением ограниченного объема кавитационной эрозии, что существенно упростило производство строительных работ (А. М. Швайнштейн).

Для Богучанского гидроузла разработана конструкция дополнительного водосброса высотой более 80 м со ступенчатой водосливной гранью в теле бетонной плотины для обеспечения требуемой пропускной способности гидроузла в периоды временной и постоянной эксплуатации при удельных расходах до $45 \text{ м}^2/\text{с}$ [4]. Конструкция ступенчатого водосброса, очертание его водосливного оголовка, параметры уступа-аэратора и ступеней обоснованы экспериментальными гидравлическими исследованиями (Г. А. Судольский). Ступенчатый водосброс обеспечивает существенное гашение энергии сбросного потока в широком диапазоне расходов вплоть до паводков и половодий расчетных обеспеченностей и защиту ступенчатой водосливной грани от кавитационной эрозии. Ряд конструктивных решений позволяет обеспечить надежную эксплуатацию ступенчатого водосброса в суровых климатических условиях. Преимущества ступенчатого водосброса по сравнению с традиционным вариантом гладкой водосливной поверхности, установленные в результате экспериментальных гидравлических исследований (рис. 3), позволили обосно-

вать выбор такой конструкции и осуществить строительство впервые в отечественной практике.

Для обоснования проекта Нижнебурейской ГЭС в результате экспериментальных гидравлических исследований (М. В. Алексеевская) и математического моделирования (А. А. Гиргидов) удалось разработать и обосновать оптимальную конструкцию водобойного колодца водосливной плотины, обеспечивающую режим гашения энергии и сопряжения бьефов, приводящий к снижению размывов за креплением водосброса при пропуске расходов малой повторяемости (рис. 4).

Особое место в исследованиях занимает определение характеристик гидравлического удара в протяженных трубопроводах применительно к системам водоснабжения атомных и тепловых электростанций, магистральным трубопроводам для транспортировки воды и нефтепродуктов. Задачами этих исследований является расстановка специального оборудования для противоаварийной защиты трубопроводов (Н. С. Бакановичус, И. Н. Шаталина, А. Е. Чигаров).

Исследования в области речной гидравлики и гидравлики бьефов и акваторий могут быть подразделены на следующие основные направления:

- установившиеся и неустановившиеся течения воды в естественных и искусственных руслах, сопротивление русел;

- взаимодействие потока с размываемым руслом, транспорт наносов;

- трансформация русла в бьефах гидроузлов вследствие зарегулирования стока и задержки наносов в водохранилище;

- ветровое волнение и его воздействие на сооружения, их основание и берега водотоков и водоемов.

Разработка методов исследований и расчетов речных потоков в 30-е годы была в значительной мере обусловлена развернувшимся проектированием и строительством первых крупных отечественных гидроузлов — Волховского, Свирских, Верхневолжских, Днепровского и других в европейской части страны, среднеазиатских на реках с обильным стоком наносов. В эти годы были разработаны получившие широкое внедрение в практику и использовавшиеся вплоть до 80-х годов методы интегрирования основных уравнений движения воды в открытых руслах и построения кривых свободной поверхности в призматических и непризматических руслах и естественных водотоках (А. Н. Рахманов). Большое внимание уделялось изучению сопротивления русел и методам его оценки при исследовании режимов течений. В предвоенные годы во ВНИИГ были начаты фундаментальные исследования по изучению плановой задачи гидравлики установившегося потока. Разработанный Н. М. Бернадским метод построения плана течений получил развитие в работах Н. Т. Мелешенко, применившего для решения задач двухмерных течений газогид-

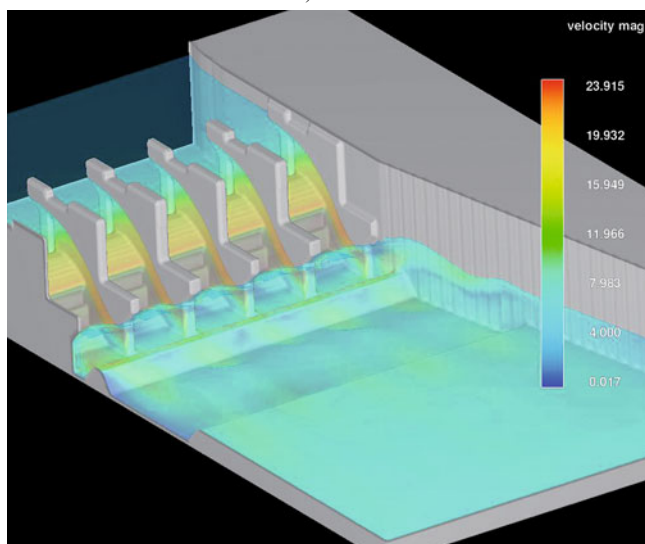
равлическую аналогию и связанный с ней метод характеристик. Н. Т. Мелешенко дал первое систематическое изложение основ теории двухмерных потоков, в том числе бурных. Уже в послевоенные годы теорию плановых течений развивали И. И. Леви и С. Н. Нумеров, уделившие большое внимание учету сил сопротивления. В 1960–1980 годы был выполнен большой объем экспериментальных исследований растекания в плане спокойных потоков (А. Н. Рахманов, Г. В. Стефанович).

Исследования неустановившегося движения воды в бьефах гидроузлов выполнялись в связи с необходимостью прогнозирования условий прохождения паводков при зарегулировании стока и распространения в нижнем бьефе волн, возникающих при суточном регулировании мощности ГЭС. В начале 1930-х годов А. Н. Рахманов разработал графо-аналитический метод расчета неустановившегося движения, в котором основное внимание уделялось учету сил трения. Н. Т. Мелешенко предложил метод волн малой амплитуды, существенно упростивший трудоемкие расчеты задачи суточного регулирования. В конце 30-х гг. Н. Т. Мелешенко и М. С. Якубов детально разработали универсальный алгоритм расчета неустановившегося течения, усовершенствовав предложенный С. А. Христиановичем метод характеристик, в том числе и для условий прерывной волны. С появлением в 60-х годах ЭВМ во ВНИИГ велись работы по их использованию для расчетов неустановившегося движения (Р. Е. Гельфанд, Е. К. Трифонов, В. И. Малышев, А. В. Гаген). К 70-м годам относятся первые разработки В. Л. Мануилова, развившего метод превышений как универсальный метод расчета одномерных медленно изменяющихся неустановившихся потоков с использованием современной вычислительной техники.

В конце 1990-х гг. В. И. Климович и В. А. Прокофьев разработали эффективные численные алгоритмы решения плановой задачи гидравлики открытых потоков, позволяющие рассчитывать как спокойные, так и бурные режимы течений с возможностью образования косых волн и гидравлических прыжков. Разработанные программные комплексы используются в настоящее время для расчета волн прорыва, приливно-отливных течений в морских акваториях, течений в реках и водоемах, а также в бьефах гидроузлов и т.п. В этих программных комплексах предусмотрены возможности расчета переноса загрязняющих веществ, расчета транспорта наносов, расчета термического режима с учетом возможности образования льда на поверхности водотока, расчета характеристик волнения с учетом рефракции и дифракции волн и вдольбереговых течений в прибойной зоне, обусловленных косым подходом волн к берегу. Широкие возможности разработанных оригинальных программных комплексов [5, 6] позволили выполнить такие работы, как исследования заносимости водозаборных



а)



б)

Рис. 4. Режим течения в нижнем бьефе при оптимальной конструкции водобойного колодца Нижнебурейского гидроузла: а — на пространственной модели масштаба 1:120; б — по результатам математического моделирования

сооружений АЭС Бушер (Иран) и водозаборного тракта плавучего энергоблока (г. Вилочинск), расчет гидроледотермического режима работы водоема-охладителя Ростовской АЭС (рис. 5).

Исследования взаимодействия потока с размываемым руслом, транспорта наносов и заиления водохранилищ занимали большое место в деятельности ВНИИГ со времени его основания. Работы, выполненные в этой области М. А. Великановым, Н. М. Бернадским, И. В. Егиазаровым, Г. И. Шамовым, И. И. Леви, В. С. Кнорозом, В. Н. Гончаровым, М. А. Дементьевым, П. А. Войновичем, сыграли основополагающую роль в становлении динамики русловых потоков как научной дисциплины. В середине 1960-х гг., когда накопился опыт эксплуатации ряда крупных гидроузлов и появились данные об изменении уровней воды в нижних бьефах, в институте были возобновлены работы по изучению влияния на русловой процесс зарегули-

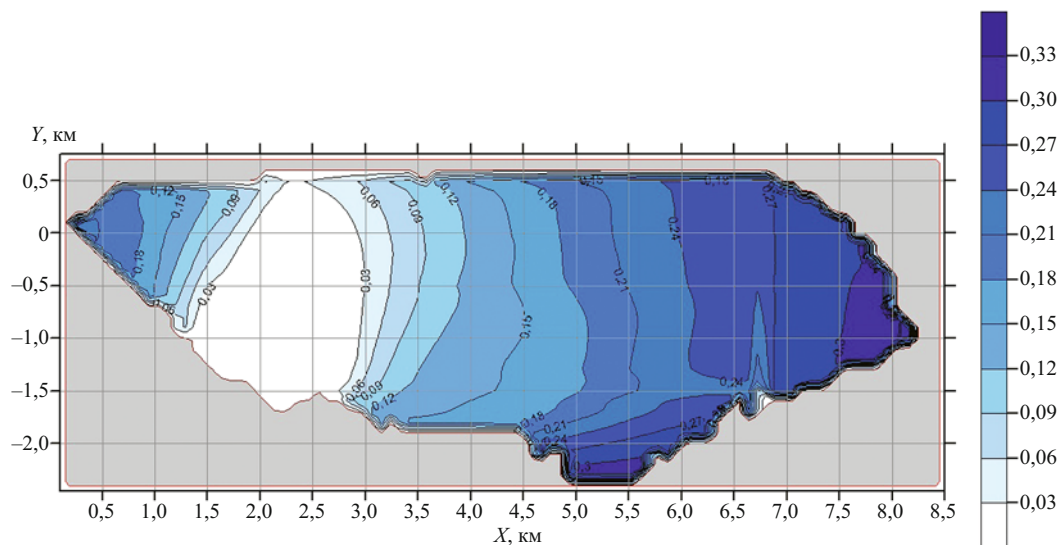


Рис. 5. Расчетное распределение толщины льда в водоёме-охладителе Ростовской АЭС на 18 декабря 2002 г. (согласуется с натурными наблюдениями)



а)



б)

Рис. 6. Исследования плавучих затворов судопропускного сооружения С-1 Комплекса защиты Санкт-Петербурга от наводнений: *а* — на гидравлической модели масштаба 1:60; *б* — натурные испытания.

рования стока и нарушения режима транспорта наносов при гидротехническом строительстве. В этих исследованиях, начатых под руководством М. Э. Факторовича, был накоплен большой объем натурных данных, позволивший систематизировать основные проявления процесса трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов [7] и разработать современные расчетные методы прогнозирования этого процесса (А. Б. Векслер, В. М. Доненберг, В. Л. Мануилов).

В предвоенные годы во ВНИИГ были начаты исследования ветрового волнения, возникающего в крупных водохранилищах и водоемах. Были установлены закономерности изменения основных элементов волны в зависимости от определяющих это явление факторов (В. Г. Андреянов). Большое внимание уделялось разработке мероприятий по защите акваторий морских и речных портов от ветрового волнения и обеспечению нормальных условий входа судов в порт и отстоя их у причалов

(М. П. Кожевников). В 1950-е и последующие годы в связи с созданием крупных водохранилищ, на которых высота волн могла достигать 3 м, актуальным стал вопрос защиты откосов гидросооружений и переработки береговых склонов. Большой объем исследований в этом направлении был проведен в натуре на Кременчугском водохранилище и на специально оборудованных лабораторных установках в Ленинграде и в Днепродзержинске (И. Я. Андрейчук, И. Я. Попов). В 1970-е гг. волновые исследования в институте были усилены в связи с разработкой под руководством Д. Д. Лаппо строительных норм и правил (СНиП) на волновые нагрузки, а также исследованиями, проводившимися для обоснования технических решений, заложенных в основу проекта Комплекса защиты г. Ленинграда — Санкт-Петербурга от наводнений.

Работы по исследованию этого объекта, выполнявшиеся в период проектирования и начальных этапов строительства под научным руководством

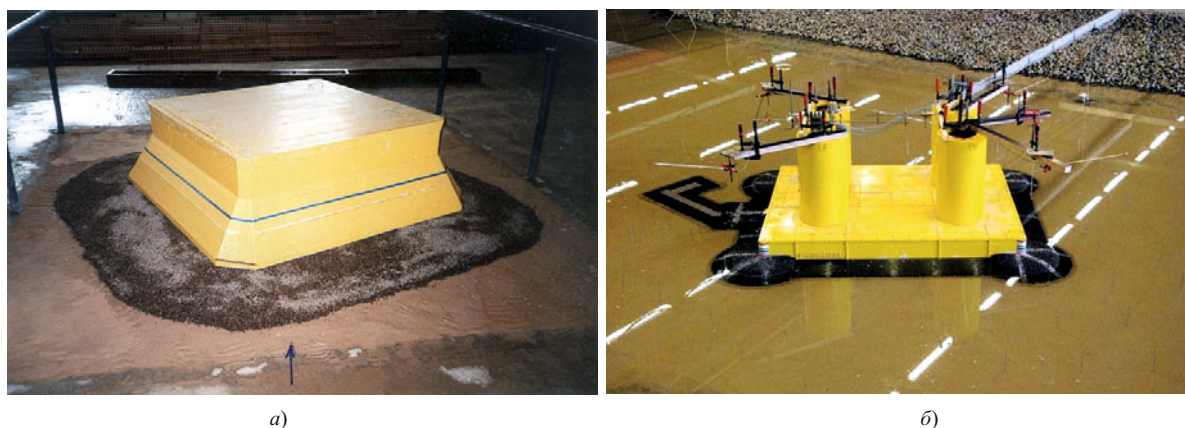


Рис. 7. Модели платформ с защитой от размывов:

a — Приразломная (масштаб 1:75); *б* — Аркутун Даги (масштаб 1:60; эксперименты проводились в Датском гидравлическом институте под руководством ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, а также Alkyon — Нидерланды, Akker Solutions — Норвегия)

Л. В. Мошкова, включали широкий спектр вопросов, относящихся к гидравлике водоемов, водопропускных и судопропускных сооружений, работающих в условиях стокового течения, сгонно-нагонных явлений и волнения. Большое внимание уделялось исследованиям влияния шероховатости дна на характер течений при воспроизведении изучаемых гидравлических ситуаций на искаженных моделях (Я. З. Маневич), изучению характеристик нестационарных течений в огражденной акватории Невской губы (С. М. Левина), воздействия течений и волнений на сооружения Комплекса (И. Я. Попов, С. М. Мищенко, Л. Б. Певзнер), определению пропускной способности водопропускных сооружений при подъеме и спаде уровней воды в Финском заливе и обоснованию крепления дна для защиты их от подмыва (К. С. Попова).

Отдельно следует упомянуть работы по исследованию батопортов (плавучих затворов) судопропускного сооружения С-1, которые в конце 80-х — начале 90-х годов проводились С. М. Мищенко, а в 2006 – 2009 гг. — В. И. Климовичем. В результате исследований С. М. Мищенко была выявлена неустойчивость поведения створов плавучих затворов при их посадке на порог при определенных перепадах уровней воды между Финским заливом и Невской губой. Первоначально разработанная конструкция батопортов обеспечивала устойчивость их поведения при посадке на порог при перепадах уровней воды не более 0,7 – 0,8 м. Последующие исследования и доработка конструкции в 2006 – 2009 гг. позволили обеспечить устойчивость затворов при посадке на порог при перепадах уровней до 1,7 – 1,8 м [8], а при использовании специального прижимного устройства — для перепадов до 2,7 м, что существенно повысило надежность их работы (рис. 6).

В последние 15 лет проводились экспериментальные исследования волновых и гидродинамических воздействий на шельфовые сооружения для добычи углеводородов (С. М. Мищенко, В. И. Климович). В частности, значительный объем работ

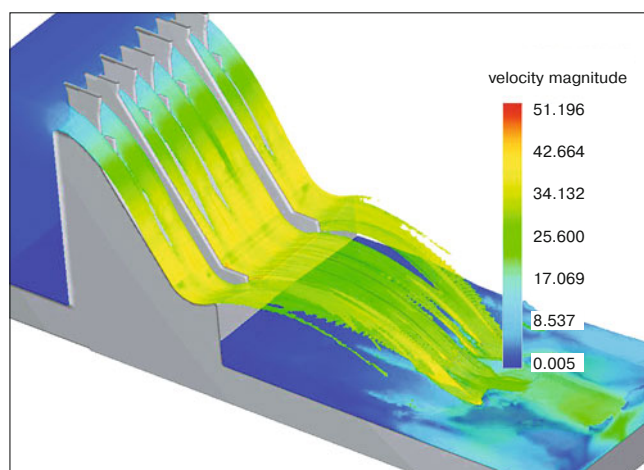


Рис. 8. Результат математического моделирования потока, сбрасываемого через водосбросные сооружения Бурейской ГЭС при пропуске паводка: цветом показана скорость потока

был посвящен экспериментальным исследованиям и отработке конструкций защиты от размывов для ряда нефтегазодобывающих платформ (рис. 7).

В настоящее время при проведении исследований используется программный комплекс FLOW-3D®, являющийся одним из мировых лидеров в области численного моделирования гидродинамических процессов со свободной поверхностью и обладающий полным набором инструментов для одно-, двух- и трехмерного математического моделирования объектов любой сложности. Программный комплекс используется для математического моделирования в сочетании с физическим моделированием течения воды через водосбросные сооружения Богучанского, Бурейского (рис. 8), Нижнебурейского (рис. 4), Нижнезейского гидроузлов; позволяет проводить численное моделирование деформации русел, транспорта наносов, аэрации потока.

Исследования в области ледотермики и проблем зимнего режима при строительстве и экс-



Рис. 9. Наледи, образовавшиеся во время зимней эксплуатации водосброса Саяно-Шушенской ГЭС

плуатации гидротехнических сооружений развивались в основном в следующих направлениях:

- термический и ледовый режимы бьефов гидроэлектростанций;

- заторно-зажорные явления на реках, в том числе в бьефах гидроэлектростанций, мероприятия по борьбе с ними;

- гидравлика потока под ледовым покровом;

- пропуск льда через строящиеся и эксплуатируемые гидротехнические сооружения;

- взаимодействие льда с сооружениями, ледовые нагрузки и взаимодействия на гидротехнические сооружения и береговые откосы;

- разработка методов борьбы с обмерзанием сооружений и конструкций.

Исследования по этой проблематике проводятся во ВНИИГ с начала 30-х годов, когда на гидравлической модели Нижнесвицкого гидроузла изучались условия пропуска льда через его водосливные пролеты.

В середине 30-х годов были выполнены работы по изучению процесса теплообмена с открытой водной поверхностью и сформулированы условия образования льда в водохранилищах (Б. В. Проскуряков), заторов, зажоров и зимних подъемов уровня воды в реках (А. М. Естифеев), термики водоемов (Д. Н. Бибииков).

В годы Великой Отечественной войны ледотермические исследования сотрудников ВНИИГ были посвящены обслуживанию ледовых переправ, и в том числе Дороги жизни через Ладожское озеро, проходимости техникой замерзших болот и снежного покрова. Тогда же Б. В. Проскуряков разработал способ расчета статического давления льда при изменении температуры. В послевоенные годы получили развитие работы по применению холода при строительстве гидротехнических сооружений в северной климатической зоне. Создание напорных

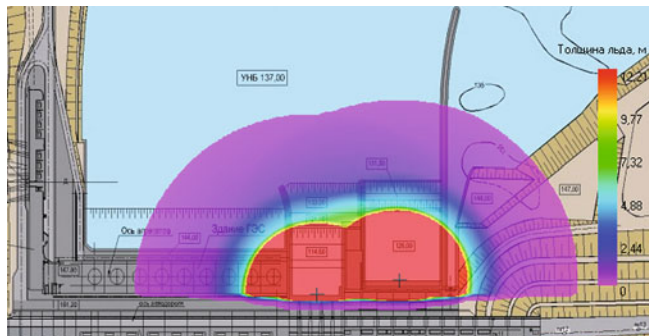


Рис. 10. Диаграмма распределения брызгового обледенения на горизонтальных и наклонных поверхностях сооружений Богучанской ГЭС при работающих в зимний период водосбросах № 1 и № 2

ледогрунтовых перемычек явилось новым перспективным направлением работ института. Уже в 50-е годы были решены основные вопросы замораживания фильтрующих грунтов.

В 60 – 80-е годы развиваются исследования и решаются проблемы, связанные с гидроэнергетическим строительством: регулирование ледового режима и пропуска льда через сооружения (А. М. Естифеев, И. Н. Соколов, В. Ф. Циликин), предотвращение обмерзания элементов сооружения (А. И. Пехович, С. М. Алейников), гидравлика потока под ледяным покровом (В. И. Синотин, З. А. Генкин), термика водоемов и водотоков (А. И. Пехович, В. М. Жидких).

В последние годы значительное развитие получили исследования основных проблем гидроледотермики: ледового и термического режима бьефов ГЭС, бассейнов ГАЭС и ПЭС; определения характера термического сопряжения бьефов и протяженности зоны термического влияния ГЭС. Были выполнены разработки различных способов регулирования термического режима, в том числе с использованием селективного отбора воды из верхних бьефов ГЭС (И. Н. Шаталина, Г. А. Трегуб), и разработаны конструкции для селективного отбора воды из водохранилищ (В. Е. Ляпин).

Решались задачи ледовой гидравлики — пропуск льда через створ сооружения и водопропускные отверстия [9], прогноз максимальных заторных уровней, обеспечение работы водозаборных сооружений (В. Н. Карнович, С. И. Ковалевский).

В связи с аварией на Саяно-Шушенской ГЭС в августе 2009 г. и вынужденным сбросом воды через эксплуатационный водосброс зимой 2009 – 2010 гг. актуальными стали вопросы прогнозирования возможного обмерзания сооружений и конструкций, попадающих в зону водовоздушного облака над работающими зимой водосбросами (рис. 9, 10).

Прочностные задачи были сосредоточены на изучении физико-механических свойств льда, расчетах ледовых нагрузок, совершенствовании их нормирования. Особое значение решение этих задач имеет при обустройстве нефтегазовых месторождений в арктических морях (М. Г. Гладков).

Работы по обоснованию возведения сооружений из льда, льдокомполитов и мерзлых льдонасыщенных грунтов в северной строительной-климатической зоне включали обоснование конструкций водоупорных элементов плотин, ограждающих дамб золоотвалов с использованием мерзлых грунтов, разработку составов льдокомполитных материалов и технологию строительства с их использованием (Е. Л. Разговорова).

К числу актуальных проблем, рассматриваемых и успешно решаемых в последние годы, относятся разработки систем обогрева на базе композиционных резистивных материалов (КРМ) из электропроводного бетона и битума (БЕТЭЛ и БИТЭЛ). С использованием этих материалов осуществлены установки по обогреву конструкций Нарвской (рис. 11) [10] и Бурейской ГЭС, а также Канонерского туннеля в Санкт-Петербурге (И. Н. Шаталина, Н. С. Бакановичус).

Заключение

Гидравлические и ледотермические исследования ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» в течение всей 90-летней истории института являлись одним из основных направлений его деятельности. Научно-техническое значение выполненных работ подтверждается успешным внедрением их результатов в большинство построенных и эксплуатирующихся гидротехнических объектов в Российской Федерации и республиках бывшего СССР. Многие разработки обобщены в научно-методических документах (СНиПы, ТУиНы, рекомендации и т.п.), используемых в проектной практике и научных исследованиях. Их обзор, приведенный в [11] по состоянию на 1996 г., в настоящее время может быть дополнен работами последних 15 лет. Разработки сотрудников ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева и других организаций обобщены в справочном пособии [12]. Большой интерес для гидроэнергетиков, особенно после трагических событий августа 2009 г. на Саяно-Шушенской ГЭС, представляет монография [13].

В настоящее время усилия сотрудников ВНИИГ, выполняющих гидравлические и ледотермические исследования гидротехнических сооружений, направлены на решение задач, связанных с разработкой проектов и строительством Богучанской, Нижнебурейской, Нижнезейской, Зарамагской ГЭС, с ремонтом и эксплуатацией Саяно-Шушенской ГЭС, с реконструкцией Баксанской ГЭС и эксплуатацией Камской, Воткинской, Вилойской ГЭС-1.

Список литературы

1. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева.* 1997. Т. 230.
2. *Исследование размывающего воздействия высокоскоростного потока на монолитные образцы скальных и полускальных грунтов / Берто Ги, Векслер А. Б., Доненберг В. М., Лаломов А. В. // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева.* 2010. Т. 257. С. 10 – 22.



Рис. 11. Нагреватель на основе КРМ, установленный на клапанном затворе ледосброса Нарвской ГЭС-13

3. *Швайнштейн А. М.* Строительные туннели. Гидравлические условия работы. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. *Разработка конструкции водосброса № 2 Богучанского гидроузла / Толошинов А. В., Волынчиков А. Н., Прокофьев В. А., Судольский Г. А. // Гидротехническое строительство.* 2009. № 3. С. 2 – 9.
5. *Klimovich V. I.* Numerical modeling of flows in water basins and channels on the basis of 2D shallow water model // Proc. of XXX IAHN Congress, v. D. Thessaloniki, Greece, 2003.
6. *Прокофьев В. А.* Численная плановая модель открытого потока при наличии на дне препятствий // *Водные ресурсы.* 2005. Т. 32. № 3. С. 282 – 294.
7. *Векслер А. Б., Доненберг В. М.* Переформирование русла в нижних бьефах крупных гидроэлектростанций. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
8. *Klimovich V. I., Chernetsov V. A., Kupreev V. V.* Improvement of Floating Gate Design for C-1 Navigation Pass of St. Petersburg Flood Protection Barrier // Proc. of XXXII IAHN Congress, v. 2, Venice, Italy. 2007.
9. *Бакановичус Н. С., Климович В. И., Шаталина И. Н.* Подныривание льда в отверстия гидротехнических сооружений и под преграды в виде плавающих льдин // *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева.* 2010. Т. 258. С. 42 – 50.
10. *Опыт первого года эксплуатации системы обогрева на основе композиционных резистивных материалов на Нарвской ГЭС № 13 / Федоров Б. И., Медведев О. А., Трегуб Г. А., Шаталина И. Н., Бакановичус Н. С., Кузнецов Н. И., Абрамов Е. А., Парфентьев И. А., Бакановичус С. А. // Гидротехническое строительство.* 2005. № 4. С. 6 – 10.
11. *Нормативно-методические документы в области гидравлики сооружений и оборудования гидравлических и тепловых электростанций / Векслер А. Б., Макаров И. И., Печенкин М. В., Шаталина И. Н., Швайнштейн А. М., Шрагин Н. В. // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева.* 1997. Т. 230. Ч. II. С. 321 – 343.
12. *Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие.* — М.: Энергоатомиздат, 1988.
13. *Ефименко А. И., Рубинштейн Г. Л.* Водосбросные сооружения Саяно-Шушенской ГЭС. — СПб.: ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2008.

Исследования по обеспечению надёжности оборудования гидротехнических сооружений ГЭС и АЭС

Левина С. М., кандидат техн. наук, Штильман В. Б., доктор техн. наук
(ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»)

В статье изложены основные направления исследований в обеспечении надёжности оборудования гидротехнических сооружений ГЭС и АЭС, выполненных в ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» за последние годы.

Ключевые слова: водопроводящий тракт, затвор, инструментальное обследование, камера рабочего колеса, механическое оборудование, модель, надёжность, облицовка, остаточный ресурс, поворотно-лопастная гидротурбина, фильтр, эксперимент

Во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева традиционно, начиная с 1951 г., проводились исследования в области гидротурбинных блоков, механического и гидросилового оборудования. Здесь трудились такие учёные, как А. С. Абелев, Е. В. Гутовский, Н. Ю. Дмитриев, Л. Л. Дольников, Н. И. Зубарев, Д. А. Ивашинов, Б. Г. Картелев, В. И. Климович, И. В. Плохотников, А. Ф. Похилько, А. А. Сабанев, В. А. Солнышков, А. Г. Соловьёва, А. М. Чистяков, Н. В. Шрагин и другие. Эти исследования охватывали большой круг вопросов:

гидродинамические исследования гидротурбинных блоков с целью совершенствования компоновки;

гидродинамические исследования энергетических и кавитационных характеристик проточной части гидромашин с целью повышения их технико-экономических показателей;

исследования переходных процессов в гидромашинах и определение мероприятий для повышения надёжности их работы;

исследования кавитационной эрозии различных материалов, используемых в гидроэнергетике, с целью разработки мероприятий по борьбе с негативными последствиями кавитации;

гидродинамические и кавитационные исследования затворов и другого механического оборудования с целью снижения потерь напора, устранения причин вибрации;

исследования пульсаций гидродинамических нагрузок, действующих на элементы проточной части гидротурбинных блоков и затворов, с целью получения необходимых данных для динамических расчётов.

В течение последних 10 – 15 лет основное внимание уделялось исследованиям, направленным на увеличение надёжности водопроводящего тракта (ВПТ) ГЭС и его элементов, включая механическое оборудование, а также затворов и фильтрующих устройств АЭС.

Начало разработке методики расчёта надёжности ВПТ положил еще в конце 1960-х гг. кандидат техн. наук. В. А. Солнышков. Однако активное развитие эти исследования получили лишь двадцать

лет спустя. Работа велась как в методическом плане, так и в практическом направлении, заключающемся в расчетах надёжности механического оборудования и в разработке рекомендаций по увеличению надёжности отдельных элементов. К сегодняшнему дню результаты таких исследований использованы на Бурейской, Вилюйской, Иркутской, Новосибирской, Саяно-Шушенской ГЭС, Белоярской АЭС, АЭС Бушер, Куданкулам и на многих других электростанциях, а также на Комплексе защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений.

Разработке методов диагностики и оценке надёжности подсистем ВПТ уделялось и продолжает уделяться большое внимание. При этом была поставлена задача, используя вероятностные методы, разработать методику не только оценки проектной и эксплуатационной надёжности объекта (и адекватные им современные методы диагностики) на данный момент времени, но и прогнозирования её уровня через тот или иной временной интервал, что может позволить заблаговременно назначать сроки его ремонта или замены. Первым этапом диагностики является обследование визуальными и неразрушающими инструментальными методами бетонных и металлических элементов ВПТ (рис. 1, 2). Следует заметить, что специалисты ВНИИГ принимают активное участие в таких обследованиях.

В процессе эксплуатации элементы ВПТ гидротехнических сооружений подвергаются целому ряду воздействий (динамических из-за пульсации нагрузки со стороны турбулентного потока, сейсмических, ледовых, агрессивных и мягких вод и т.п.), приводящих к появлению локальных дефектов, которые (до определённого момента) практически не сказываются на эксплуатации оборудования и сооружения. Причинами возникновения дефектов закладных частей оборудования могут быть и скрытые дефекты бетона, с которым они должны быть омоноличены. Поэтому, например, при обследовании закладных частей ВПТ контролю подлежат также и соответствующие участки массива бе-



Рис. 1. Обследование бетонных конструкций на Саяно-Шушенской ГЭС



Рис. 2. Обследование металлических конструкций на Саяно-Шушенской ГЭС

тона. Разработана методика количественной оценки надёжности ВПТ [1].

Одним из элементов ВПТ, для которого проведён весь комплекс исследований, является камера рабочего колеса (КРК) поворотно-лопастных гидротурбин. Были поставлены общие задачи диагностики камер рабочих колёс, выбраны конкретные методы диагностики, сформулированы диагнозы, характеризующие возможные состояния камеры, и соответствующий им набор диагностических признаков, а также выработаны рекомендации по организации технической диагностики камеры рабочего колеса. Проведены экспериментальные исследования по отбору определяющих признаков и связей их с диагнозами состояния камеры рабочего колеса (рис. 3).

Было собрано, проанализировано и систематизировано большое количество данных по отказам и повреждениям КРК, на основе которых выявлены причинно-следственные связи между повреждениями КРК и условиями их эксплуатации.

Итогом серьезных многолетних исследований стали два документа по расчету, ремонту и реконструкции камер рабочих колёс поворотно-лопастных гидротурбин. Первый из них — “Пособие по расчету динамического напряженного состояния металлических облицовок камер рабочих колёс поворотно-лопастных гидротурбин с оценкой их усталостной прочности” [2]. В пособии содержатся основные материалы, необходимые для определения изменяющихся во времени гидродинамических нагрузок, динамического напряженного состояния и для прогноза усталостной прочности облицовок камер рабочего колеса пропеллерных и поворотно-лопастных гидротурбин при различных схемах их работы. Применение разработанных методик позволяет обосновывать выбор плановых размеров и толщин облицовок КРК с помощью современных

подходов к расчету нагрузок и их динамического напряженного состояния при обеспечении заданного уровня их надежности.

В приложениях к пособию приведены краткая инструкция для работы с пакетом программ по расчету гидродинамических нагрузок, динамического напряженного состояния облицовок КРК и прогноза их усталостной прочности, а также пример расчета этих величин для конкретных ГЭС.

Отдельные разделы представленной методики могут быть трансформированы для соответствующих расчетов облицовок водосбросных сооружений и других элементов различных конструкций, испытывающих динамические нагрузки.

Второй документ — “Рекомендации по ремонту и реконструкции камер рабочих колёс гидроагрегатов с целью повышения их эксплуатационной надежности” [3], разработанные на основе анализа опыта эксплуатации и проведения ремонтно-восстановительных работ камер рабочих колёс гидроагрегатов и предназначенные для использования при проведении ремонта и реконструкции КРК, а также при разработке проектов восстановительных работ. В Рекомендациях изложены основные требования к проведению ремонтно-восстановительных работ на камерах рабочих колёс поворотно-лопастных и диагональных гидроагрегатов. Требования сформулированы с учетом условий эксплуатации, действующих на КРК гидродинамических нагрузок и расчетов ее динамического напряженного состояния и усталостной прочности. Приведены конструктивные решения, направленные на повышение долговечности и ремонтпригодности КРК, технология подготовки поверхностей металла и бетона заоблицовочных полостей КРК к ремонтно-восстановительным работам.

Рекомендации содержат также методику оценки состояния и выбора оптимального варианта про-



Рис. 3. Обследование КРК на Иркутской ГЭС

ектно-восстановительных работ КРК, а в приложениях приведены материалы по проведению гидравлических испытаний КРК, инструментальному обследованию микро- и макросостояния металла бетона, применяемые схемы ультразвуковой локации бетона КРК, сведения о материалах для создания многослойных конструкций КРК и технологические инструкции по проведению ремонтно-восстановительных работ.

Следует отметить также совместную работу с ОАО «НПО ЦКТИ» и ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» по разработке методических указаний по контролю состояния металла лопастей рабочих колёс и камер рабочих колёс гидротурбин [4]. В эти методические указания были включены апробированные, подтвержденные опытом эксплуатации технические нормы, методики и рекомендации по оценке технического состояния металла рабочих колёс и камер рабочих колёс гидротурбин. В этом документе также уточнены порядок и правила работы при осуществлении контроля состояния металла рабочих колёс и камер рабочих колёс гидротурбин.

Была разработана программная оболочка базы данных «Повреждения металла КРК и РК гидротурбин», предназначенной для сбора и статистической обработки повреждений металла камер рабочих колёс и рабочих колёс (РК) гидротурбин, а также осуществлено ее первичное наполнение. Создание базы данных для оценки остаточного ресурса основных несущих узлов гидроагрегата представляет собой важный этап для дальнейшего усовершенствования расчетных методов решения задачи и накопления исходных материалов для последующего объективного нормирования таких параметров, как вибрация, ресурс, запасы по вибрациям, напряжениям, циклам, длинам трещин и вероятностям безотказной работы.

На основе вышеупомянутых методических указаний и в их развитие в 2010 г. совместно с ОАО

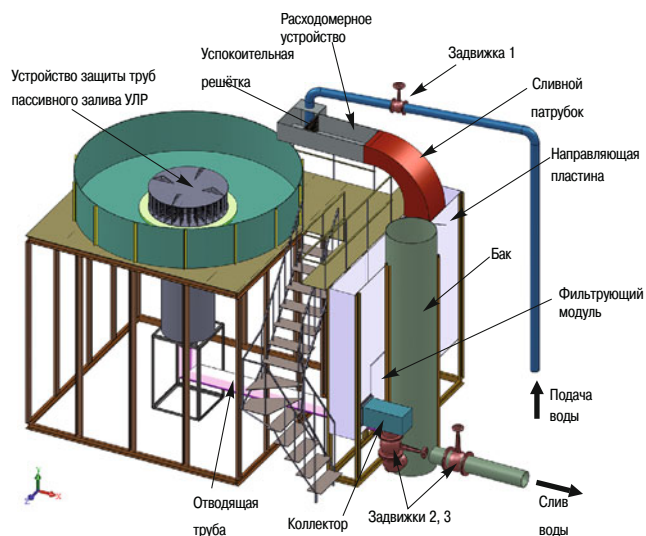


Рис. 4. Экспериментальный стенд для исследования фильтрующих устройств ЛАЭС-2

«НПО ЦКТИ» была выполнена большая научно-исследовательская работа по разработке методики оценки состояния и остаточного ресурса ресурсопределяющих элементов гидротурбин с применением методов неразрушающего контроля и механики разрушения. Были обобщены как новые, так и разработанные ранее методики по оценке состояния и остаточного ресурса элементов гидротурбин.

Все теоретические и методические разработки нашли применение при решении конкретных задач. Так, за последние годы были проведены обследования состояния бетона и закладных частей КРК гидроагрегатов № 7 Новосибирской ГЭС, № 1, 7 и 8 Иркутской ГЭС с определением остаточного ресурса КРК и разработкой рекомендаций по обеспечению их работоспособности [5].

Одной из новых задач, решенной в ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», является оценка остаточного ресурса ворот шлюзов, подвергающихся значительной циклической нагрузке. Эти решения опирались на расчётные исследования надёжности ворот как до реконструкции, так и после выполнения мероприятий по уменьшению напряжений в элементах ворот или их замены. Решения таких задач для рабочих ворот судоходных шлюзов гидроузлов «Джердап-1» и Новосибирского подтвердили правильность конструктивных решений проектировщиков.

Еще одним из направлений, развивающихся в ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», является визуальное и инструментальное обследование металлоконструкций, в первую очередь механического оборудования ГТС. За последние годы подобные освидетельствования с применением методов неразрушающего контроля были проведены и проводятся на таких объектах, как Богучанская, Саяно-Шушенская ГЭС, каскады Кемских и Туломских ГЭС,

Нижнетуринская ГРЭС. Результатом обследований и их анализа являются выводы о возможности дальнейшей эксплуатации исследованных систем и рекомендации по дальнейшей эксплуатации и ремонту обследованного оборудования.

Интересными и важными являются работы, связанные с обоснованием конструкций фильтрующих устройств для Тяньваньской АЭС [6] и Ленинградской АЭС-2. Так, общей целью последней работы являлось обоснование надёжности и эффективности работы в аварийных условиях фильтрующих модулей бака прямка защитной оболочки и фильтрующих элементов защиты труб пассивного залива проекта ЛАЭС-2.

При анализе возможных аварий на АЭС особого внимания заслуживает внезапная разгерметизация контура охлаждения реактора, вызванная, например, разрывом трубопровода первого контура. Так как система содержит теплоноситель с высокой температурой ($\approx 300\text{ }^\circ\text{C}$) и при высоком давлении ($\approx 160\text{ кг/см}^2$), то внезапное снижение давления приводит к вскипанию воды и образованию пара. В течение короткого интервала времени, исчисляемого 20 – 30 секундами, основная часть теплоносителя в объёме $\sim 300\text{ м}^3$ вытекает через разрыв. В этот период повышаются давление и температура под оболочкой реакторного отделения, резко ухудшается теплоотдача в активной зоне реактора, повышается температура твэлов и может произойти их разгерметизация. Для предотвращения негативных последствий подобных аварий необходимы конденсация пара и отвод тепла от различных систем станции и из-под защитной оболочки.

Существенную роль в этом играют фильтрующие устройства защиты труб пассивного залива и фильтрующие модули прямков, так как большая часть разрушенной теплоизоляции вместе с теплоносителем поступит к ним, а вода, забираемая через них, служит для отвода остаточного тепла при послеаварийном охлаждении активной зоны реактора. Поэтому надёжной работе устройств защиты труб пассивного залива придается большое значение. Требуется обеспечить предельные потери напора на фильтрующих устройствах и минимально необходимые расходы воды.

Исходя из вышеизложенного, были решены основные задачи исследования: изучено влияние засорения фильтрующего устройства защиты труб пассивного залива и фильтрующего модуля прямка на их гидравлические характеристики, а также разработаны рекомендации по изменению конструкции этих систем, направленные на обеспечение их безотказной работы. Для этого были разработаны программы и методики экспериментальных исследований, а также создан уникальный стенд (с



Рис. 5. Исследование фильтрующего устройства защиты труб пассивного залива

плановыми размерами $5,5 \times 9,0$ м и высотой около 6 м) (рис. 4) для гидравлических испытаний обоих устройств, изготовленных в натуральную величину, обеспечивающий:

легкий монтаж обоих фильтрующих устройств на экспериментальной установке с обеспечением механического подобия изучаемого явления;

приближенные к реальным гидравлические условия работы фильтров при моделировании всех возможных режимов их работы в аварийных условиях;

использование фрагментов натуральной теплоизоляции, размеры и структура которых соответствуют расчётным уровням её разрушения;

возможность монтажа и испытаний фильтрующих устройств видоизменённой конструкции.

Были проведены экспериментальные исследования фильтрующих устройств как на чистой воде, так и с моделированием их засорения фрагментами разрушенной теплоизоляции с измерением потерь напора на этих устройствах и расходов теплоносителя через них при различных степенях засорения (рис. 5). Анализ результатов экспериментов позволил сделать вывод о неработоспособности фильтрующих устройств при заданных исходных данных и конструкциях фильтров, а также дать рекомендации по изменению их конструкций для обеспечения необходимых гидравлических характеристик.

Еще одной интересной и важной работой, выполненной в последние годы, являются гидравлические исследования для обоснования проекта замены единственного сегментного затвора водосброса Виллойских ГЭС-1 и 2 двумя плоскими. Водосброс оборудован сегментным затвором шириной 40 м с расчётным напором 15,2 м. Затвор эксплуатируется уже более 40 лет в суровых климатических условиях. При этом в период эксплуатации были увеличены, по сравнению с проектными, нагрузки на сегментный затвор (при повышении

НПУ с отм. 244,0 м до отм. 246,0 м). Таким образом, надежность гидроузла Вилюйских ГЭС-1 и 2 и безопасность целого региона зависят от состояния единственного уникального однопролетного отверстия с сегментным затвором. Поэтому исследование комплекса различных аспектов работы водосброса с двумя плоскими затворами вместо одного сегментного при различных условиях их эксплуатации и разработка на основе полученных результатов рекомендаций по конструктивному исполнению оголовка водосброса и его эксплуатации являлось весьма важной научной проблемой. Конечным результатом проведенных модельных гидравлических исследований стали рекомендации по оптимальному варианту реконструкции водосброса, которые будут учтены при реализации проекта.

Среди научных работ ВНИИГ в области механического оборудования следует отметить выход в свет монографии, подытожившей исследования в области надежности затворов ГТС [7]. В книге изложены основные положения системного анализа надежности затворов гидротехнических сооружений на основе синтеза параметрической и структурной теорий надежности. Приведены классификации затворов и их отказов, основные положения традиционной (детерминистической) методики расчета затворов на прочность, методы учета влияния гидродинамических и сейсмических воздействий на надежность затворов, подходы к вопросам оценки надежности гидросистем подъемных механизмов затворов, примеры оценки надежности различных типов затворов ГЭС, ГРЭС, АЭС, а также Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений.

Таковы основные направления исследований ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» в областях, свя-

занных с проектированием и эксплуатацией оборудования электростанций. В дальнейшем наиболее перспективными представляются работы по совершенствованию методик технической диагностики и оценки остаточного ресурса оборудования ГТС.

Список литературы

1. Дзюбанов Е. М., Дмитриев Н. Ю., Левина С. М., Штильман В. Б. Системный анализ надежности водопроводящих трактов ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1997. Т. 233 С. 47 – 54.
2. Пособие по расчету динамического напряженного состояния металлических облицовок камер рабочих колес поворотно-лопастных гидротурбин с оценкой их усталостной прочности. П77 – 2000 / ВНИИГ. — СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2000.
3. Рекомендации по ремонту и реконструкции камер рабочих колес гидроагрегатов с целью повышения их эксплуатационной надежности. РД 153-34.2-31.604-2002. — СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2004.
4. Левина С. М., Смелков Л. Л., Доможиров Л. И. Контроль состояния металла лопастей и камер рабочих колёс // Сборник докладов Третьей научно-технической конференции «Гидроэнергетика, новые разработки и технологии». — СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2008. С. 64 – 81.
5. Левина С. М., Смелков Л. Л., Гаврилов С. Н., Колесников Е. В., Афанасенко А. С. Оценка остаточного ресурса и вероятности безотказной работы гидроагрегата № 1 Иркутской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2009. № 9. С. 21 – 26.
6. Альтицуллер А. М., Антропов Г. А., Беллендир Л. Э., Погребняк Б. Н., Штильман В. Б. Гидравлические лабораторные исследования приемка защитной оболочки АЭС // Гидротехническое строительство. 2005. № 5. С. 36 – 40.
7. Василевский А. Г., Штильман В. Б., Шульман С. Г. Методы оценки надежности затворов гидротехнических сооружений (системный анализ). — СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2010.

Работы ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева в области оснований гидротехнических сооружений

Гольдин А. Л., доктор техн. наук (ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”)

Излагается ретроспективный взгляд на развитие в ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” исследований в области оснований гидротехнических сооружений. Отмечены основные научные направления исследований и роль отечественных ученых — сотрудников ВНИИГ в их развитии. Даны сведения о современных работах, в которых приоритеты отданы математическому моделированию и использованию современных компьютерных программ, а также натурным наблюдениям за сооружениями, служащим основой для оценки их надежной работы.

Ключевые слова: основания, устойчивость, несущая способность, физическое моделирование, математическое моделирование, сейсмические воздействия.

Исследования грунтовых оснований во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева всегда являлись основными из направлений его научной деятельности. Это связано с насущными задачами отечественного гидротехнического строительства и энергетики. Проектирование и строительство надежных сооружений требуют ответа на вопрос: будет ли прочным и устойчивым сооружение на имеющемся основании как в период строительства, так и в период эксплуатации? Для ответа на этот вопрос с помощью расчетных и экспериментальных методов рассматривают поведение системы “сооружение — основание” с учетом многообразия возможных нагрузок и свойств материала основания. Методология решения этих вопросов установлена действующими нормативными документами. В первую очередь это два СНиПа “Гидротехнические сооружения. Основные положения” 33-01-2003 и “Основание гидротехнических сооружений” 02.02.02-84*, который в настоящее время проходит этап актуализации и гармонизации с аналогичными зарубежными нормативными документами. Основные положения этих нормативных документов явились плодом изучения вопросов поведения системы “сооружение — основание” в течение длительного времени, начиная с 30-х годов прошлого века. Значительную роль в решении многочисленных вопросов и задач этой отрасли науки сыграли сотрудники ВНИИГа.

Со времен К. Терцаги, являющегося основоположником механики грунтов, сформировался ряд направлений, которые составляют основные научные дисциплины, в той или иной степени используемые при оценке поведения системы “сооружение — основание”. Это изучение физических и механических свойств грунтов для их учета в расчетных математических моделях, в частности для обоснования этих математических моделей и выбора для них соответствующих расчетных параметров; разработка методологии учета фильтрации грунтовых вод в основаниях; методы расчета устойчивости сооружений — несущей способности оснований; методы расчета осадок сооружений и напряженно-деформированного состояния оснований с учетом как статических, так и динамических нагрузок; методы расчета поведения оснований при

учете процессов консолидации слагающих их водонасыщенных глинистых грунтов и температурных режимов оснований для сооружений, возводимых в суровых климатических условиях.

Работы ученых ВНИИГа в первые годы существования института были связаны с необходимостью обоснования строительства Волховской и Свирских ГЭС, а позднее — с сооружением Беломоро-Балтийского канала. Практика потребовала развития методов расчета напряженно-деформированного состояния оснований сооружений, расчетов длительного деформирования глинистых водонасыщенных грунтов, анализа устойчивости сооружений, несущих горизонтальные нагрузки. В связи с этим получили развитие решения задач взаимодействия сооружений — жестких и конечной жесткости — с основаниями с использованием аппарата линейной теории упругости. В этом плане значительный вклад в механику грунтов внес В. А. Флорин, который в 30-е годы предложил ряд оригинальных решений задачи о взаимодействии жесткого штампа с упругим основанием при действии пары сил при учете касательных напряжений и др. Большой вклад В. А. Флорин внес в теорию расчета балок на упругом основании. Однако уже тогда, несмотря на широкое использование модели линейной теории упругости при расчетах грунтовых оснований, было ясно, что грунт не является упругой средой и не ведет себя как линейно-деформируемое тело, что в общем случае связь между напряжениями и деформациями в грунте носит нелинейный характер; кроме того, значительную роль играют необратимые, пластические деформации грунта. Впервые в практике механики грунтов к рассмотрению нелинейных связей обратился А. И. Боткин, который в отечественную механику грунтов ввел понятие механики сплошной среды, рассматривая инварианты тензоров напряжений и деформаций, и предложил использовать нелинейные зависимости между ними. А. И. Боткин внес значительный вклад в формулировку закона прочности грунтов. До него прочность грунтов описывалась известными законами Кулона и Мора. В этих законах при определении предельного касательного напряжения не учитывается влияние промежуточного главного

напряжения. А. И. Боткин обобщил закон Кулона, предложив рассматривать предельное состояние на октаэдрической площадке, и учел таким образом вклад трех главных напряжений в разрушение грунта. Теория прочности А. И. Боткина стала в один ряд с фундаментальными законами механики сплошного тела. Плодотворная идея этого ученого о необходимости рассмотрения поведения грунта с учетом действия всех составляющих тензора напряжений привела к созданию принципиально нового типа прибора для лабораторного исследования грунтов — прибора трехосного сжатия (Н. Н. Давиденков, Г. Б. Яппу), ставшего основным для изучения прочностных и деформационных свойств грунтов, выпускаемого в различных модификациях ведущими мировыми фирмами, специализирующимися на производстве геомеханического оборудования. В настоящее время ВНИИГ располагает комплексом современного лабораторного оборудования для изучения прочностных и деформационных свойств грунтов при статических и динамических нагрузках, на котором проводятся исследования для ряда объектов энергетики и сооружений на шельфе (В. В. Сокуров, Т. Ю. Векшина, Ю. Г. Смирнов и др.) (рис. 1 и 2).

Продолжателем идей А. И. Боткина во ВНИИГ был Б. Н. Баршевский, который для расчета осадок гидротехнических сооружений использовал нелинейные связи между напряжениями и деформациями грунта, а для практических расчетов предложил учитывать переменность модуля деформации по глубине активной зоны уплотнения в основании сооружений.

Вопрос о глубине активной зоны уплотнения, которая регламентирована, в частности, СНиП 2.02.02-84* и СНиП 2.02.01-83, до настоящего времени является предметом изучения.

Еще в довоенные годы, исходя из соображений существования зон пластического деформирования под краями жестких штампов, Н. П. Пузыревский предложил выделять под фундаментом области предельного напряженного состояния как область равных углов предельного отклонения равнодействующей на площадке сдвига ($\sin \theta_{\max} = \sin \varphi$). Впоследствии Н. П. Пузыревским была выведена формула, в которой нагрузка на основание связывалась с глубиной пластических зон под краями загруженного участка. Эта формула, получившая название формулы Пузыревского — Герсеванова, была положена в основу определения так называемой критической краевой нагрузки на основание ($q_{кр}$), при которой под краями фундамента отсутствуют зоны пластического деформирования.

В. А. Флорин предложил способ определения зон предельного состояния и приближенный способ исправления эпюр теории упругости. Несмотря на это, при определении контактных напряжений под подошвой жестких сооружений основной рас-

четной моделью продолжала быть модель линейно-деформируемого тела.

Кроме теоретических исследований существенным элементом в развитии изучения работы оснований послужили экспериментальные исследования, которым во ВНИИГ всегда уделялось большое внимание. Значительным вкладом в изучение распределения контактных напряжений в основании жестких штампов были опыты Т. Ф. Липовецкой (60-е годы). С помощью “разрезного” штампа размером 1×3 м, разрезанного на 12 отдельных секций, которые могли свободно перемещаться в вертикальном направлении относительно друг друга, и специального рычажного устройства, которое могло задавать любое нагружение секций, было установлено, что в процессе нагружения, когда все секции перемещаются одинаково и таким образом может быть имитирована осадка жесткого штампа, происходит трансформация контактной эпюры. При очень малых нагрузках имеет место “седлообразная” эпюра с максимальными контактными напряжениями под краями фундамента (штампа), что в значительной мере соответствует решению теории упругости, а при возрастании нагрузок происходит увеличение контактных напряжений под центром штампа (так называемые параболические эпюры). Аналогичный результат впоследствии был получен в экспериментальных исследованиях с помощью датчиков на контакте. Экспериментальное изучение распределения контактных касательных напряжений под жестким штампом было проведено Р. А. Ширяевым. Исследования Т. Ф. Липовецкой и Р. А. Ширяева послужили базой для теоретического изучения распределения контактных напряжений с использованием нелинейных и упруго-пластических моделей грунта.

Одновременно с развитием методов решения задач по определению напряженно-деформированного состояния оснований и грунтовых сооружений во ВНИИГ интенсивно развивались методы оценки несущей способности оснований (устойчивости фундаментов). Работы сотрудников института В. И. Новоторцева и С. С. Голушкевича легли в основу создания теории предельного равновесия, предполагающей, что в каждой точке рассматриваемой среды возникают две площадки скольжения, на которых нарушается прочность грунта в соответствии с зависимостью Кулона. В. И. Новоторцев обобщил известное решение Прандтля на случай действия на поверхности невесомого грунта наклонной нагрузки и получил семейство линий скольжения и форму призмы. Он также предложил строить так называемую кривую предельных нагрузок (в координатах θ , τ), очертания которой показывают, что предельное состояние основания может быть достигнуто за счет увеличения нормальных или касательных нагрузок. Дальнейшее развитие теории предельного равновесия осуществил

С. С. Голушкевич, который предложил графические методы решения плоских задач теории предельного равновесия сыпучей среды. Впоследствии П. Д. Евдокимов на основе многочисленных экспериментов со штампами на кривой предельных нагрузок выделил начальный линейный участок и показал, что до чисел моделирования $N\sigma = (\sigma/b\gamma) < 3$ (где σ — среднее напряжение под штампом; b — ширина штампа; γ — удельный вес грунта) потеря устойчивости происходит путем сдвига штампа по плоскости его контакта с грунтом. Метод исследований прочностных характеристик грунтов с помощью штамповых испытаний, предложенный П. Д. Евдокимовым, оказался плодотворным для практического определения прочностных показателей грунтов, залегающих непосредственно в котлованах строящихся сооружений. Впервые такой метод был применен в районе Усть-Лужского порта (строительство 200), а впоследствии — на многочисленных гидротехнических стройках: Горьковской, Каховской, Плявиньской, Саратовской, Чебоксарской ГЭС и др.

На основании экспериментальных данных, а также теоретических исследований устойчивости жестких сооружений на грунтовых основаниях П. Д. Евдокимовым введены понятия плоского, смешанного и глубинного сдвигов, которые являются основными расчетными схемами при анализе устойчивости системы “сооружение — основание”. В настоящее время потеря основанием несущей способности рассматривается как завершающий этап расчета его напряженно-деформированного состояния при использовании расчетных моделей грунта как упругопластического тела. Использование ассоциированных и неассоциированных моделей для описания поведения грунтовых материалов нашло во ВНИИГ применение при расчетах давления грунта на подпорные стенки, осадок и кренов реакторных отделений АЭС, фундаментов пластформ буровых установок на шельфе.

В 1932 – 1939 гг. во ВНИИГ получила развитие теория моделирования грунтовых сред (В. А. Флорин, Н. Н. Давиденков, Г. И. Покровский, П. Д. Евдокимов). При этом уже в 1932 г. Н. Н. Давиденковым и Г. И. Покровским были сформулированы условия моделирования на центрифуге.

Одновременно с развитием механики грунтов во ВНИИГ исключительное развитие получила теория фильтрации. Успехи в этой области связаны в первую очередь с именем академика Н. Н. Павловского. В 1935 г. по его инициативе во ВНИИГ была создана лаборатория фильтрационных исследований, работы которой позволили удовлетворить возрастающие потребности гидротехнического строительства на реках Свири, Волге и Днепре. В 1930-е гг. в этой лаборатории работали ставшие впоследствии известными учеными В. И. Аравин, Р. Р. Чугаев, А. Н. Патрашев, С. В. Избаш, С. Н. Ну-

меров, Н. И. Дружинин, Б. Ф. Рельтов и др. В соответствии с потребностями гидротехнического строительства работа в области фильтрации развивалась во ВНИИГ по двум направлениям: совершенствование существующих и поиск новых методов решения задач напорной и безнапорной фильтрации и разработка методов оценки водопроницаемости и суффозионной устойчивости грунтов, а также грунтовых сооружений и оснований. Для определения параметров фильтрационного потока в основаниях и грунтовых плотинах были развиты теоретические методы. Прежде всего это гидравлические методы расчетов фильтрационного потока, в которых задача по определению гидравлического режима решается с использованием ряда упрощающих предположений. Эти методы были сформулированы и развиты в трудах Н. Н. Павловского, а также в работах Р. Р. Чугаева, С. В. Избаша. Наибольший вклад в решение задач фильтрации внесен учеными ВНИИГ с использованием гидромеханических методов, основанных на решении уравнения Лапласа при заданных граничных условиях. Аналитические методы решения задач теории фильтрации, рассматривавшей движение несжимаемой жидкости в недеформируемой пористой среде, с использованием аппарата теории функций комплексного переменного, аналитической теории дифференциальных уравнений и метода интегральных уравнений были развиты в трудах Н. Н. Павловского, В. И. Аравина, С. Н. Нумерова, А. Н. Петрашева. Исключительно плодотворной была идея Н. Н. Павловского применить к решению задач фильтрации аналогию между стационарным движением воды в пористой среде и стационарным движением электрического тока в проводящей среде, что привело к созданию и развитию метода электрогидродинамических аналогий (ЭГДА). Н. Н. Павловский впервые разработал схему и конструкцию прибора ЭГДА.

В лаборатории фильтрации Б. Ф. Рельтовым установлены главные закономерности электроосмотической фильтрации, которые легли в основу расчетов электроосмоса, получившего впоследствии практическое внедрение в строительстве.

В лаборатории фильтрации ВНИИГ, а впоследствии и в лаборатории грунтовых сооружений значительное развитие получили экспериментальные методы изучения фильтрационных свойств и фильтрационной прочности грунтов. Работы ВНИИГ в области исследований суффозии грунтов (Г. Х. Праведный, М. П. Павлич, В. Н. Жиленков и др.) легли в основу нормативных документов по подбору обратных фильтров, защищающих связные и несвязные грунты. Отечественные нормативные документы по проектированию фильтров и дренажных устройств, не имеющие аналогов в мировой практике гидротехнического строительства, созданы трудами ученых ВНИИГ и ВОДГЕО. В 1970 гг. в связи со строительством высоких бетонных и грунтовых

плотин на скальных основаниях (Братская, Усть-Илимская, Ингурская, Чарвакская и Нурекская ГЭС) В. Н. Жиленковым были разработаны экспериментальные и теоретические методы определения характеристик фильтрационных потоков в трещиноватых скальных массивах, а также методы оценки фильтрационной прочности скальных пород, т.е. возможности вымыва продуктов заполнения трещин, материала зон дробления и т.п.

Параллельно с развитием теории фильтрации потребовалось развитие теории консолидации грунтов, рассматривающей нестационарное движение поровой жидкости в деформируемой пористой среде. Фильтрационная теория консолидации была сформулирована К. Терцаги в 1925 г. и получила значительное развитие в трудах В. А. Флорина, который впервые рассмотрел консолидацию трехфазных грунтов, учел возможность существования в грунтах начального градиента напора, а также вывел основные уравнения фильтрационной консолидации грунта с учетом линейной и нелинейной ползучести его скелета. Им же в 1935 г. была сформулирована теория объемных сил, в которой связь между напряжениями и деформациями в скелете грунта описывается зависимостями линейной теории упругости, а взаимодействие фаз грунта представлено как воздействие воды на скелет грунта в виде объемных сил. Впоследствии эта теория получила название теории Био — Флорина. Для решения плоских и пространственных задач теории фильтрационной консолидации В. А. Флорин предложил использовать численные методы решения дифференциальных уравнений, в частности метод конечных разностей (МКР). Задачи нелинейной теории консолидации с учетом нелинейности связи между пористостью и напряжениями в скелете грунта, зависимости коэффициента фильтрации от пористости грунта, а также с учетом переменности содержания воздушной фазы в процессе уплотнения решены во ВНИИГ Л. В. Гореликом.

При строительстве гидростанции на р. Свири возникли длительные смещения подпорных стен, что привело к необходимости изучения свойств ползучести глинистых грунтов. Исследования ползучести глинистых грунтов осуществил Н. Н. Маслов, который провел длительные эксперименты на компрессионных и срезных приборах. Он установил явление длительного уплотнения во времени глинистого грунта, а также выявил закономерности его длительных сдвиговых деформаций. Н. Н. Маслов предложил на кривых ползучести выделять участки условно-мгновенных деформаций, неустановившейся, установившейся и прогрессирующей ползучести. Для описания процесса установившейся ползучести он предложил использовать уравнение течения вязкой жидкости Ньютона. Н. Н. Маслов ввел понятие порога ползучести τ_{lim} , а для грунтов при наличии τ_{lim} для описания ползучести

грунтов предложил использовать интегральные зависимости наследственного типа Больцмана — Вольтера.

В 50–60-е годы прошлого века в связи со строительством высоких бетонных плотин на скальных основаниях (Братская, Красноярская, Усть-Илимская, Ингурская, Чиркейская ГЭС) бурное развитие во ВНИИГ получила механика скальных пород. Проектирование гидросооружений на скальных основаниях потребовало определения прочности и деформируемости скальных массивов, а также анализа работы системы “подпорное сооружение — скальное основание”. С 1952 г. во ВНИИГ под руководством П. Д. Евдокимова развивались методы исследований прочности и деформируемости скальных пород, реализована идея проведения крупномасштабных полевых опытов, поскольку было очевидно, что поведение образца скальной породы в значительной степени отличается от поведения скального массива, представляющего собой среду, разбитую на отдельные системой трещин разного порядка. Для определения деформационных свойств скальных пород использовались методы штамповых испытаний в штольнях и на открытых площадках, а также метод гидростатического обжатия вертикальных скважин и горизонтальных круглых выработок (Д. Д. Сапегин). При изучении прочности скальных материалов, в том числе прочности контакта бетон — скала, использовался метод сдвига бетонных штампов и целиков скалы различного размера как в штольнях, так и в котлованах строящихся сооружений. Опыты со штампами и целиками (П. Д. Евдокимов, Р. А. Ширяев, Д. Д. Сапегин) позволили получить интегральные характеристики сопротивляемости сдвигу скальных пород по естественным трещинам с учетом их природного строения, включая естественный заполнитель. В качестве примера можно указать на опыты по сдвигу целика в котловане строящейся Красноярской ГЭС размером 10×10 м. Кроме полевых опытов во ВНИИГ был проведен большой комплекс лабораторных исследований прочности и деформируемости скальных пород, включая опыты на специальном трехосном приборе (И. Г. Гончаров), позволяющем испытывать образцы скальных пород при растягивающих и сжимающих напряжениях до 450 кг/см^2 , а также на так называемой “большой” скальной установке, позволяющей изучать сопротивление сдвигу скальных образцов диаметром до 1 м по трещинам. Обобщение проведенных во ВНИИГ исследований позволило обосновать расчетные значения характеристик прочности скальных грунтов ($\text{tg } \varphi$ и C), вошедших в отечественный нормативный документ “Основания гидротехнических сооружений”.

Начиная с 1970 г. широкое развитие во ВНИИГ получают модельные экспериментальные исследования с использованием эквивалентных материа-

лов. Первоначально они развивались применительно только к трещиноватым скальным, а затем и к нескальным грунтам. В качестве особого достижения следует отметить исследования объектов, включавших как скальные, так и нескальные грунты, для которых удовлетворение условиям подобия связаны с большими технологическими трудностями. Успешному развитию этих исследований способствовала постоянная большая работа по созданию набора различных эквивалентных материалов, позволивших разрабатывать модели относительно крупного, а затем и мелкого геометрического масштаба без применения принудительного утяжеления моделей с помощью, например, тяг или центрифугирования. Наибольший вклад в создание таких материала внесли сотрудники института Р. А. Ширяев, И. В. Мкртчян, Н. М. Карпов, А. А. Никитин.

Выполнявшиеся во ВНИИГ исследования с использованием эквивалентных материалов можно разделить на два вида: исследования по изучению закономерностей в поведении скальных грунтов или грунтовых элементов и исследования по решению конкретных инженерных задач для конкретных объектов. В числе исследований первого вида необходимо отметить изучение влияния масштабного фактора на сопротивляемость сдвигу блочных скальных оснований, влияния блочности скальных оснований на распределение в них напряжений и деформаций, влияния ориентировки трещин скальных массивов на их сопротивляемость сдвигу и влияния на местную прочность взаимной ориентировки трещин скального грунта и главных осей напряжений. Результаты этих исследований позволили установить ряд важных положений, обосновавших методы проведения экспериментальных исследований и методы расчетных оценок надежности работы грунтовых объектов. В частности, была установлена зависимость схем разрушения оснований от масштабного фактора, но независимость от него значений предельных нагрузок; определены различные схемы разрушения оснований путем проверки условия Кулона на различно ориентированных площадках элементарных объемов с использованием соответствующих этим площадкам характеристик, получаемых методом сдвига цилиндров (или штампов).

В числе модельных исследований второго вида следует отметить исследования на плоских моделях по оценке устойчивости и местной прочности основания гравитационных бетонных плотин Усть-Илимской и Бурейской ГЭС и арочной плотины Ингури ГЭС, исследования по оценке характеристик прочности основания плотины Рогунской ГЭС (грунтовой плотины и бортов, служащих основанием водопропускных сооружений и вмещающих горные выработки) в связи с возможным размывом пласта соли, залегающего в основании сооружений. Результаты этих исследований во мно-

гом способствовали обоснованию надежности указанных объектов.

В связи с развитием гидротехнического строительства в северной строительной-климатической зоне (Усть-Хантайская, Курейская, Колымская ГЭС) появилась необходимость в выявлении закономерностей деформируемости и прочности мерзлых оснований, а также льдосодержащих крупнообломочных грунтов. Большой комплекс исследований поведения таких грунтов в условиях трехосного нагружения при изменении их температуры и льдосодержания был проведен С. И. Пановым в Сибирском филиале ВНИИГ в г. Красноярске. Эти исследования послужили основой для проектов Усть-Хантайской и Курейской ГЭС. Здесь необходимо отметить, что созданный в 1960 г. СибВНИИГ сделал очень много для обоснования строительства гидроузлов в районах Сибири, включая районы Крайнего Севера. В СибВНИИГ помимо большого комплекса работ по экспериментальным натурным исследованиям механических свойств скальных пород, механике мерзлых каменно-ледовых материалов, натурным исследованиям и технологии строительства гидросооружений на Севере создана школа по теплофизике и тепломассопереносу в крупнообломочных материалах (Н. А. Мухетдинов, И. А. Максимов и др.), а также развиты направления по изучению фильтрационно-суффозионных процессов в мерзлых основаниях (В. В. Тетельмин).

В начале 1960 гг. в связи с необходимостью научного обоснования строительства в сейсмоопасных районах во ВНИИГ был создан отдел динамики и сейсмостойкости, руководителем которого стал О. А. Савинов. Наряду с изучением динамики и сейсмостойкости бетонных и железобетонных сооружений в отделе значительное развитие получили исследования динамических свойств грунтов и методы оценки динамической устойчивости и сейсмостойкости оснований и грунтовых сооружений (Н. Д. Красников, Г. С. Толкачев, Л. А. Эйслер и др.). Методы решения динамических задач и оценки динамической устойчивости оснований развивались в нескольких направлениях: определение динамических (сейсмических) нагрузок или напряжений в линейно-спектральной постановке с учетом зависимости динамических деформационных характеристик от статических эффективных напряжений с использованием различных схем расчета (сдвиговой клин, плоская и пространственная задачи) и численного решения задач с помощью методов конечных элементов, конечных разностей и граничных элементов; определение общих деформаций оснований и грунтовых сооружений в волновой постановке с учетом упругопластических свойств скелета грунта и его взаимодействия с поровой водой в зонах водонасыщения. Для исследований прочностных и деформационных свойств грунта при динамическом нагружении был создан

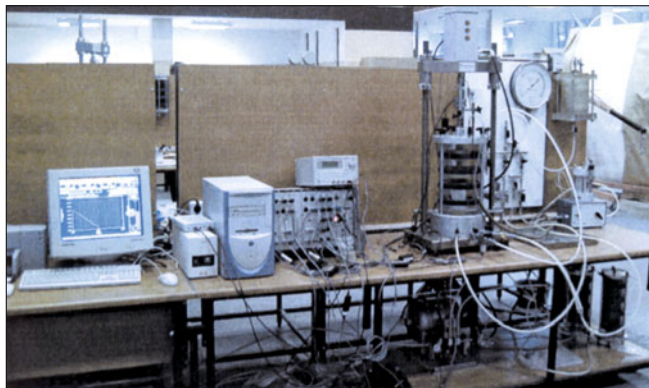


Рис. 1. Динамический стабилометр

ряд крупномасштабных (виброкомпрессионные, сдвиговые и ударные) установок, а также ряд лабораторных приборов (установка продольных и крутильных колебаний, стабилометр для динамического нагружения и др.) (рис. 1, 2). Экспериментальные исследования деформационных и прочностных характеристик грунтов при динамических нагрузках легли в обоснования расчетов реальных сооружений.

Из теоретических исследований, выполненных во ВНИИГ, особое внимание заслуживает развитие Л. А. Эйслером теории многофазных грунтов, в которой в уравнениях движения грунтовой среды учтено динамическое взаимодействие фаз. Для практического использования развиты методы оценки возможного разжижения грунтов по предельным (квазистатическим) величинам динамических напряжений или деформаций, а также методы расчета избыточных поровых давлений на основе результатов решения динамических задач и исследований уплотнения грунтов при одновременном действии статических и динамических нагрузок. Многие из исследований ВНИИГ в области динамики грунтов и сейсмостойкости оснований и грунтовых сооружений вошли в СНиП II-7-81 “Строительство в сейсмических районах”.

В последние годы большое внимание уделяется двум направлениям исследований. Первое из них — значительное развитие математического моделирования, что прежде всего определяется прогрессом вычислительной техники, наличием большого количества сертифицированных программ, с помощью которых решается широкий круг статических и динамических задач для разного рода расчетных схем и сложных математических моделей, адекватно отражающих многообразие механических свойств грунтовых материалов. В институте широко используются известные программы МКЭ, такие, как Plaxis, Ansys, Abaqus, Geoslop, а также разработанные во ВНИИГ — Диск — Геомеханика и Устойчивость. Они используются:

для создания прогнозных моделей НДС грунтовых плотин и их оснований при разработке инфор-



Рис. 2. Установка многоплоскостного сдвига (фирма “Wykeham Farrance”)

мационно-аналитического обеспечения диагностических комплексов по оценке состояния систем ...плотина — основание...;

для оценки статической работы негрунтовых конструкций, взаимодействующих с грунтом асфальтобетонных экранов и диафрагм каменно-набросных плотин, свай оболочек и засасываемых свай при горизонтальных нагрузках;

для оценки влияния сейсмических воздействий на несущую способность грунтового основания и характер его взаимодействия с фундаментом энергоблока, на устойчивость и смещения скальных берегов водохранилища;

для расчетов несущей способности оснований нефтяных платформ при статических и динамических нагрузках.

Эти исследования выполнены специалистами института Е. Н. Беллендиром, И. Н. Белковой, В. Б. Глазовским, Е. В. Курневой, Д. В. Мишиным, С. И. Пановым, В. С. Прокоповичем, Т. А. Созиновой, С. А. Сосниной и др. Результаты исследований нашли свое применение при проектировании и строительстве Ирганайской и Богучанской ГЭС, ЛАЭС-2, ледостойких нефтяных платформ для проектов “Приразломное”, “Сахалин-1” и “Сахалин 2”.

Второе направление — натурные наблюдения за состоянием грунтовых оснований гидротехнических сооружений, включающие наблюдения за осадками сооружений и их напряженным состоянием, фильтрационным режимом, характером изменения температуры (для сооружений в ССКЗ) и т.п. Эти наблюдения непосредственно связаны с обоснованием надежности построенных объектов и дают возможность оценить качество их проектов. Кроме того, они необходимы при разработке деклараций безопасности ГТС в соответствии с законом РФ “О безопасности гидротехнических сооружений”. Данные натурных наблюдений и результаты проектных проработок лежат в основе разработки критериев безопасности, являющихся основой оценки состояния сооружения.

Исследования в области строительства плотин из грунтовых материалов

Глаговский В. Б., Гольдин А. Л., доктора техн. наук,
Радченко В. Г., кандидат техн. наук (ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»)

Рассмотрены исследования ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева в обоснование проектирования, строительства и эксплуатации плотин из грунтовых материалов. Освещены основные работы в области гидромеханизации, строительства плотин с водоупорными грунтовыми элементами, с асфальтобетонными диафрагмами и инъекционными противифльтрационными элементами.

Ключевые слова: грунтовые плотины, проектирование, строительство, эксплуатация, технологии, асфальтобетонная диафрагма, противифльтрационные элементы.

Плотины из грунтовых материалов являются наиболее распространенным типом водоподпорных сооружений. Небольшие грунтовые плотины в Китае и на Ближнем Востоке были построены еще до нашей эры.

ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева непосредственно участвует в обосновании проектирования, строительства и эксплуатации грунтовых плотин преимущественно для больших энергетических объектов — это высоконапорные плотины, плотины, строящиеся в сложных инженерно-геологических условиях и плотины небольшого напора, не входящие в напорный фронт гидроэлектростанций значительной мощности.

Работы ВНИИГ в любой области имеют две составляющие: теоретическую разработку научных вопросов и внедрение этих разработок в практику гидротехнического строительства. Согласно основным типам грунтовых плотин можно выделить несколько главных направлений исследований:

обоснование возведения грунтовых плотин способом гидромеханизации, который получил большое развитие в послевоенные годы при строительстве на Волге и Днестре;

обоснование строительства плотин с водоупорными элементами из связных грунтов;

строительство плотин с негрунтовыми противифльтрационными элементами.

Получил развитие ряд самостоятельных научных дисциплин — теория фильтрации грунтовых вод, теория консолидации и ползучести грунтов, решение вопросов о фильтрационной прочности и устойчивости связных и несвязных грунтов, развитие математических моделей грунтов и методов экспериментального определения их характеристик, развитие теории сейсмостойкости грунтовых плотин.

Развитие теории фильтрации во ВНИИГ связано с деятельностью Н. Н. Им была создана лаборатория фильтрации, в которой работали ставшие впоследствии известными учеными В. Н. Аравин, С. А. Нумеров, Р. Р. Чугаев, С. В. Избаш, Б. Н. Рельтов, А. Н. Патрашев и др. Теория движе-

ния грунтовых вод детально описана во втором томе собрания сочинений Н. Н. Павловского. В этом томе, изданном АН СССР в 1956 г. имеется раздел о фильтрации через земляные плотины, в их основаниях и бортовых примыканиях. Работы ВНИИГ по проблеме фильтрационно-суффозионной прочности грунтов подробно освещены в обзорном докладе “Из истории развития вопроса о фильтрационно-суффозионной прочности грунтов в России и во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”, опубликованном в Трудах международного научного семинара “EWG ICOLD on Internal Erosion”, проходившего в 2009 г. в Санкт-Петербурге.

ВНИИГ выпустил ряд нормативных документов, в том числе “Руководство по расчетам фильтрационной прочности плотин из грунтовых материалов”, “Указания по проектированию переходных зон каменно-земляных плотин”, “Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений”, “Руководство по расчету фильтрационной прочности грунтовых сооружений и их оснований” (Г. Х. Праведный, М. П. Павич, В. Н. Жиленков, Е. А. Лубочков). Основанием для них служил обширный материал лабораторного изучения фильтрационно-суффозионных свойств грунтов. До настоящего времени эти работы не утратили своей ценности и используются при проектировании гидротехнических объектов.

Разработка теории движения взвешенных твердых частиц в потоке и взвесенесущих потоков для практических расчетов процессов гидромеханизации земляных работ являлась основным направлением деятельности лаборатории гидромеханизации и взвесенесущих потоков, возглавляемой М. А. Деметьевым. В этот период стали актуальными предложения по гидравлическому удалению зол и шлаков тепловых электростанций. Работы В. А. Мелентьева, М. В. Печенкина были посвящены созданию физически и гидродинамически обоснованных методов гидравлических расчетов потоков, транспортирующих взвесь. За основу методов принимались уравнения гидромеханики с необходимыми дополнительными коэффициентами, определяе-

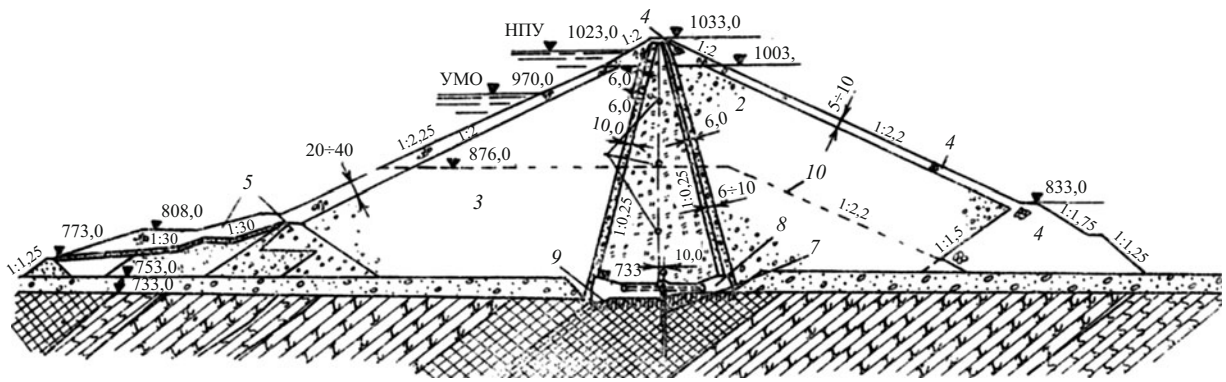


Рис. 1. Поперечное сечение плотины Нурекской ГЭС:

1 — ядро из сафедобской супеси (Г); 2 — фильтры ($d = 0 - 5$ мм; $d = 0 - 50$ мм) (Г); 3 — упорные призмы из галечника (Г); 4 — пригрузка откосов и упорный банкет из рваного камня; 5 — верховая строительная перемычка; 6 — смотровые галереи; 7 — противофильтрационная завеса; 8 — бетонная пробка; 9 — песчаники; 10 — песчаники и алевролиты; 11 — алевролиты; 12 — аллювий

мыми из опытов. Под руководством В. А. Мелентьева велась разработка технологической части гидротранспортной установки на испытательном полигоне в Нарве. Результаты исследований обобщены в монографии В. А. Мелентьева, В. П. Колпашникова, Б. А. Волнина “Намывные гидротехнические сооружения” (1973 г.).

Разработки ВНИИГ были использованы при строительстве намывных плотин Горьковской (ныне Нижегородской) ГЭС. Особенно следует упомянуть работы института для обоснования возведения намывным способом ядра высокой плотины Мингечаурской ГЭС из связных грунтов. Большие работы были проведены в связи со строительством в Египте высокой Асуанской плотины с ядром из глинистого материала с замывом песком каменных призм со стороны верхнего и нижнего бьефов. Для обоснования проекта на Днепродзержинском полигоне были созданы экспериментальные модели значительного размера, а в карьере Запорожского завода стройматериалов — большая пространственная модель высотой до 6 м. Благодаря этим исследованиям была обоснована проектная конструкция плотины и осуществлено ее строительство.

В связи со строительством высоких грунтовых плотин Чарвакской и Нурекской ГЭС (рис. 1) во ВНИИГ (параллельно с НИС Гидропроекта и ВНИИВОДГЕО) проводилось изучение прочностных и деформационных свойств крупнообломочных грунтов, служащих материалом упорных призм. По инициативе Л. Д. Аптекаря в Днепродзержинском отделении крупномасштабных исследований была создана специальная лаборатория, оборудованная большими компрессионными приборами трехосного сжатия, позволявшими проводить испытания образцов из крупнообломочных грунтов диаметром 900 мм и высотой до 2 м при всестороннем давлении в камере прибора до 60 кг/см^2 . Исследования на этих приборах легли в обоснование прочностных характеристик материа-

ла упорных призм проектов плотин Чарвакской, Нурекской и Рогунской ГЭС (Б. И. Балыков). Исследования строительных свойств грунтов и крупнообломочных материалов, а также исследование конструкций грунтовых плотин легли в основу выпущенных ВНИИГ совместно с рядом организаций нормативных документов различного уровня, в том числе и СНиП 2.06.05-84* “Плотины из грунтовых материалов”.

В связи с развитием гидротехнического строительства в северной строительной-климатической зоне (Усть-Хантайская, Курейская, Колымская ГЭС) появилась необходимость в выявлении закономерностей деформируемости и прочности мерзлых льдосодержащих крупнообломочных грунтов. Большой комплекс исследований поведения таких грунтов в условиях трехосного нагружения при изменении их температуры и льдосодержания был проведен С. И. Пановым в Сибирском филиале ВНИИГ в г. Красноярске. Результаты этих исследований послужили основой для проектов плотин Усть-Хантайской и Курейской ГЭС.

В области изучения прочностных и деформационных свойств грунтовых материалов значительный прогресс в исследованиях связан с появлением во ВНИИГ современной экспериментальной базы в виде приборов трехосного сжатия для условий статического и динамического нагружений, а также приборов многоплоскостного сдвига (английская фирма “Wykehem Farrance”). Эти приборы позволяют автоматически поддерживать нагрузку или скорость деформаций, проводить сбор и обработку результатов измерений, что повысило точность получаемых результатов и сократило сроки проведения опытов. Новым видом испытаний стало определение недренированной прочности S_u , которая широко используется при расчетах несущей способности и устойчивости в зарубежной практике (В. В. Сокуров, Т. Ю. Векшина). Необходимо отметить, что в последнее время, особенно в связи с реализацией ряда международных проектов в ис-

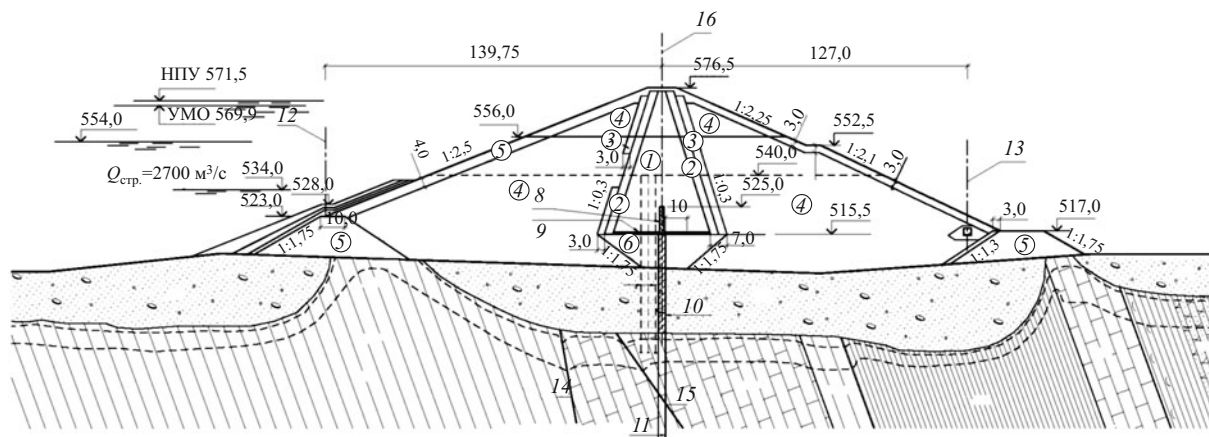


Рис. 2. Поперечный разрез плотины Сангтудинской ГЭС-1 на ПК 3+10:

1 — ядро; 2 — 1-й слой фильтра; 3 — 2-й слой фильтра; 4 — упорные призмы; 5 — банкетты и крепление откосов камнем; 6 — отсыпка в воду и насухо гравийно-галечникового грунта; 7 — завеса, выполненная струйным методом; 8 — асфальтобетонная диафрагма; 9 — асфальтобетон, 3 слоя; 10 — инъекционная завеса, 3 ряда; 11 — глубокая цементационная завеса — 2 ряда; 12 — ось верхового банкета; 13 — ось дренажа; 14 — разлом III порядка; 15 — разлом IV порядка; 16 — ось плотины

следованиях, стали использоваться зарубежные методики и иностранные стандарты (ASTM, BS, DNV и др.) в связи с расширением международного сотрудничества. На динамической установке многопластного сдвига и динамическом стабилометре (всестороннее обжатие до 0,5 МПа, диапазон частот 0,2 – 70 Гц) используются известные методики испытаний, включающие изотропную и анизотропную консолидацию, фазы статического и циклического нагружения с контролем деформаций (напряжений) и измерением порового давления. Опыты при динамическом нагружении образцов позволяют для глинистых грунтов установить снижение параметров прочности при динамическом нагружении, а для песчаных грунтов — потенциал разжижения грунта (Ю. Г. Смирнов).

Исследования проводились для грунтов плотин Братской и Сангтудинской ГЭС, для обоснования ряда проектов морских нефтегазопромысловых сооружений и могут использоваться при проектировании ограждающих грунтовых дамб Малой Мезенской ПЭС в Кислой губе и Тугурской ПЭС.

Одним из современных типов плотин являются плотины с асфальтобетонными диафрагмами (АБД) и экранами. В настоящее время закончено строительство плотины Ирганайской ГЭС и строится плотина Богучанской ГЭС. Преимуществами плотин с асфальтобетонными диафрагмами и экранами являются их экономические и технологические показатели.

Весьма интересны в этом смысле проект и строительство плотины Ирганайской ГЭС высотой 101 м. Уникальность Ирганайской плотины с упорными призмами из галечниковых грунтов и асфальтобетонной диафрагмой толщиной соответственно по верху 0,5 м и по низу 1,3 м заключается в том, что в русле под плотиной залегает 60 – 65-метровая толща аллювиальных отложений. По проекту осно-

вание должно было пересекаться стеной в грунте на всю глубину отложений. Диафрагма со стеной в грунте сопрягалась с помощью глинобетонной призмы (форшахты). В современных условиях противofильтрационное устройство в основании представляет собой 20-метровую висячую стену в грунте и пятирядную цементационную завесу с шагом между рядами 3,5 м и с шагом скважин в ряду 3 м. Предполагалось, что с помощью цементационной завесы можно будет уменьшить проницаемость основания до 1 м/сут.

Основной задачей специалистов ВНИИГ являлась оценка фильтрационного режима в системе «плотина — основание» с определением эффективности работы противofильтрационных устройств, а также оценка фильтрационной прочности грунтов тела плотины и основания при постановке плотины под полный напор при НПУ = 547,0 м. Результаты расчетов с помощью МКЭ для кусочно-однородной в фильтрационном смысле области «плотина — основание» с заданием коэффициентов фильтрации для наброски, АБД и грунтов основания, стены в грунте и цементационной завесы показали, что гашение напора на АБД составляет от 46 до 64 % (при НПУ = 547,0 м $\Delta H = 61,9$ м). Расчеты фильтрации при отметке верхнего бьефа 484,0 м (1-я очередь) показали гашение напора, практически совпадающее с данными измерений по пьезометрам. Во всех элементах конструкции плотины действующие градиенты напора меньше критических значений по нормативным документам. Вместе с тем данные натурных наблюдений свидетельствуют о несовершенстве завесы и необходимости дополнительной установки КИА (О. Г. Марголина).

Напряженно-деформированное состояние плотины определялось расчетами с использованием МКЭ в нелинейной постановке для случаев статического и сейсмического воздействий. Во ВНИИГ

проводились также работы по акустическим исследованиям на плоской мелкомасштабной физической модели.

Создание плотин с асфальтобетонными диафрагмами опирается на обширный опыт научных исследований во ВНИИГ, подтверждающий преимущества возведения диафрагмы из литого асфальтобетона. Повышение содержания вяжущего в асфальтобетоне обеспечивает самозалечивание возможного трещинообразования в диафрагме, которое возникает при ее взаимодействии с боковыми призмами. Преимущества диафрагмы из литого асфальтобетона по сравнению с укатанными диафрагмами особенно проявляются при строительстве плотин в суровом климате, когда диафрагма может возводиться при отрицательных температурах до минус 25 – 30 °С. Этому служит научно-техническое сопровождение институтом строительства плотины Богучанской ГЭС (А. Н. Дымант, Е. И. Кузнецов).

Здесь необходимо отметить работы ВНИИГ по обоснованию строительства грунтовой плотины с металлической диафрагмой. Плотина Серебрянской ГЭС-2 с металлической диафрагмой имеет высоту 64 м, длину по гребню 1820 м, заложение откосов 1:2. Упорные призмы плотины отсыпаны из песчано-гравийных грунтов. Стальная шпунтовая диафрагма выполнена из корытообразного шпунта ШЩК-1 толщиной 10 мм и сопрягается в основании с бетонным зубом, заглубленным на 2 – 2,5 м в скальное основание, ниже зуба располагается цементационная завеса глубиной до 15 м. В той части основания, где оно представлено толщей песчано-гравийных грунтов, диафрагма сопряжена внахлестку с помощью болтов со шпунтовой завесой, погруженной в основание на глубину до 28 м. Сопряжение диафрагмы с зубом свободное: нижняя часть диафрагмы может перемещаться горизонтально по битумному мату, что позволяет избежать возникновения больших перерезывающих сил в диафрагме при заполнении водохранилища. Работы по устройству диафрагмы контролировались ВНИИГ (В. С. Кузнецов), одновременно в лабораторных условиях изучалась динамика коррозионных процессов.

В 2006 – 2008 гг. ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” принимало активное участие в строительстве Сангтудинской ГЭС-1. Ее грунтовая плотина состоит из центрального ядра из супесчано-щебенистых грунтов, двух слоев фильтров из галечников, упорных призм из гравийно-галечникового грунта, каменных банкетов и каменного крепления откосов, противофильтрационной цементационной завесы в скальном основании и в русловом аллювии. Плотина имеет максимальную строительную высоту 75 м, ширину по гребню 12 м, максимальную ширину по основанию 433 м, длину по гребню

517 м. Отметка гребня 576,5 м. Крутизна верхового откоса 1:2,5, низового — 1:2,1 до отм. 552,5 м, на которой устраивается берама шириной 6 м, и 1:2,25 выше по условиям обеспечения устойчивости и прочности плотины в эксплуатационный период. Отметка верха ядра 575,0 м, ширина ядра по верху 3 м, крутизна верхового и низового откосов ядра 1:0,3 (рис. 2).

В 2007 г. на строительстве Сангтудинской ГЭС-1 организацией ООО “Геоизол” в соответствии с техническим проектом института “Гидропроект” при активном участии ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”, осуществлявшем научные исследования и сопровождение промышленных работ, впервые в отечественной практике в основании плотины СГЭС-1 (в аллювиальных отложениях русла р. Вахш) в исключительно сложных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях была выполнена противофильтрационная завеса (стенка) методом струйной цементации на глубину до 40 м (В. Г. Радченко, Ю. Д. Семенов). Суть технологии струйной цементации грунтов применительно к строительству Сангтудинской ГЭС-1 заключалась в использовании энергии высоконапорной струи цементного раствора для разрушения структуры аллювиальных грунтов в русле реки под ядром плотины с одновременным перемешиванием грунта с цементным раствором, в результате чего после твердения цементного раствора образуется грунтобетон, обладающий высокими прочностными, деформационными и низкими фильтрационными характеристиками.

В заключение следует остановиться на расчетных методах, используемых для обоснования конструкций плотин. В течение долгих лет существования ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева эти методы совершенствовались, соответствуя общему прогрессу развития науки в нашей стране и за рубежом. Этот прогресс привел к тому, что от использования в расчетах напряженно-деформированного состояния плотин модели линейной теории упругости и простейших аналитических решений в настоящее время перешли к использованию сложных упруго-вязкопластических моделей в разных модификациях и получению конечного результата на основе расчетов на ЭВМ по программам различных численных методов (метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод граничных элементов и др.). Для расчетов устойчивости откосов плотин стали использовать как специальные программы, так и решения упругопластических задач с введением критериев по деформациям. В настоящее время в институте с успехом используются такие программы, как “Диск-геомеханика” (разработка ВНИИГ), “Kosmos”, “Plaxis”, “Ansys Abaqus”, “Geoslop” и др.

Литые асфальтобетонные диафрагмы грунтовых плотин

Дымант А. Н., кандидат техн. наук,

Кузнецов Е. И., инженер,

Прокопович В. С., кандидат техн. наук (ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»)

ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева разрабатывал и осуществлял научно-техническое сопровождение строительства литых асфальтобетонных диафрагм грунтовых плотин. Приведен опыт расчета их напряженно-деформированного состояния. Показаны перспективы применения литых асфальтобетонных диафрагм для каменнонабросной плотины Канкунской ГЭС и грунтовых плотин Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера.

Ключевые слова: грунтовые плотины, литые асфальтобетонные диафрагмы, опыт строительства, расчет напряженно-деформированного состояния.

Асфальтовые материалы и асфальтобетоны для гидроизоляции и противофильтрационных устройств (ПФУ) исследуются ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева и успешно применяются с 1927 г. [1]. Для гидротехнических сооружений сотрудниками института П. Д. Глебовым, М. Г. Старицким, Н. С. Покровским, С. Н. Попченко, Ю. Н. Касаткиным был разработан гидротехнический асфальтобетон. Он отличается от дорожного повышенной водоустойчивостью, эластичностью, трещиностойкостью и, главное, высокой водонепроницаемостью, с коэффициентом фильтрации $10^{-8} - 10^{-12}$ см/с (у дорожного 10^{-6} см/с). Из уплотняемого (укатываемого) гидротехнического асфальтобетона и его разновидности полимерасфальтобетона (асфальтобетона на битуме, модифицированном полимерами) были выполнены миллионы квадратных метров противофильтрационных конструкций грунтовых гидротехнических сооружений на энергетических и промышленных объектах страны. В этих работах принимали участие Ю. Н. Касаткин, Г. В. Борисов, Н. В. Стабников, А. М. Кисина, Е. И. Кузнецов, Д. Н. Касаткина, В. И. Кочерова, В. Н. Яковлев.

С реологической точки зрения асфальтобетон представляет сложную систему, законы деформирования которой не подчиняются ни закону Гука для твердых тел, ни закону Ньютона для вязких жидкостей. Исследования реологических свойств и разработка методов инженерного расчета гидротехнических асфальтобетонов были начаты П. Д. Глебовым и М. Г. Старицким, предложившим рассматривать асфальтобетон как аномально вязкую жидкость, и продолжены С. Н. Попченко, Ю. Н. Касаткиным, Н. Ф. Щавелевым, Т. Ю. Таибовым, В. М. Давиденко, В. С. Прокоповичем.

В 70 – 80-е годы прошлого века в связи с предполагаемым интенсивным освоением богатейших ресурсов Сибири, Дальнего Востока, Крайнего Севера возникла необходимость разработки эффективных конструкций грунтовых плотин и их ПФУ. В те годы в мире уже начинали применять в качестве противофильтрационных устройств грунтовых

плотин диафрагмы из уплотняемого асфальтобетона [2]. К сожалению, уплотняемый асфальтобетон имеет ряд технологических особенностей, некоторые из которых не позволяют работать с асфальтобетоном в условиях Сибири большую часть года. Длительные исследования Н. С. Покровского, Ю. Н. Касаткина показали, что водонепроницаемым и водостойким (гидротехническим) асфальтобетон является только при достаточной степени уплотнения, характеризуемой величиной его пористости, которая должна быть менее 3 %. Чтобы добиться требуемой плотности, для уплотняемых асфальтобетонов должен быть соблюден ряд факторов: подогрев и высушивание нижележащего слоя асфальтобетона, ограниченная толщина укладываемого слоя, своевременность укатки уложенного асфальтобетона пока смесь находится в строго определенном диапазоне температур, невозможность производства работ при отрицательных температурах окружающего воздуха и основания, невозможность работ при дожде. Все это неприемлемо для климатических условий Сибири, так как строительный сезон получается слишком коротким.

Для строительства в климатических условиях Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера требовалось решение, при котором сохранялись или даже улучшались бы эксплуатационные свойства уплотняемого гидротехнического асфальтобетона, но удалось бы избежать его технологических недостатков при производстве работ. Ю. Н. Касаткин предложил разработать и исследовать возможность применения не уплотняемого, а литого гидротехнического асфальтобетона для противофильтрационных конструкций грунтовых плотин, в том числе возводимых в северных климатических условиях. Следует отметить, что укладка литых асфальтовых материалов технологична и высокопроизводительна. Так, например, удалось в очень короткие сроки выполнить гидроизоляцию системы техводоснабжения первой очереди Ровенской АЭС — открытых каналов, брызгальных бассейнов, чаш градирен — на площади почти 100 000 м² литым асфальтовым

раствором (литым песчаным асфальтобетоном). Необходимость работ была вызвана тем, что после начала эксплуатации станции значительно поднялся уровень грунтовых вод почти до дневной поверхности, а в связи с особенностями грунтов основания возникла опасность карстовых процессов. После выполнения гидроизоляции уровень грунтовых вод стал понижаться и вернулся к отметкам до периода начала строительства и эксплуатации станции. Научно-техническое сопровождение работ на АЭС осуществляли А. Н. Дымант, В. В. Успенский, Е. И. Кузнецов, Г. А. Давиденко.

Наиболее эффективным и надежным ПФУ грунтовой плотины в условиях Сибири является диафрагма из литого асфальтобетона. Находясь в теле плотины, диафрагма защищена от механических воздействий (ледовых, волновых), перепадов температур. Благодаря пластичности асфальтобетона она хорошо отслеживает любые деформации грунтовых призм и основания плотины. Литой асфальтобетон даже при низких температурах способен к самозалечиванию возможных трещин и щелей (что особенно важно в узлах сопряжений). По предложению профессора С. Н. Попченко плотины с литыми асфальтобетонными диафрагмами (ЛАБД) получили название “плотины сибирского типа” [3, 4].

При разработке ПФУ из литого асфальтобетона необходимо было решить ряд проблем материальноведческого, конструктивного и технологического характера.

Идеологом и исполнителем большинства работ по исследованию литого асфальтобетона и ЛАБД был Ю. Н. Касаткин. Общее руководство работами осуществлял С. Н. Попченко. Особенности работы диафрагм из литого асфальтобетона исследовали Ю. Н. Касаткин, Н. Ф. Щавелев, В. М. Давиденко [5, 6]. Т. Ю. Таибовым были изучены условия самозалечивания (самоомоноличивания) трещин и щелей в асфальтобетоне [7]. М. П. Павичем был разработан метод определения предельно плотных смесей грунтов по степени неоднородности гранулометрического состава [8]. Ю. Н. Касаткиным доказана применимость этого метода для проектирования составов асфальтобетонов [9], что позволило свести подбор их минеральной части к простой расчетной задаче. Ю. Н. Касаткин также подробно исследовал варианты конструкций сопряжений асфальтобетонной диафрагмы с основанием и различными бетонными конструкциями (цементационными галереями, береговыми устоями, бетонными плотинами). Г. В. Борисовым, Е. И. Кузнецовым и В. В. Успенским разрабатывались различные технологии строительства асфальтобетонных диафрагм и необходимое для этой цели оборудование.

Выполненные исследования позволили проектным организациям разработать грунтовые плотины

с литыми асфальтобетонными диафрагмами для шламохранилища Днепровского алюминиевого завода (ВАМИ), ГЭС Хадита в Ираке (Гидропроект им. С. Я. Жука), Ирганайской ГЭС (Ленгидропроект) и Богучанской ГЭС (Гидропроект).

Плотина с литой асфальтобетонной диафрагмой на шламохранилище Днепровского алюминиевого завода в г. Запорожье (Украина) высотой 32 м и длиной около 700 м возводилась в 1978 – 1981 гг. Асфальтобетон заливался в разборно-переставную опалубку бадьями с помощью крана. Работы по научно-техническому сопровождению и на месте строительства осуществляли Ю. Н. Касаткин, Г. В. Борисов, В. В. Успенский, В. А. Фесик.

На основании полученного положительного опыта Гидропроект им. С. Я. Жука разработал конструкцию грунтовой плотины с литой диафрагмой ГЭС Хадита в Ираке длиной 9600 м, высотой 56 м. Строительство диафрагмы осуществлялось в 1981 – 1986 гг. Подбор состава литого асфальтобетона и выбор технологии возведения диафрагмы производились на месте строительства В. В. Успенским. Наиболее рациональным в данных условиях оказался траншейный способ строительства: в отсыпанном ярусе грунта рыли траншею и заливали ее асфальтобетоном [10]. Им же были предложены необходимые машины и оборудование, разработан специальный асфальтоукладчик, подобраны на местных материалах составы асфальтобетона. После отъезда В. В. Успенского из Ирака сотрудники ВНИИГ Ю. Н. Ногинов и В. А. Фесик осуществляли научное сопровождение строительства диафрагмы, корректировку составов асфальтобетона и контроль качества производства работ.

Генпроектировщиком грунтовой плотины Ирганайской ГЭС высотой 101 м с литой асфальтобетонной диафрагмой на р. Аварское Койсу был Ленгидропроект. Исследования и научно-техническое сопровождение строительства диафрагмы в различные периоды строительства в 2001 – 2006 гг. осуществляли в основном Ю. Н. Касаткин, Е. И. Кузнецов, Г. В. Борисов, В. В. Успенский, А. Н. Дымант. Выбор для диафрагмы земляной плотины Ирганайской ГЭС горячего литого асфальтобетона как пластичного материала был определен необходимостью сохранения сплошности и водонепроницаемости диафрагмы в теле плотины в эксплуатационный период ее работы в случае неравномерных деформаций грунта основания плотины, а также верховой и низовой призм при статических и сейсмических нагрузках. На основании анализа условий строительства и эксплуатации плотины Ирганайской ГЭС во ВНИИГ для литой диафрагмы были разработаны требования к асфальтобетону и технологии выполнения диафрагмы. Проведены исследования и выбор исходных материалов —



Рис. 1. Общий вид строительства литой асфальтобетонной диафрагмы грунтовой плотины Ирганайской ГЭС

песчано-гравийной смеси, битума и минерального порошка, обоснована методика подбора состава и произведен подбор состава асфальтобетона. Были определены физико-механические и реологические характеристики асфальтобетона диафрагмы. Была разработана технология изготовления литого асфальтобетона, его транспортировки и укладки, выбраны оптимальные технологические режимы. Непосредственно на месте строительства осуществлялась корректировка состава асфальтобетона: вначале из-за необходимости учета влияния погрешностей дозирования ингредиентов в процессе изготовления смеси в асфальтосмесителях, затем периодически — при изменении параметров исходных материалов. Здесь впервые по предложению Чиркейгэсстроя была применена разборно-переставная опалубка из железобетонных блоков, позволяющая заливать асфальтобетон непосредственно из самосвалов (рис. 1, 2). Для обеспечения необходимого качества производства работ институтом осуществлялись обучение персонала отдела контроля качества Чиркейгэсстроя и сопровождение исследований состава и качества асфальтобетона в строительной лаборатории, независимое изучение свойств асфальтобетона в ядрах. Результаты проведенных исследований позволили обеспечить требуемое качество строительных работ.

Для расчетного обоснования надёжной работы плотины Ирганайской ГЭС с асфальтобетонной диафрагмой были поставлены и решены следующие задачи: разработка конечноэлементной модели центрального поперечного сечения плотины, выбор



Рис. 2. Разборка железобетонной опалубки литой асфальтобетонной диафрагмы Ирганайской ГЭС

уравнений состояния материалов плотины и их расчетных параметров, уточнение и калибровка по данным натурных наблюдений параметров модели, расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) асфальтобетонной диафрагмы с учетом вязкоупругих свойств асфальтобетона и упругопластических свойств грунтов тела плотины для одного сценария возведения плотины и заполнения водохранилища.

Условия работы диафрагмы таковы, что на протяжении всего периода эксплуатации будет происходить медленное неустановившееся течение асфальтобетона в диафрагме, вызывающее постоянное изменение НДС тела плотины. Поэтому при разработке конечноэлементной модели плотины для учета деформации ползучести литого асфальтобетона потребовалось детальное представление конструкции диафрагмы. Из-за небольшой толщины диафрагмы выбранный шаг разбивки диафрагмы на конечные элементы составлял 19 – 25 см.

Для получения достоверной оценки работы гребневой части плотины в расчетах учитывались следующие факторы: реальный график возведения сооружения и заполнения водохранилища; развитие в расчетном сечении областей как упругопластических, так и вязкоупругих деформаций.

Расчеты напряженно-деформированного состояния плотины были выполнены методом конечных элементов (МКЭ) В. С. Прокоповичем и Т. А. Созиновой [11] с помощью программного комплекса ANSYS 11.0. Деформационные свойства каменной наброски учитывались моделью упругопластической грунтовой среды (Друкера — Прагера), реологические свойства асфальтобетона — степенным законом ползучести с временным или деформационным упрочнением. Калибровка модели осуществлялась путем корректировки ее параметров по результатам сравнения НДС плотины, полу-

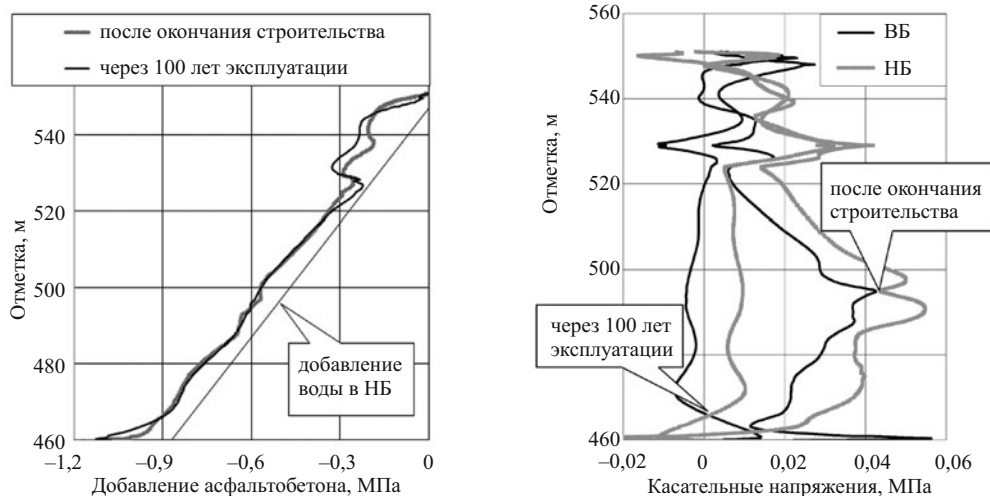


Рис. 3. Давление асфальтобетона и касательные напряжения в диафрагме на границе с упорными призмами

ченного в расчете на модели при начальных значениях характеристик грунтов, с данными натурных наблюдений.

В результате расчетов МКЭ были определены напряжения и деформации в теле плотины, основании и асфальтобетоне на разных этапах строительства и эксплуатации сооружения. Исследования зон пластических деформаций в грунте показали, что заметные пластические сдвиги в грунте происходят в верховой призме и локализованы вдоль наклонной плоскости, которая проходит от основания диафрагмы и образует с ней угол в 30° . Напорная грань диафрагмы в центральном сечении плотины смещается в сторону нижнего бьефа примерно на 40 см за счет действия гидростатического давления воды в верхнем бьефе. При этом грунтовый клин, расположенный между диафрагмой и плоскостью локализации пластических деформаций, опускается вниз вдоль диафрагмы примерно на 15 см.

Расчеты выявили следующую схему работы диафрагмы из литого асфальтобетона в теле плотины. Практически сразу после окончания строительства вертикальные и горизонтальные компоненты нормальных напряжений в асфальтобетоне становятся почти одинаковыми. Давления растут в диафрагме линейно с глубиной аналогично гидростатическому давлению столба тяжелой жидкости с плотностью $1,05 - 1,3 \text{ т/м}^3$. Они всюду более чем на 10 % превышают давление воды в верхнем бьефе, что обеспечивает сплошность диафрагмы. Анализ касательных напряжений в асфальтобетоне на границе с упорными призмами показал, что после завершения строительства на низовую упорную призму плотины передаются небольшие касательные напряжения от веса верховой упорной призмы. За 100 лет эксплуатации происходит почти полная релаксация этих напряжений и на контакте диафрагмы с грунтом остаются только касательные на-

пряжения, вызванные зависанием диафрагмы на упорных призмах (рис. 3). То есть асфальтобетонная диафрагма исполняет роль слоя “смазки”, снимающего касательные напряжения, между упорными призмами плотины. Небольшие остаточные касательные напряжения удерживают значительную часть веса литого асфальтобетона, поддерживая равновесие, и не вызывают при этом заметных деформаций ползучести. Нарастание давлений в нижней части диафрагмы происходит весьма медленно, за 100 лет давление увеличивается не более чем на 3 %. Таким образом, диафрагма длительное время остается стабильной, не оседает и не расплывается в стороны. Анализ расчетных деформаций растяжения и сжатия в диафрагме показал, что они не превышают значений допустимых проектных деформаций для литого асфальтобетона.

1 июня 2006 г. началось заполнение водохранилища Ирганайской ГЭС до проектной отметки. Весь ход заполнения водохранилища сопровождался мониторингом технического состояния плотины, основания и береговых примыканий. Результаты мониторинга при заполнении водохранилища и последующей эксплуатации плотины при проектном напоре подтвердили отсутствие фильтрации воды, требуемое качество плотины, в том числе асфальтобетонной диафрагмы.

В 80-е годы Гидропроект им. С. Я. Жука приступил к проектированию каменнонабросной плотины Богучанской ГЭС. Одним из вариантов ПФУ плотины была асфальтобетонная диафрагма.

Перед началом строительства каменнонабросной плотины Богучанской ГЭС в г. Братске Братскгэсстроем с участием сотрудников ВНИИГ (ответственный исполнитель С. В. Гаврилов) был выполнен опытный крупномасштабный фрагмент каменнонабросной плотины с асфальтобетонной диафрагмой, представляющий собой замкнутый пря-

моугольник со сторонами 40×12 м и высотой 8,5 м. При работе на фрагменте выполнялась укладка пластичного асфальтобетона (уплотняемого асфальтобетона с повышенным количеством вяжущего), литого асфальтобетона. Кроме того, отрабатывался вариант сборной диафрагмы из асфальтовых блоков различной конфигурации. Фрагмент заполнялся водой; проводились исследования водонепроницаемости фрагмента, швов, влияния на эти показатели условий и технологий производства работ. Строительство фрагмента велось и в зимние месяцы при температуре воздуха до минус $38,2$ °С. По результатам этих работ и опыта работ ВНИИГ с асфальтобетонами был выбран вариант монолитной диафрагмы из литого гидротехнического асфальтобетона, в первую очередь потому, что он обеспечивал работоспособность плотины в большей степени, чем остальные варианты, и позволял вести строительство и в зимние месяцы. Были отмечены следующие основные преимущества таких диафрагм.

1. Средняя среднесуточная температура воздуха ниже 0 °С в Богучанах держится 190 суток в году, плюс более 30 дней идут дожди. Остается чуть более трети года, когда может использоваться уплотняемый асфальтобетон, так как при отрицательных температурах и в дождь уплотняемый асфальтобетон применять нельзя. Для возведения диафрагмы из литого асфальтобетона эти погодные условия препятствием не являются, что и показал опыт работы с ним до температуры минус $38,2$ °С и последующие испытания выполненного фрагмента заполнением водой.

2. Литой асфальтобетон можно укладывать слоями по 120 см и более, а уплотняемый только толщиной около 20 см.

3. Асфальтобетон водонепроницаем и долговечен при остаточной пористости ниже 3 %. Чтобы добиться этого для уплотняемого асфальтобетона необходимо точно выбирать толщину уплотняемого слоя, параметры катков, скорости их передвижения при укатке, число проходов в зависимости от температуры смеси и погодных условий — температуры окружающего воздуха, скорости ветра и т.д. Поэтому основная забота при контроле качества процесса укладки уплотняемого асфальтобетона — постоянное и непрерывное определение степени его уплотнения (остаточной пористости). Перед укладкой очередного слоя уплотняемого асфальтобетона основание требуется подсушить и подогреть инфракрасными излучателями.

Литой же асфальтобетон — это самоуплотняющийся материал, который после укладки не требует дополнительных операций по уплотнению и, будучи залит в диафрагму, в процессе остывания достигает требуемой плотности и остаточной пористости

(ниже 3 %), то есть как материал диафрагмы гарантированно водонепроницаем и, следовательно, долговечен под напором воды на расчетный срок службы грунтовой плотины. Основание при его укладке не надо подсушивать и подогревать.

4. Литой асфальтобетон способен к самоомоноличиванию (на что не способен при эксплуатации в температурных условиях Богучанской ГЭС уплотняемый асфальтобетон), более пластичен и выдерживает без разуплотнения значительно большие деформации и при более низких температурах, чем уплотняемый.

5. Технология работ с литым асфальтобетоном более гибкая, чем с уплотняемым. Если для уплотняемого асфальтобетона возможна только непрерывная послойная технология, то для литого — как непрерывная, так и дискретная на разных участках любой протяженности, на разных отметках, в том числе и ступенчато.

6. Диафрагма из уплотняемого асфальтобетона на контакте с грунтом переходного слоя имеет зигзагообразную форму, так как при уплотнении каждого слоя асфальтобетона его верхняя часть вдавливается в грунт больше нижней. Контактные поверхности литой диафрагмы плоские. При значительном различии осадок верховой и низовой грунтовых призм при заполнении водохранилища и в последующий эксплуатационный период это может привести к возникновению продольных трещин в уплотняемой диафрагме, что исключено для литой.

7. Литой асфальтобетон менее капризен при колебании свойств исходных материалов, при нарушениях точности их дозировки, при временных сбоях в технологии, при простоях чем уплотняемый.

8. По производительности работ технология возведения диафрагм из литого асфальтобетона превосходит технологию возведения диафрагм из укатанного асфальтобетона.

Работы по укладке литого асфальтобетона непосредственно на каменнонабросной плотине Богучанской ГЭС длиной 1880 м начались на отм. 127 м (отметка верха диафрагмы 211 м) в 1988 г. с использованием технологии укладки цементного бетона (асфальтобетонный завод — самосвал — бадья — опалубка) и велись с разной интенсивностью в разные годы или вообще приостанавливались в связи с отсутствием финансирования. Укладка асфальтобетона производилась и при отрицательных температурах. Например, в 1991 г. из 126 рабочих дней 64 дня работы велись при отрицательной температуре: 31 день при температуре от 0 до -10 °С, 19 дней — от -11 до -20 °С, 11 дней — от -20 до -30 °С, 3 дня — ниже -30 °С (до $-32,9$ °С). Были выявлены и проблемы строитель-

ства при низких температурах, вызванные прежде всего непригодностью существующих асфальтосмесительных установок. Уже непосредственно в ходе строительства диафрагмы плотины Богучанской ГЭС было предложено несколько способов решения проблемы работы асфальтобетонного завода при низких отрицательных значениях температуры окружающего воздуха: укрытие асфальтосмесителей, обогрев и теплоизоляция основных узлов установок, организация закрытого склада песка и гравия и т.д.

ВНИИГ выполнял постоянное научно-техническое сопровождение строительства только до 1994 г., затем из-за отсутствия финансирования сопровождение было прекращено, на постоянной основе сопровождение строительства диафрагмы ВНИИГ снова начал осуществляться с 2006 г. С этого времени совместными усилиями ВНИИГ, института “Гидропроект”, “Организатора строительства Богучанской ГЭС” были разработаны новые технические условия на возведение диафрагмы, разработан новый состав литого асфальтобетона, изменены технологии транспортировки и укладки асфальтобетона, модернизирован асфальтобетонный завод (АБЗ), уточнен контроль качества производства работ, оперативно совместно решены все возникшие проблемы и т.д. На разных этапах строительства диафрагмы исследования и научно-техническое сопровождение осуществляли Ю. Н. Касаткин, Г. В. Борисов, Е. И. Кузнецов, Ю. Н. Ногинов, Ю. В. Романов, В. В. Успенский, А. Н. Дымант, Т. К. Шныренкова.

В течение зимы 2007 – 2008 гг. на АБЗ были осуществлены некоторые предложения ВНИИГ для обеспечения бесперебойной работы АБЗ при отрицательных температурах воздуха. Была нормирована различная температура выпускаемой асфальтобетонной смеси для различных температурных диапазонов окружающего воздуха. Для транспортировки смеси при низких температурах воздуха по предложению ВНИИГ с 2007 г. начали применять специальные асфальтовозы с теплоизолированной ёмкостью и возможностью подогрева смеси, выгрузка смеси из асфальтовозов производится непосредственно в опалубку. Нормирован объем заливаемого блока диафрагмы в зависимости от температуры окружающего воздуха. Эта норма является технологической, так как при непрерывной заливке асфальтобетона перегородка после заливки следующего блока удаляется, происходит омоноличивание асфальтобетона до степени, когда невозможно определить место вертикального шва, и таким образом объем, длина блока при непрерывной заливке может быть любой, вплоть до всей длины диафрагмы. Уход за залитыми блоками диафрагмы

в зимнее время заключается в их утеплении полотнищами и отсыпкой грунта переходного слоя.

В результате в 2008 г. на строительстве Богучанской ГЭС за неполных восемь месяцев было уложено в диафрагму более 29 600 м³ асфальтобетона при максимальной месячной производительности 4800 м³ [12] (рис. 4 – 6). При этом на Богучанской ГЭС обеспечивается требуемое качество асфальтобетона диафрагмы, что подтверждается, в частности, независимым контролем ВНИИГ, осуществляющим исследования выбуренных из диафрагмы кернов.

Из опыта строительства литых асфальтобетонных диафрагм плотин в Запорожье, Хадита, Ирганайской и Богучанской ГЭС могут быть сделаны следующие выводы. Технология возведения литых асфальтобетонных диафрагм грунтовых плотин высокопроизводительна. При строительстве диафрагмы максимальный объем залитого асфальтобетона в месяц достигал 4800 м³, за год — 29 600 м³. Общий объем диафрагм с литым асфальтобетоном этих четырех плотин составил более 300 000 м³. Работы по возведению литых асфальтобетонных диафрагм возможны в районах с различными климатическими условиями. Температура окружающего воздуха ниже 0 °С и осадки не являются препятствием для возведения литой асфальтобетонной диафрагмы с необходимым качеством. Самая низкая температура, при которой велись работы, — минус 35,8 °С (на крупномасштабном фрагменте минус 38,2 °С). При осуществлении необходимых мероприятий возможна стабильная работа по возведению литой асфальтобетонной диафрагмы при температуре окружающего воздуха до минус 40,0 – 45,0 °С. Опыт эксплуатации плотин с литыми асфальтобетонными диафрагмами показал их водонепроницаемость и эксплуатационную надежность. Полное взаимопонимание сотрудников ВНИИГ, проектировщиков и строителей позволяло успешно решать любые проблемы, возникающие при строительстве литых диафрагм.

Опыт строительства КНП Богучанской ГЭС подтвердил правомерность названия грунтовых плотин с литой асфальтобетонной диафрагмой — “плотины сибирского типа”. Они должны быть шире востребованы проектной и строительной практикой, особенно для районов с суровыми климатическими условиями.

Стометровая грунтовая плотина Ирганайской ГЭС является самой высокой из построенных плотин с литой асфальтобетонной диафрагмой. Проведенные во ВНИИГ предварительные расчеты длительных деформаций диафрагмы из литого асфальтобетона в теле каменнонабросной плотины (КНП) высотой 233 м [13] показывают, что при выполнении необходимых научно-исследовательских и про-



Рис. 4. Общий вид на строительство литой асфальтобетонной диафрагмы каменнонабросной плотины Богучанской ГЭС



Рис. 6. Вид яруса литой асфальтобетонной диафрагмы плотины Богучанской ГЭС с частично снятой металлической опалубкой



Рис. 5. Заливка асфальтобетона в металлическую опалубку на строительстве диафрагмы каменнонабросной плотины Богучанской ГЭС

ектных работ возможны возведение и надежная эксплуатация “плотин сибирского типа” высотой более 230 м. Был рассмотрен вариант КНП с вертикальной диафрагмой, расположенной на скальном основании. Толщина диафрагмы на гребне плотины составляла 0,5 м, а у сопряжения с основанием — 2,4 м. Ширина плотины по гребню 15,0 м, длина по гребню 965,8 м. Заложение верхового откоса 1,8, низового — 1,5. Устойчивость откосов упорных призм плотины обеспечивалась при проектной плотности каменной наброски $\gamma_{ск} = 2,05 \text{ т/м}^3$ и угле внутреннего трения $\varphi = 40^\circ$. Предполагалось, что для возведения плотины до высоты 61,3 м потребуется два года, через следующие два года высота плотины составит 143 м, для возведения плотины до проектной высоты 233 м — еще 3,5 года.

В процессе работы была апробирована программа “Abaqus” для проведения сложных расчетов МКЭ НДС литой асфальтобетонной диафрагмы высокой каменнонабросной плотины с учетом последовательности ее возведения, пластичности и

ползучести материалов. Полученные значения напряжений, а также оседания и растекания диафрагмы такой 233-метровой каменнонабросной плотины после завершения строительства, после заполнения водохранилища и через столетний период эксплуатации не превосходили допустимые пределы.

Соответственно, например, если выполнять 233-метровую плотину Канкунской ГЭС в бетонном варианте, то потребуется 15 – 20 лет для ее строительства и она будет значительно дороже, чем каменнонабросная плотина с литой асфальтобетонной диафрагмой, которая может быть возведена за 6 лет.

Таким образом, опыт проектирования и строительства, рекогносцировочные исследования и первичные расчеты показывают, что применение диафрагм из литого асфальтобетона в качестве противофильтрационных конструкций в грунтовых плотинах Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера высотой до 240 м будет экономичным, эффективным и надёжным решением по сравнению с бетонными и грунтовыми плотинами с грунтовыми и железобетонными или бетонными противофильтрационными устройствами.

Список литературы

1. Глебов П. Д. Применение битумов в гидротехническом строительстве / ОПНТИ. 1937.
2. Ван Асбек В. Ф. Применение битумов в гидротехническом строительстве. — Л.: Энергия, 1975.
3. Кудояров Л. И., Попченко С. Н. Современные перспективы развития гидроэнергетики и задачи в области разработки и использования новых строительных материалов // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике: Применение полимерных материалов в гидротехническом строительстве / ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1980.
4. Кудояров Л. И., Попченко С. Н. Пути совершенствования гидроизоляционных работ в сложных климатических условиях // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике: Технология и механизация гидроизоляционных работ промышленных, гражданских и энергетических сооружений / ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1983.

5. *Щавелев Н. Ф., Таилов Т. Ю.* О проектировании и расчете диафрагм из асфальтобетона в грунтовых плотинах // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1982. Т. 157. С. 22 – 30.
6. *Давиденко В. М., Давиденко Г. А.* Исследование напряженно-деформированного состояния асфальтобетонной диафрагмы грунтовых плотин при статических нагрузках // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1982. Т. 157. С. 30 – 33.
7. *Таилов Т. Ю.* Самозалечивание фильтрующих трещин в асфальтобетонной диафрагме // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1982. Т. 157. С. 14 – 18.
8. *Павич М. П., Пахомов О. А.* Экспериментальное обоснование предельно плотных смесей грунтов // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1976. Т. 111. С. 3 – 10.
9. *Касаткина Д. Н.* Особенности подбора составов асфальтобетонов для диафрагм грунтовых плотин // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1982. Т. 157. С. 9 – 14.
10. *Успенский В. В., Ногонов Ю. Н.* Обоснование технологии возведения асфальтобетонной диафрагмы траншейным способом на строительстве гидроузла Хадита // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1988. Т. 211. С. 31 – 36.
11. *Прокопович В. С., Созинова Т. А.* Расчеты напряженно-деформированного состояния диафрагмы из литого асфальтобетона в теле плотины Ирганайской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2009. Т. 254. С. 52 – 58.
12. *Беллендир Е. Н., Упоров В. А., Хабибуллин И. И., Дымант А. Н., Кузнецов Е. И., Успенский В. В., Шкедов П. В., Бондаренко О. Н.* Опыт возведения литой асфальтобетонной диафрагмы каменнонабросной плотины Богучанской ГЭС на пусковую отметку 196,0 м // Пятая научно-техническая конференция “Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии” / ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2011.
13. *Прокопович В. С., Новикова Н. И.* Методы расчета статической стабильности диафрагмы из литого асфальтобетона в теле каменно-набросной плотины // Пятая научно-техническая конференция “Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии” / ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2011.

Научные аспекты гидротехники Крайнего Севера

Панов С. И., доктор техн. наук,
Кривоногова Н. Ф., кандидат геол.-минер. наук
(ОАО "ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева")

Приведены сведения об участии ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева в решении вопросов научного обоснования проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений в районах Крайнего Севера. Рассмотрены основные особенности изменений технического состояния высоких каменно-земляных плотин и условия обеспечения их безопасности при длительной эксплуатации в этих районах.

Ключевые слова: гидротехническое строительство, Крайний Север, каменно-земляные плотины, научное обоснование проектирования, строительства и эксплуатации

Во второй половине прошлого века одним из наиболее перспективных направлений развития гидротехнического строительства в нашей стране стало освоение северных районов Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера, получивших название "северная строительно-климатическая зона" (ССКЗ). Реки в этой части страны обладают колоссальными запасами гидроэнергии, практически не освоенной к тому времени, что открывало перспективу строительства на них крупнейших в стране и в мире гидроэлектростанций.

Вместе с тем для ССКЗ характерны очень суровые климатические условия: низкие отрицательные среднегодовые температуры воздуха, наличие многолетнемерзлых пород оснований, короткий летний и продолжительный зимний периоды года, очень неравномерное распределение стока и т.п. Названные особенности поставили перед проектировщиками ГЭС целый ряд задач, ранее не встречавшихся в практике гидротехнического строительства. Для решения этих задач были привлечены основные отечественные НИИ строительного профиля, в их числе и ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. В формулировке главных направлений гидротехнического освоения ССКЗ и в выборе возможных путей решения этой задачи приняли участие такие известные ученые ВНИИГ, как Б. В. Проскуряков, П. Д. Евдокимов, Н. Н. Петруничев, Ц. Г. Гинзбург, Г. С. Шадрин, Ш. Н. Плят, М. П. Павлич и др. [1].

В связи с большой географической удаленностью мест строительства будущих гидростанций в 1960 г. в г. Красноярске был создан Сибирский филиал ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Основной задачей, поставленной перед филиалом, было научное обоснование проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений ГЭС и ТЭЦ, возводимых в условиях Сибири и Крайнего Севера. Для организации этой работы из ВНИИГ в Сибирский филиал были командированы молодые, но уже состоявшиеся научные работники Н. Ф. Щавелев, Д. Д. Сапегин, В. Е. Ляпин, Г. А. Морозов и Б. Н. Орлов. Под их руководством

были созданы пять лабораторий: оснований и земляных сооружений, гидравлики, гидротехнических конструкций и материалов, ледотермики, гидроизоляции и защиты от коррозии, оснащенных современной по тем временам лабораторной базой. Для работы в этих научных подразделениях были приглашены молодые инженеры-гидротехники, уже получившие опыт практической работы на строительных площадках Иркутской, Новосибирской, Братской, Красноярской, Усть-Илимской ГЭС и других гидротехнических объектов Сибири.

В те годы совместными усилиями ученых головного ВНИИГ и его Сибирского филиала было организовано решение проблем северной гидротехники в следующих направлениях:

теоретические и экспериментальные исследования инженерно-геологических и геокриологических особенностей многолетнемерзлых оснований гидротехнических сооружений, а также исследования по геофизической диагностике их состояния и строительных свойств (А. М. Гуреев, Н. Ф. Кривоногова, О. К. Воронков);

экспериментальные исследования по определению в лабораторных и полевых условиях характеристик прочности и деформируемости таломерзлых скальных пород, крупнообломочных и глинистых грунтов (П. Д. Евдокимов, Д. Д. Сапегин, С. И. Панов, Н. А. Елисеев, Н. М. Карпов, Г. Г. Баясников, В. Н. Беньков и др.);

экспериментальные, натурные и расчетные исследования температурно-влажностного режима плотин из местных материалов, возводимых в районах Крайнего Севера (Н. Н. Петруничев, Г. С. Шадрин, Ш. Н. Плят, Е. А. Смирнов, В. М. Придорогин, Г. И. Кузнецов, Н. А. Мухетдинов, И. А. Максимов и др.);

экспериментальные, натурные и расчетные исследования термонапряженного состояния бетонных плотин в условиях Севера (Ц. Г. Гинзбург, В. М. Матюшин, А. П. Епифанов, Л. М. Гаркун, С. Н. Старшинов, Л. И. Маркин, В. И. Сильницкий и др.);

исследования фильтрации в таломерзлых грунтовых плотинах и основаниях гидросооружений на Севере, а также методов закрепления этих грунтов (А. Н. Адамович, О. Н. Носова, А. С. Смирнов, К. Г. Юшкова, В. В. Тетельмин и др.);

исследования новых гидроизоляционных материалов для гидротехнических сооружений на Севере (В. Н. Попченко, Н. Ф. Щавелев, Б. Н. Орлов и др.);

исследования гидравлических процессов, особенностей пропуска больших строительных расходов и льда, а также процессов местных размывов оснований за водосбросами (А. П. Войнович, Г. Л. Рубинштейн, В. Е. Ляпин, А. Г. Соловьева, В. М. Доненберг, К. Ю. Нечаенко и др.);

исследования ледовых воздействий на речные гидротехнические сооружения на Севере (Б. В. Проскураков, В. И. Синотин, Г. А. Морозов, Е. А. Разговорова, В. А. Кореньков и др.).

Результаты этих исследований оперативно внедрялись на строительных площадках северных ГЭС: Вилуйской 1 – 2, Усть-Хантайской, Курейской, Колымской, Мамаканской, Вилуйской 3, а также при разработке проектов Усть-Среднеканской, Тельмамской, Амгуэмской, Туруханской и других ГЭС [2].

В дальнейшем опыт северной гидротехники показал, что весьма сложными и разносторонними являются проблемы научного обоснования проектирования строительства и эксплуатации в ССКЗ грунтовых гидротехнических сооружений, наиболее чувствительных к влиянию суровых климатических условий. В связи с этим для каждого из таких сооружений необходимо было решать целый комплекс специальных проблем, таких как:

оценка возможности использования пород в створе проектируемого гидросооружения в качестве надежного основания, в том числе прогноз изменений их температурного состояния, фильтрационной проницаемости и несущей способности в мерзлом состоянии и после оттаивания;

выбор компоновки гидроузла, типа и конструкции плотин, наиболее приспособленных к условиям ССКЗ;

оценка изменений температурного состояния и фильтрации через тело плотины после завершения строительства и в процессе длительной эксплуатации;

определение расчетных значений физико-механических характеристик грунтов тела плотины и оценка их изменений в зависимости от температурно-влажностного состояния;

оценка изменений напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости элементов тела плотины;

создание систем постоянного мониторинга состояния плотин и их оснований.

С учетом результатов решения этих, как правило, нестационарных задач могут быть определены обоснованные критерии безопасности гидротехнического сооружения при длительной его эксплуатации на Севере.

В оценке несущей способности многолетне-мерзлых грунтов, используемых в качестве оснований гидротехнических сооружений эффективным оказался комплексный подход, включающий сейсмоакустические, электрометрические и другие методы геофизических исследований [3]. Такой подход позволяет создавать прогнозные модели изменения во времени фильтрационных, деформационных и прочностных свойств пород оснований в процессе эксплуатации размещенных на них сооружений. При этом возможна оценка поведения в эксплуатации оснований и возводимых на них плотин даже при очень малом количестве стационарной контрольно-измерительной аппаратуры по разовым и дискретным наблюдениям, проводимым комплексом методов электрометрии.

Результаты геофизических исследований позволили разработать инженерно-геокриологические модели оснований сооружений ряда гидроузлов, выполнить оценку неоднородности оснований по геокриологическим параметрам, физико-механическим, фильтрационным, теплофизическим свойствам грунтов в мерзлом состоянии и при оттаивании в массивах.

В последние 15 – 20 лет во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева ведутся исследования по инженерно-геокриологическому мониторингу оснований и грунтовых плотин, расположенных на Крайнем Севере атомных и тепловых электростанций

Согласно СНиП 2.06.05-84* [4] земляные насыпные плотины в ССКЗ подразделяют на два основных типа: мерзлые и талые. К мерзлому типу относятся плотины, имеющие в теле и основании противофильтрационные элементы, которые находятся в мерзлом состоянии в течение всего периода эксплуатации. С этой целью в противофильтрационных элементах устраиваются водонепроницаемые завесы, мерзлое состояние которых обеспечивается за счет специальных, как правило, сезонно действующих охлаждающих устройств (СОУ).

Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования работоспособности трубчатых СОУ различных типов (воздушных, жидкостных и паровоздушных) глубиной до 100 м были успешно проведены с участием ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева и его Сибирского филиала на специально созданном для этой цели опытном полигоне (рис. 1) участка плотины Вилуйской ГЭС-3 [5].

Известно, что у нас в стране в ССКЗ было построено несколько сот плотин мерзлого типа [6]. Все они в той или иной мере подвержены деформации

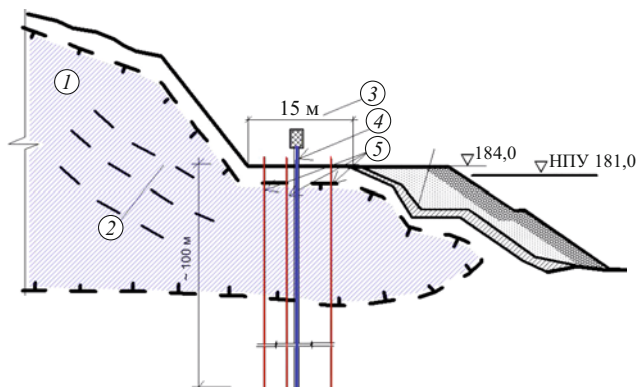


Рис. 1. Конструктивная схема опытного полигона на строительной площадке Вилуйской ГЭС-3:

1 — многолетнемерзлый береговой склон; 2 — слои мерзлых пород; 3 — площадка полигона; 4 — трубчатые СОУ; 5 — термометрические скважины

циям, нарушающим условия нормальной эксплуатации. Результаты анализа состояния и работы этих сооружений свидетельствуют, что около 50 % их отказов произошло из-за нарушений температурного режима и противофильтрационной сплошности мерзлотных завес в местах их сопряжений с многолетнемерзлыми основаниями (рис. 2).

По статистическим данным надежность плотин мерзлого типа, построенных в России, существенно ниже нормативных значений [7]. По этой причине в настоящее время плотины мерзлого типа применяются в основном в промышленной гидротехнике и на низконапорных гидроузлах.

Опыт гидротехнического строительства свидетельствует, что на высоконапорных гидроузлах в условиях ССКЗ более предпочтительны каменно-земляные плотины [8]. В северных районах нашей страны подобные плотины были построены в составе Усть-Хантайской, Вилуйских 1 – 3, Серебрянских 1 – 2, Колымской и других ГЭС. Эти сооружения безаварийно эксплуатируются вот уже 30 – 40 лет и более [9].

В отечественной практике гидротехнического строительства широкое распространение получили каменно-земляные плотины с экранами и ядрами. Конструктивные особенности плотин этих двух типов определяют различия в их температурно-фильтрационном режиме и деформационном поведении.

Плотины с грунтовым экраном. К моменту окончания строительства низовые упорные призмы таких плотин, как правило, оказываются частично или даже полностью замороженными (рис. 3). Климатические условия и длительные сроки строительства обуславливают постепенное увеличение количества льда в порах каменной наброски [10].

После наполнения водохранилища частично замороженный грунтовой экран быстро и практически полностью оттаивает. В этот период наблю-



Рис. 2. Грунтовая плотина мерзлого типа на р. Ирелях (г. Мирный, Якутия). Аварийная ситуация, связанная с отказом мерзлотной завесы

дается интенсивный рост осадок и горизонтальных смещений гребня и берм низового откоса. Ежегодные приращения осадок и смещений гребня достигают максимальных значений через 3 – 5 лет эксплуатации сооружения, после чего их величина постепенно убывает [11].

После оттаивания подэкранный части упорной призмы интенсивность изменений температурного состояния плотины снижается и через 10 – 15 лет эксплуатации местоположение нулевой изотермы в центральной части сооружения практически стабилизируется. Это отражается и на затухании приращений осадок гребня, которые уменьшаются до величин, соответствующих нормальным процессам реологического деформирования грунтового сооружения.

Вместе с тем динамически равновесное температурно-деформационное состояние таких плотин может резко нарушаться при изменении внешних условий, в частности при изменениях уровня и температурного режимов нижнего бьефа. Так, даже кратковременные изменения режима нижнего бьефа каменно-земляной плотины Вилуйской ГЭС 1 – 2 в 1978 и 1989 гг. приводили к изменениям температуры низовой призмы и увеличению значений годово-

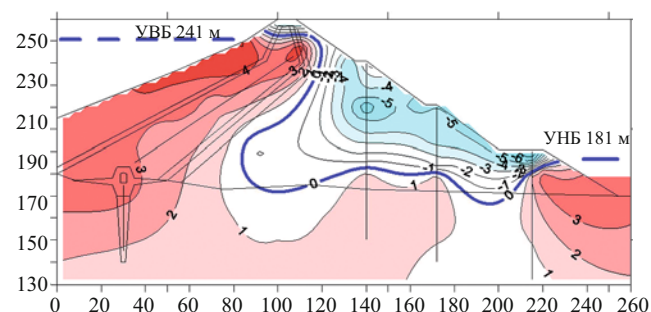


Рис. 3. Среднегодовые значения температуры грунтов тела плотины Вилуйской ГЭС 1 – 2

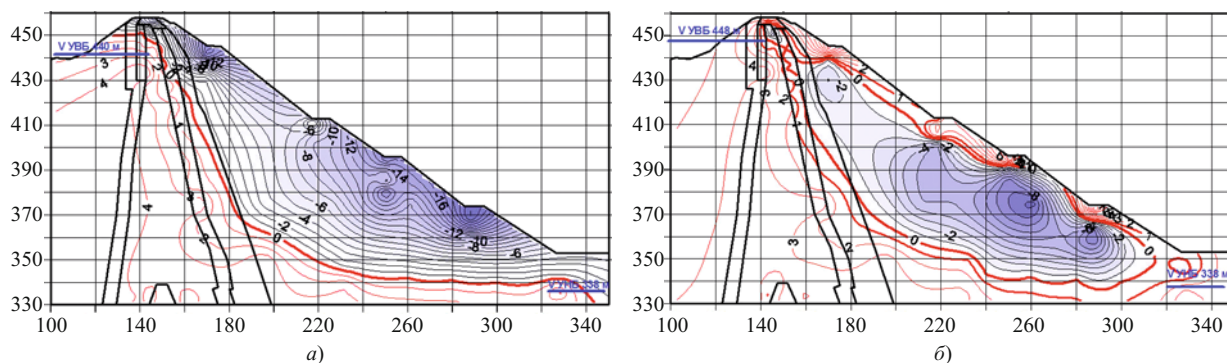


Рис. 4. Современное температурное состояние плотины Колымской ГЭС:

а — в конце зимы; б — в конце лета

вых приращений осадок и горизонтальных смещений гребня плотины в несколько раз [11].

Плотины с центральным грунтовым ядром. К окончанию строительства верховые и низовые призмы таких плотин также практически полностью промораживаются. Осадки этих элементов в строительный период не превышают 1 – 2 % от высоты насыпи [9].

Наполнение водохранилища вызывает интенсивное оттаивание и доуплотнение горной массы в верховой призме. При этом ее гребень претерпевает значительные осадки и горизонтальные смещения в сторону верхнего бьефа, достигающие 50 % от максимального значения осадок [12]. Это создает условия для интенсивного образования трещин не только в самой верховой призме, но и в ядре плотины. Степень опасности этих процессов для всего сооружения существенно уменьшается при снижении скорости наполнения водохранилища. Следует отметить, что описанные деформации приурочены к строительно-эксплуатационному периоду, когда наличие на площадке строительной техники позволяет их ликвидировать, без существенных последствий для дальнейшей эксплуатации сооружения.

В эксплуатационный период после оттаивания ядра (если оно было заморожено во время строительства) нулевая изотерма через 10 – 12 лет занимает практически стабильное положение в низовой призме (рис. 4). При достаточной толщине низовой переходной зоны образовавшаяся в плотине мерзлота не создает серьезных препятствий для разгрузки фильтрации через ядро.

После стабилизации температурного состояния годовые приращения осадок и горизонтальных смещений элементов плотины существенно уменьшаются, но имеют при этом весьма слабое затухание во времени [13].

При организации натурных наблюдений и назначении критериев безопасности каменно-земляных плотинах на Севере следует иметь в виду, что сроки наступления полной стабилизации темпера-

турно-деформационных процессов в таких плотинах, как правило, сопоставимы с расчетными сроками их эксплуатации.

Выводы

1. Более чем полувековой опыт северной гидротехники позволяет считать, что каменно-земляные плотины, запроектированные с учетом особенностей их температурного состояния, фильтрационного режима и деформационного поведения, являются наиболее приспособленными к суровым природно-климатическим условиям Севера. Уникальный опыт длительной безаварийной эксплуатации таких плотин на перечисленных выше гидростанциях должен быть учтен при проектировании и строительстве аналогичных плотин на Северо-Востоке страны, в частности в составе Южно-Якутского гидроэнергетического комплекса.

2. Успешное строительство и безаварийная эксплуатация каменно-земляных плотин в ССКЗ невозможны без полноценного научного обоснования их проектов [14]. При выборе конструктивных решений гидротехнических сооружений должны использоваться:

результаты комплексных геофизических и геокриологических исследований многолетнемерзлых оснований [15];

результаты экспериментальных исследований теплофизических, фильтрационных и физико-механических свойств каменной наброски при низких отрицательных температурах и различной степени заполнения льдом ее пор [16];

результаты расчетных исследований нестационарных процессов фильтрации и тепломассопереноса в теле каменно-земляных плотин [17];

результаты расчетных исследований напряжений и деформаций, прочности и устойчивости подобных плотин в условиях сезонных изменений их температурного состояния и гидростатической нагрузки [18].

Список литературы

1. *История* ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева (1921 – 1981 гг.) // Известия ВНИИГ. 1996. Т. 229.
2. *Кудояров Л. И., Павлич М. П., Радченко В. Г.* и др. Плотины из грунтовых материалов в районах Крайнего Севера и вечной мерзлоты. — Л.: ВНИИГ, 1973.
3. *Воронков О. К.* Инженерная сейсмика в криолитозоне. — СПб., 2009.
4. *Панов С. И., Максимов И. А., Цвик А. М., Толошинов А. В.* Исследования работоспособности сезонно действующих охлаждающих устройств // Гидротехническое строительство. 2002. № 1.
5. *СНиП 2.06.05-84**. Плотины из грунтовых материалов. М., 1991.
6. *Чжан Р. В.* Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений низкого напора в криолитозоне. — Якутск: ИМЗ СО РАН, 2000.
7. *СНиП 33-01-2003.* Гидротехнические сооружения. Основные положения. М., 2004.
8. *Бянов Г. Ф.* Плотины на вечной мерзлоте. — М.: Энергоиздат, 1983.
9. *Когодовский О. А., Фриштер Ю. И.* Гидроэнергетика Крайнего Северо-Востока. — Энергоатомиздат, 1996.
10. *Мухетдинов Н. А., Окружнов С. В., Бурлаков В. М.* Динамика температурно-влажностного режима каменно-земляной плотины Вилюйской ГЭС 1–2 в эксплуатационный период // Энергетическое строительство. 1999. № 10.
11. *Панов С. И., Толошинов А. В.* Особенности деформационного поведения каменно-земляной плотины при длительной эксплуатации на Севере // Известия Вузов. Строительство. 2003. № 10.
12. *Панов С. И., Мызников Ю. Н.* и др. Начальный период эксплуатации русловой плотины Курейской ГЭС // Гидротехническое строительство. 1989. № 10.
13. *Панов С. И., Толошинов А. В., Цвик А. М., Воронин С. М., Николаев Ю. М.* Особенности температурно-деформационного поведения каменно-земляных плотин при их длительной эксплуатации в условиях Севера // Гидротехническое строительство. 2007. № 5.
14. *Инструкция* по проектированию гидротехнических сооружений в районах распространения вечномерзлых грунтов: ВСН 30-83 / ВНИИГ. 1983.
15. *Рекомендации* по инженерно-геологическому изучению скальных пород как оснований гидротехнических сооружений: П 58 – 91 / ВНИИГ. 1991.
16. *Каган А. А., Кривоногова Н. Ф.* Многолетнемерзлые скальные основания сооружений. — Л.: СИ, 1978.
17. *Рекомендации* по расчетам температурного режима плотин из грунтовых материалов, возводимых в северной строительной-климатической зоне. — Л.: ВНИИГ, 1985.
18. *Панов С. И., Веселов А. Б.* Деформации и трещиностойкость каменно-земляных плотин с элементами, теряющими жесткость // Известия ВНИИГ. 2011. Т. 261.

Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния бетонных железобетонных конструкций энергетических сооружений

Храпков А. А., доктор техн. наук,

Цейтлин Б. В., кандидат техн. наук,

Скворцова А. Е., инженер (ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”)

Освещаются исследования ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” в области расчетного определения напряженно-деформированного состояния инженерных конструкций. Рассматривается история развития указанных исследований с момента возникновения института до наших дней. На примерах последних работ, выполненных во ВНИИГ, демонстрируется современный уровень обоснования прочности бетонных и железобетонных сооружений энергетического назначения с использованием математических моделей.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, теория упругости, механика разрушения, вычислительная техника, математическое моделирование.

Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) сооружений или их конструктивных элементов является важнейшим этапом выполнения проектных работ, поскольку с определением параметров НДС непосредственно связаны вопросы прочности и работоспособности сооружений.

До появления ЭВМ одним из основных средств определения НДС являлись аналитические методы решения различных задач теории упругости и строительной механики. В этом направлении во ВНИИГ работали выдающиеся ученые-механики. Работы сотрудника института академика Б. Г. Галеркина, в которых заложены основы ныне широко распространенного в связи с использованием ЭВМ метода Бубнова — Галеркина, опередили свое время. С. Г. Гутман является автором фундаментальных работ по построению общих решений задачи упругости по обоснованию оптического метода исследования напряжений.

На начальной стадии развития вычислительной техники ЭВМ использовались для реализации решений, полученных аналитическими методами. Полученное в работах А. А. Храпкова решение для плоского тела произвольной формы, работающего совместно с полуплоскостью из упругого материала, стало рабочим аппаратом для дальнейших исследований, освещающих взаимодействие бетонных гравитационных плотин с упругим основанием. Этим же автором совместно с Г. С. Гейнац был рассмотрен ряд вспомогательных задач теории упругости, встретившихся при анализе воздействий на систему “сооружение — основание” таких факторов, как объемные фильтрационные силы, стационарные температурные поля, предварительное напряжение бетонной кладки. Б. М. Нуллер и его ученики В. Б. Глаговский, М. Б. Рывкин, И. И. Шехтман получили решения для большого количества контактных задач теории упругости, механики хрупкого разрушения, теории тел, обла-

дающих свойствами симметрии, теории резания материалов. В работах Л. П. Трапезникова построены функции влияния для оценки термонапряженного состояния бетонных массивов. Им же совместно с Т. Н. Рукавишниковой предложен метод конечных полос, позволивший дать численные решения задач о термонапряженном состоянии растущих бетонных массивов. Я. Г. Скоморовским рассмотрены задачи об упругом равновесии напорных перекрытий многоарочных бетонных плотин, в том числе с учетом ползучести.

По мере совершенствования вычислительной техники на первый план выступили работы, в которых универсальные вариационные постановки задач строительной механики и теории упругости использовались применительно к решению задач для тел произвольной геометрии с произвольным же распределением упругих констант по объему тела. Наиболее видными представителями этого направления прочностных исследований стали А. В. Вовкушевский, Л. А. Гордон, В. Г. Корнеев, Б. А. Шойхет, Л. В. Корсакова. В работах В. Г. Корнеева даны доказательства сходимости решений, полученных вариационно-разностными методами. Труды Л. А. Гордона посвящены решению задач упругого равновесия для плит и оболочек. В написанной им совместно с Л. А. Розиным (ЛПИ им. М. И. Калинина) статье дается вывод уравнения упругого равновесия оболочки средней толщины с применением принципа Кастильяно. Б. А. Шойхетом совместно с А. В. Вовкушевским были выполнены пионерные исследования по разработке методов определения НДС для тел с идеальными односторонними связями применительно к расчету различного рода конструкций, разделенных строительными и деформационными швами, в том числе при наличии штрабления швов. Им же продолжена разработка вопросов, связанных с решением задач об упругом равновесии тел, имеющих различного рода не-

сплошности, в том числе разрезы и трещины. Существенным достижением этого автора явилось построение вычислительных алгоритмов для задач о взаимодействии плотины с основанием при наличии раскрывающегося контактного шва. Л. В. Корсакова совместно с Л. Е. Коганом разработала способы расчета арочных плотин при наличии швов и трещин у напорной и низовой граней арочной плотины.

Ряд пионерных работ теоретического направления выполнил также Л. П. Трапезников, которому принадлежат обобщения энергетического критерия Гриффитса и силового критерия Ирвина для бетона и других стареющих материалов, обладающих свойством ползучести. Им же совместно с Б. А. Шойхетом сформулированы и доказаны теоремы, позволяющие выразить решение задачи теории ползучести стареющих сред для областей с развивающимися трещинами (разрезами) через решения упругомгновенных задач. На основе натуральных данных, результатов испытаний крупномасштабных образцов и представлений механики разрушения Л. П. Трапезников разработал модель разрушения бетона при растяжении, которая учитывает ползучесть, структуру материала, описывает развитие зоны предразрушения, образование макротрещины и ее кинетику. В этой модели автор сформулировал новый критерий температурной трещиностойкости бетона и кинетики температурных трещин в массивных бетонных конструкциях, который принят в качестве основного в СНиП 2.06.08-87 "Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений". Работы Л. П. Трапезникова в области механики разрушения бетона обобщены в [1].

Разработанные во ВНИИГ модели и критерии, основанные на методах механики разрушения, использовались при решении различных практических задач, возникших в связи со строительством плотин Саяно-Шушенской, Бурейской и других ГЭС, плотины Капанда в Африке, фундаментов турбоагрегатов Запорожской, Хмельницкой, Южно-Украинской, Балаковской, Ростовской, Ровенской АЭС, Костромской ГРЭС и других сооружений.

Началом работ института, относящихся непосредственно к сейсмостойкости гидротехнических сооружений, стали исследования С. Г. Шульмана по определению частот собственных колебаний массивных плотин. Автор, опираясь на предшествующие исследования П. П. Кульмача (ВВИТКУ) и используя метод Галеркина, нашел в виде полиномов формы изгибных и сдвиговых колебаний плотины треугольного профиля, а также разрешающее частотное уравнение для определения первой частоты собственных колебаний сооружения совмест-

но с водной средой. В эти же годы во ВНИИГ подобные работы выполнялись И. С. Шейниным, уделявшим большое внимание учету влияния вязкости и сжимаемости жидкости на характер ее взаимодействия с упругим телом, в частности на срезку пиков, характеризующих гидродинамическое давление при частотах колебаний, близких к резонансным. Л. А. Эйслером проводились исследования по построению модели поведения водонасыщенного грунта при динамических воздействиях, а Н. В. Красниковым выполнялись натурные эксперименты по изучению динамики грунтовых масс с помощью регистрации кинематических параметров при взрывных воздействиях. Исследования, которые были начаты в начале 1960-х гг., получили свое развитие после организации в институте лаборатории динамики сооружений. Одним из первых направлений исследований было теоретическое изучение влияния присоединенной массы жидкости на колебания строительных конструкций, находящихся в воде. Общим методом анализа в этом случае было получение решений без введения упрощающих предпосылок и исследование зависимости результатов от соответствующих параметров. В работах И. С. Шейнина и его учеников проанализированы и даны решения ряда задач и выполнена оценка применяемых в гидроупругости допущений. С. Г. Шульманом исследованы роль сжимаемости жидкости и возможность возникновения резонанса при сейсмических воздействиях. С. М. Левиной сформулированы границы применимости гипотезы об идентичности давлений, вызванных колебаниями конструкций на границе с турбулентным потоком.

Исследования по обеспечению сейсмостойкости гидротехнических сооружений существенно ускорились с организацией в 1966 г. отдела сейсмостойкости. Научный руководитель работ О. А. Савинов сочетал в себе такие качества, как хорошая теоретическая подготовка, богатейший инженерный опыт и организаторские способности. В кратчайшие сроки начали проводиться всесоюзные координационные совещания по проблемам сейсмостойкости, были разработаны нормы по проектированию гидротехнических сооружений в сейсмических районах, переизданные затем в 1972 и 1981 гг. Эти нормы впервые предписывали выполнять расчеты на нагрузки от землетрясений с применением линейно-спектральной теории сейсмостойкости (ЛСТ). С целью практической реализации ЛСТ специалистами ВНИИГ были разработаны такие программные комплексы, как "МКЭСТД" (Л. Б. Сапожников, Ю. Н. Ефимов, А. П. Троицкий) и "МОДЕСТ" (С. П. Гордеева).

Изучению взаимодействия массивных сооружений с основанием были посвящены исследования

О. А. Савинова, С. Г. Шульмана, Б. Д. Кауфмана, А. П. Троицкого.

Б. М. Нуллером совместно с сотрудником ФТИ АН СССР А. С. Зильберглейтом было опубликовано исследование, посвященное анализу обобщенной ортогональности однородных решений в динамической задаче упругости, открывающее путь к построению динамических решений для бесконечного слоя.

Новый этап исследований сейсмостойкости энергетических сооружений во ВНИИГ начался во второй половине 1970-х гг. Он был инициирован развертыванием в нашей стране широкого строительства атомных электростанций. В 1980-е гг. в лаборатории строительной механики был разработан ряд алгоритмов и программ для определения напряженно-деформированного состояния конструкций энергетического назначения и нагрузок на оборудование АЭС.

С помощью комплекса “РЕСПЕКТ” (Б. Д. Кауфман) по определению нагрузок на оборудование были построены поэтажные акселерограммы и спектры ответа для АЭС Хурагуа (Куба) и Сирт (Ливия). Программный комплекс “АСТАН” (А. В. Вовкушевский, В. А. Петров) был использован для расчетного обоснования конструкций реакторного отделения АЭС Хурагуа, причем в качестве расчетного воздействия учитывалась, в частности, нагрузка от удара по защитной оболочке падающего самолета (определенная в соответствии с нормами МАГАТЭ). В дальнейшем были выполнены детальные расчеты для реакторного отделения Татарской АЭС, определены нагрузки на оборудование Воронежской АСТ и Белоярской АЭС.

В. И. Велитченко разработал программный комплекс “Нева”, позволяющий выполнять расчеты трубопроводов на статические, динамические и температурные воздействия.

В 1980 – 90-е гг. С. Г. Шульман изучил вероятность ненаступления в сооружениях предельных состояний (определяемых нормативными условиями прочности) при действии нагрузок различного характера, в том числе сейсмических. Эти методы были развиты в работах С. П. Гордеевой, Д. В. Стефанишина, В. С. Пепояна, Н. А. Исаханяна.

Ряд расчетных работ с использованием программного комплекса “ТРИГРАФ-М” (И. В. Иванов, Л. Г. Колтон) был посвящен анализу сейсмостойкости арочных плотин Чиркейской и Миатлинской ГЭС, а также арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Эти задачи решались в линейно-упругой постановке.

Арочная плотина Чиркейской ГЭС схематизировалась оболочкой средней толщины, взаимодействующей с упругим основанием (механические свойства последнего учитывались с помощью мо-

дели Фогта). Расчетная область включала 322 двумерных треугольных элемента, общее число узлов — 189, число степеней свободы — 1134. Оценка напряженно-деформированного состояния плотины выполнялась для двух отметок УВБ: максимальной и минимальной. При этом рассматривались два направления сейсмических колебаний: вдоль и поперек потока, причем использовалась расчетная акселерограмма, рекомендованная институтом “Гидропроект” в 1992 г. Пиковое значение ускорения составило $3,1 \text{ м/с}^2$. По результатам исследований был сделан вывод о том, что арочная плотина Чиркейской ГЭС способна воспринять землетрясение интенсивностью 9 баллов без угрозы для людей, оборудования, окружающей среды с сохранением собственной ремонтпригодности при любом предусмотренном правилами эксплуатации уровне верхнего бьефа.

Применительно к арочно-гравитационной плотине Саяно-Шушенской ГЭС расчеты выполнялись для тех же ситуаций, что и в предыдущем случае. Плотина также схематизировалась оболочкой средней толщины, а для учета основания применялась модель Фогта. Сетка КЭ для плотины состояла из треугольных оболочечных элементов и содержала 168 узлов и 280 элементов. При этом использовался набор из трех горизонтальных расчетных акселерограмм, подготовленный институтом “Гидропроект” в 1994 г. После соответствующего нормирования пиковое значение ускорения составило $2,6 \text{ м/с}^2$. По результатам расчетов был сделан вывод о том, что арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС способна воспринять землетрясение интенсивностью 8 баллов без угрозы для людей, оборудования и окружающей среды.

Следует отметить, что для плотин Чиркейской и Саяно-Шушенской ГЭС в качестве последствий расчетного землетрясения прогнозировалось существенное трещинообразование, а именно раскрытие горизонтальных и межсекционных швов вблизи ключевого сечения при наполненном бьефе. При сработавшем же водохранилище — раскрытие швов у гребня плотины в береговых примыканиях.

Внедрение в мировую практику проектирования гидротехнических сооружений промышленных конечно-элементных комплексов, позволяющих решать задачи механики твердых деформируемых тел в трехмерной стационарной и нестационарной постановках, позволило разработать расчетные модели бетонных и железобетонных конструкций, наиболее полно отражающих работу сооружения. Идентификации расчетных моделей для бетонных плотин посвящены работы С. М. Гинзбург, Н. Я. Шейнкера, А. М. Юделевича, представленные в коллективной монографии [2]. В 90-е гг. прошлого века и в первые годы нашего века в институ-

те получили развитие исследования разнообразных конструкций энергетических сооружений с использованием современных программных комплексов и постепенным усложнением расчетных схем.

Исследования сейсмостойкости основных сооружений Партизанской ГРЭС и Артемовской ТЭС выполнялись в связи с повышением расчетной сейсмичности площадок их расположения до 8 баллов. Была выполнена оценка сеймонапряженного состояния и прочности главных корпусов, эстакад топливоподачи, стальных резервуаров для нефтепродуктов, железобетонных дымовых труб, вытяжных башен градирен и фундаментов турбоагрегатов. Расчеты выполнялись методом конечных элементов по пространственным расчетным схемам с применением программного комплекса "COSMOS/M". Отметим, что использованные конечно-элементные модели были ещё относительно невелики, количество элементов и узлов в расчетных схемах составляло тысячи. Так, расчетная схема главного корпуса Партизанской ГРЭС содержала 2610 элементов и 2848 узлов. Результаты исследования указывали, в частности, на тот факт, что рассмотренные конструкции в ряде случаев не являются сейсмостойкими, а соответствующие проектные решения нуждаются в корректировке [3, 4].

Другая серия исследований связана с оценкой прочности и сейсмостойкости ряда конструкций туннелей и водоводов. Среди них эксплуатационный водосброс и автодорожный туннель под массивом № 65 Ирганайского гидроузла, деривационный туннель Кашхатау ГЭС на р. Черек, входной портал водосброса и турбинный водовод Зарамагской ГЭС-1. Некоторые результаты исследований приведены в [5]. Одним из наиболее заметных результатов здесь стало обоснование сейсмостойкости скального массива № 65 (над водохранилищем Ирганайской ГЭС), ранее предназначенного к съему. Особенности указанных исследований являются модификация сейсмических воздействий с учетом заглубления и рельефа местности, необходимость использования математических моделей с односторонними связями, необходимость определения направлений распространения и типов сейсмических волн, вызывающих наибольшие растягивающие и сжимающие напряжения в характерных элементах конструкции. Рассмотренные математические модели включали 40 000 – 45 000 элементов, 120 000 – 135 000 узлов, 240 000 – 260 000 степеней свободы.

Целью расчетных исследований прочности и трещиностойкости конструкций железобетонных опорных оснований буровых платформ (проекты "Сахалин-1" и "Сахалин-2"), являлась верификация указанных проектов, т.е. проверялось соблюдение авторами содержащихся в российских стандартах требований к проектам. Рассматривались предель-

ные состояния первой и второй групп. Расчеты на статические и сейсмические воздействия выполнялись по пространственным расчетным схемам с учетом взаимодействия с грунтовым основанием и водной средой. При исследовании сейсмостойкости конструкций использовались как линейно-спектральная, так и динамическая теория сейсмостойкости. Полученные результаты указывают на некоторые нарушения условий прочности для ряда фрагментов колонн платформы "ЛУН-А" в сочетаниях нагрузок, включающих давление льда повторяемостью 1 раз в 100 лет. Отмечалась необходимость увеличения толщины стенок и количества рабочей арматуры меридионального направления на наружной и внутренней гранях колонн указанной платформы. В дальнейшем в рассмотренные проекты были внесены соответствующие коррективы. Расчетные схемы рассмотренных конструкций включали 40 000 – 50 000 степеней свободы. Более подробно результаты исследований изложены в [6, 7].

Исследования сейсмостойкости строительных конструкций Саратовской ГЭС выполнялись в связи с повышением расчетной сейсмичности площадки. Были разработаны пространственные КЭ модели секций с вертикальным агрегатом, с горизонтальными агрегатами и левобережной монтажной площадки; выполнены расчеты на общую прочность и устойчивость сооружения, а также на местную прочность конструктивных элементов, участвующих в обеспечении напорного фронта. Учитывались эксплуатационные статические и температурные нагрузки. В качестве особого воздействия рассматривалось максимальное расчетное землетрясение интенсивностью 7 баллов с вероятностью повторения $2 \cdot 10^{-4}$ 1/год.

При построении конечно-элементных моделей для дискретизации трехмерных бетонных конструкций использовались 10-узловые элементы (тетраэдры с промежуточными узлами). Для учета податливости основания использовались двухузловые элементы — пружины. Моделирование присоединенных масс воды выполнялось с использованием одноузловых элементов точечной массы, количество которых соответствует количеству расположенных на границе с жидкостью узлов расчетной схемы сооружения. Расчетная схема секции с вертикальным агрегатом включает 234 711 степеней свободы. Таким образом, параметры математической модели существенно возросли.

Методика и программа исследования устойчивости на сдвиг при совместном действии статических и сейсмических нагрузок, использующие результаты расчетов НДС сооружений, были разработаны во ВНИИГ.

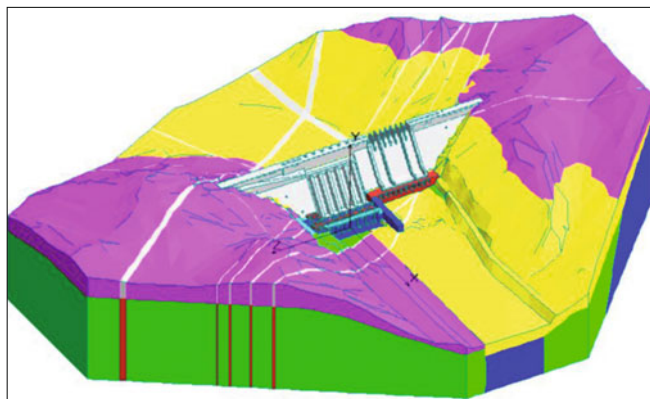


Рис. 1. Математическая модель системы “плотина — здание ГЭС — основание” для Бурейской ГЭС (ПК “COSMOS/M”)

Результаты расчета прочности показали, что строительные конструкции здания ГЭС должны перенести землетрясение с расчетной интенсивностью 7 баллов без существенных повреждений. Результаты проверки устойчивости на сдвиг по подошве сооружения показали, что при основном сочетании нагрузок и воздействий значение коэффициента надежности по устойчивости при сдвиге для всех рассмотренных секций и во всех расчетных случаях существенно больше нормативного. При особом сочетании нагрузок и воздействий, включающем сейсмическое воздействие в 7 баллов, для монтажной площадки значение указанного коэффициента больше нормативного на протяжении всего периода землетрясения (20 с). Для других секций в течение периода землетрясения наблюдаются интервалы времени (длительностью до 0,1 с), когда значение коэффициента надежности по сдвигу меньше 1 и происходит сдвиг секций. Образуются остаточные смещения в пределах от 15 до 39 мм. Для секции с вертикальным агрегатом суммарное время сдвига в эксплуатационном режиме составляет 0,47 с. Полученные значения остаточных смещений относительно невелики и могут быть восприняты уплотнениями межсекционных швов без нарушения работы противодиффузионных устройств.

Исследования прочности и сейсмостойкости строительных конструкций Бурейской ГЭС включали поэтапную разработку детальных пространственных математических моделей скального основания, бетонной гравитационной плотины, здания ГЭС и других бетонных сооружений и разработку методов расчета сложных составных конструкций на сейсмические воздействия [8]. При тестировании и калибровке разработанных моделей соответствующие расчетные схемы модифицировались с целью более полного учета особенностей поведения конструкций. Так, математическая модель скального основания Бурейской ГЭС включает наиболее распространенные инженерно-геологические

элементы, а также наиболее значимые зоны тектонических нарушений. Число степеней свободы в КЭ модели фрагмента скального массива составляет 191 043. Тестирование разработанной математической модели скального основания включало как проверку используемых в дальнейших расчетах импульсных нагрузок, так и анализ реакции основания на характерные статические и динамические нагрузки.

Математическая модель бетонной гравитационной плотины Бурейской ГЭС отражает основные особенности конструкции сооружения, а также механические характеристики материалов плотины. Модель позволяет также учитывать последовательность возведения сооружения и технологию бетонных работ, влияющую на конструкцию сооружения. Примененное в модели выделение межсекционных швов в условно самостоятельные конструктивные элементы сооружения позволяет отразить в расчетах различные состояния этих швов, в том числе степень их раскрытия, проведение цементации и т.д. Модель составлена в двух вариантах. Первый вариант соответствует пусковому комплексу гидроагрегата № 1. Второй вариант модели соответствует полностью возведенному сооружению.

Объединенная математическая модель системы “плотина — здание ГЭС — основание” использовалась при разработке и тестировании методики расчета колебаний системы “сооружение — основание” при прохождении сейсмической волны. При использовании указанной методики искомое решение представляется в виде суммы двух составляющих I и II. При этом I — кинематическая составляющая решения, представляющая собой переносное поступательное движение сооружения с основанием как жесткого целого. Решение II представляет собой совместное упругое движение сооружения и основания, инициированное приложенными в точках сооружения инерционными нагрузками с компонентами $-pa_x(t)$, $-pa_y(t)$, $-pa_z(t)$ и характеризует относительное движение сооружения. В дальнейшем для построения решения II используется суперпозиция сдвинутых во времени откликов на типовые кратковременные импульсные воздействия.

Исследования завершаются разработкой детальной пространственной расчетной КЭ модели основных бетонных сооружений Бурейской ГЭС, включающей плотину, здание ГЭС, монтажную площадку, вставки между плотиной и зданием ГЭС, отдельный устой и скальное основание (рис. 1). Модель состоит из 608 596 объемных четырехузловых тетраэдрических элементов и включает 124 195 узлов. Число степеней свободы 368 860. Средний размер объемных конечных элементов в области основания (вне зон тектонических

нарушений) составляет около 25 м, в теле плотины и здания ГЭС — 5 и 3 м соответственно. Была произведена калибровка расчетной модели по наименьшей частоте собственных колебаний плотины при различных значениях физико-механических характеристик как бетона плотины, так и пород, образующих скальное основание. При выполнении калибровки использованы частотные спектры для записей сейсмических событий, зарегистрированных АССК Бурейской ГЭС в 2008 г. Указанная модель была использована при выполнении анализа прочности бетонной гравитационной плотины при основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий.

После аварии 17 августа 2009 г. на Саяно-Шушенской ГЭС в 2010 г. во ВНИИГ созданы две расчетные модели системы “плотина — основание” СШГЭС и выполнена параметрическая идентификация этих моделей. Модели разработаны в программных комплексах “COSMOS/M” и “ANSYS”. Использование двух программных комплексов позволяет получить более надежные результаты, а также применить различные вычислительные методы для определения глубины распространения трещин.

Для построения математических моделей основания взята в качестве исходной инженерно-геологическая модель основания, разработанная в марте 2010 г. в ЦСГНЭО (филиал ОАО “Институт Гидропроект”). Смоделированы все зоны, которые разработчики инженерно-геологической модели снабдили отдельными физико-механическими характеристиками. Из совокупности трещин, предложенных специалистами ЦСГНЭО, учтены “разломы” IV порядка — три наиболее крупные для участка плотины “главные” тектонические зоны северо-западного простирания.

При моделировании плотины принято реальное (по данным службы мониторинга ГТС СШГЭС) положение контакта бетон — скала, выполнено разделение сооружения на секции и столбы, учтены основные конструктивные элементы, оказывающие влияние на общее напряженное состояние сооружения, в том числе бычки в водосбросной части плотины и водоводы в станционной ее части.

В обеих моделях плотины заложена возможность воспроизведения в расчетах поэтапности ее возведения и нагружения, а также образования и развития разуплотнения на контакте бетон — скала, субгоризонтальных трещин в зоне верховой грани и раскрытия межстолбчатого шва I — II. Для этого тело плотины разделено на зоны, которым присвоены различные типы материала.

Математическая модель системы “плотина — основание”, созданная в программном комплексе “COSMOS/M” версии 2.9, включает 93 912 узлов и

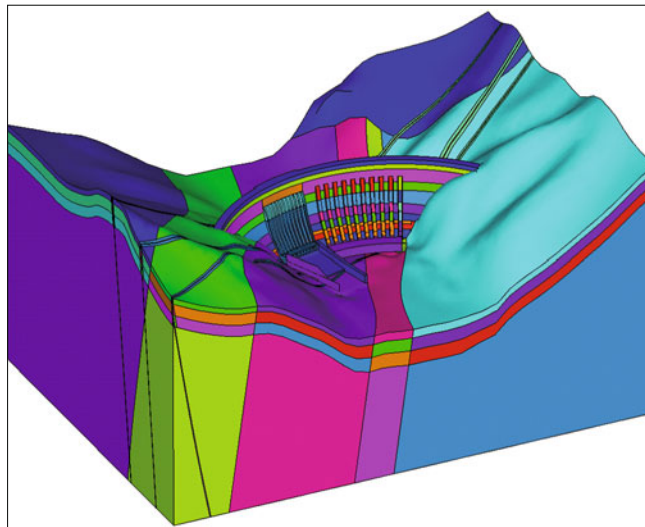


Рис. 2. Математическая модель системы “сооружение — основание” Саяно-Шушенской ГЭС (ПК “ANSYS”)

474 417 четырёхузловых объемных элементов. Число степеней свободы составляет 278 352. Однако, при необходимости, в процессе расчета порядок системы может быть повышен до 2 062 158 степеней свободы путем перевода элементов первого порядка в элементы второго порядка точности с добавлением срединных узлов на ребрах тетраэдрических элементов (mid-side nodes).

Для моделирования трещин в теле плотины намечены тонкие слои элементов, расположенные вдоль строительного шва между первым и вторым столбом плотины, а также вдоль предполагаемых путей развития трещин между отметками 345 — 346,5 м, 399,5 — 401 м, 467 — 468,5 м.

Количество элементов в модели “плотина — основание”, разработанной применительно к ПК “ANSYS” (рис. 2), составляет 242 534, узлов — 96 546, неизвестных — 281 619. При построении сетки КЭ использованы объемные элементы следующих конфигураций: гексаэдр, тетраэдр, клин, пирамида.

На поверхностях предполагаемого развития трещин были созданы разрезы (“двойная нумерация узлов”) и установлены контактные элементы (924 контактные пары типа “поверхность — поверхность”).

Тестирование обеих моделей выполнено по частотам собственных колебаний, а также по приращениям радиальных смещений ряда точек наблюдения на протяжении годового цикла наполнения и опорожнения водохранилища с учётом влияния на напряжённо-деформированное состояние сооружения сезонных колебаний температур.

На рис. 3 показаны хронограммы измеренных и расчетных (по ПК “ANSYS”) величин указанных приращений для ключевой секции плотины в точках наблюдения, расположенных на отметке ее

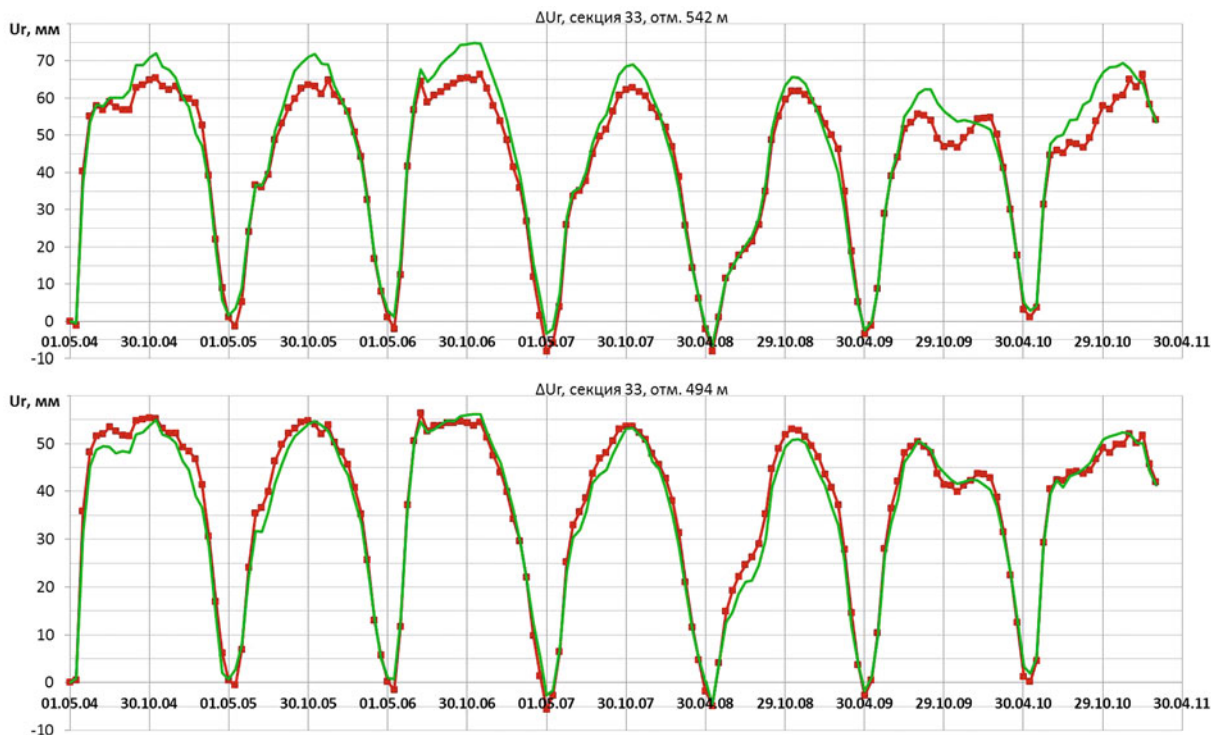


Рис. 3. Приращения радиальных перемещений ключевой секции арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС на двух отметках (начало отсчета 01.05.2004 г.):

1 — натурные данные; 2 — расчетные данные

гребня и на 48 м ниже. Рассмотренный период наблюдений составляет последние 7 лет, начиная с 1 мая 2004 г. (дата завершения инъекционных работ на плотине и в скальном основании). За указанный период максимальное расхождение между натурными и расчетными величинами смещений гребня составило 9 мм, а относительное значение средне-квадратичного отклонения расчетных хронограмм от натурных не превышает 9 %.

С помощью описанных выше КЭ моделей выполнены следующие расчетные исследования напряженно-деформированного состояния системы «сооружение — основание»:

для периода поэтапного возведения и работы плотины неполным профилем при подъеме УВБ до отметки 500 м;

для периода работы плотины полным профилем при подъеме УВБ в интервале отметок 500 – 540 м, сопровождавшегося разуплотнением основания и трещинообразованием вблизи контакта бетон — скала;

для периода выполнения ремонтных работ с лечением зоны поврежденной скалы под первым столбом плотины и зоны бетона, расположенной между отметками 344 – 359 м у напорной грани плотины;

для периода эксплуатации при изменении УВБ в интервале между отметками УМО (500 м) и НПУ (539 м), а также в ситуациях, возникающих при

подъеме УВБ до отметки ФПУ (540 м) и до гребня плотины (547,5 м).

Определены значения коэффициента запаса устойчивости на сдвиг как для плотины, монолитно сцепленной со скальным основанием, так и для плотины, имеющей на контакте бетон — скала трещину с глубиной распространения на 47 м в глубь контактного сечения. Полученные значения коэффициентов запаса представляются достаточными для основных сочетаний нагрузок и воздействий, а также для особых сочетаний, не включающих сейсмическое воздействие.

Выполненные исследования позволили рекомендовать принять в качестве отметки НПУ ныне действующую отметку 539 м, которая представляется безопасной для сооружения при условии стояния водохранилища на указанной отметке не позднее 15 октября или несколько более поздней даты, определяемой каждый раз прогнозными расчетами с учетом сложившейся на рассматриваемую дату температурной истории плотины.

В качестве отметки ФПУ также может быть принята ныне действующая отметка 540 м, но стояние водохранилища на указанной отметке после 15 октября недопустимо. Столь же недопустимыми следует считать какие-либо повышения отметок НПУ и ФПУ над принятыми в настоящее время.

Выводы

1. Исследования ВНИИГ, связанные с определением НДС бетонных и железобетонных конструкций при статических и сейсмических воздействиях, в своём развитии прошли три этапа, которые, будучи неразрывно связаны с развитием вычислительной техники и вычислительных методов механики, могут быть охарактеризованы следующим образом:

применение аналитических методов решения задач сопротивления материалов, строительной механики и теории упругости с использованием вычислительной техники для конечной реализации полученных алгоритмов;

разработка вычислительных алгоритмов и программ с использованием универсальных вариационных принципов стационарности тех или иных функционалов для решения практических задач применительно к двумерным областям или трехмерным областям простейшей формы;

математическое моделирование НДС сооружений произвольной формы с использованием промышленных программных комплексов, выбором механической модели среды и идентификацией её параметров по данным натурных наблюдений.

2. Применяемая в настоящее время при создании математических моделей детализированная схематизация геометрии сооружений, конфигурации оснований и физико-механических свойств материалов, а также методики калибровки математических моделей позволяют максимально приблизить расчетные результаты к натурным данным.

Математические модели такого уровня могут использоваться не только для анализа работы сооружения в нормальных и чрезвычайных условиях, но и для оценки возможностей развития тех или иных аварийных сценариев применительно к процессу эксплуатации гидроузла. Они должны стать надёжной основой для анализа натурных данных,

выработки критериев безопасности и в конечном итоге для принятия решений, обеспечивающих безопасную эксплуатацию гидротехнических сооружений, выполненных из бетона и железобетона.

Список литературы

1. Трапезников Л. П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Ивашинов Д. А., Соколов А. С., Шульман С. Г., Юделевич А. М. Параметрическая идентификация расчетных моделей гидротехнических сооружений. — СПб: ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”, 2001.
3. Храпков А. А., Петров В. А., Цейтлин Б. В., Скворцова А. Е., Судакова В. Н. Исследования сейсмостойкости зданий и сооружений ТЭС // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2000. Т. 237. С. 3 – 12.
4. Петров В. А., Цейтлин Б. В., Скворцова А. Е., Скоморовская Е. Я., Судакова В. Н. Расчетная оценка сейсмостойкости основных сооружений Абаканской ТЭЦ // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2002. Т. 241. С. 18 – 27.
5. Костин В. В., Костылев В. С., Турчина О. А., Цейтлин Б. В. Исследования прочности и сейсмостойкости горизонтального участка эксплуатационного водосброса Ирганайского гидроузла // Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии. Доклады III научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 12 – 14 декабря 2007 г. — СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2008. С. 30 – 49.
6. Скворцова А. Е., Турчина О. А., Храпков А. А., Цейтлин Б. В. Исследования прочности и эксплуатационной пригодности железобетонных колонн опорных оснований буровых платформ // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2005. Т. 244. С. 106 – 117.
7. Скворцова А. Е., Турчина О. А., Храпков А. А., Цейтлин Б. В. Исследования прочности и сейсмостойкости опорных оснований морских буровых платформ // Научно-технические проблемы прогнозирования надёжности и долговечности конструкций и методы их решения. Труды Международной конференции (RELMAS'2008). — СПб.: СПбГПУ, 2008. Т. 2. С. 318 – 322.
8. Khrapkov A., Tseitlin B., Skvortsova A., Vasilyev A. Mathematical model for rock foundation and concrete dam of Bureiskaya HPS dynamic interaction // Ninth International benchmark workshop on numerical analysis of dams. St. Petersburg, Russia, 22 – 23 June 2007. Proceedings, St. Petersburg, 2008, p. 216 – 236.

Исследования по обоснованию прочности бетонных и железобетонных конструкций гидросооружений

Храпков А. А., доктор техн. наук,
Гинзбург С. М., кандидат техн. наук, Скоморовская Е. Я., инженер
(ОАО "ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева")

Освещаются основные этапы экспериментальных исследований ОАО "ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева" в области прочности бетонных и железобетонных конструкций. Рассматривается история развития исследований с момента возникновения института до наших дней. В настоящее время, на современном уровне развития численных методов и вычислительной техники, экспериментальные исследования на физических моделях в значительной мере утратили свою актуальность. Им на смену приходит математическое моделирование процессов, характеризующих состояние бетонных и железобетонных конструкций при различных условиях эксплуатации. Отмечается, что одной из актуальных задач в этом направлении является разработка эффективных методов учета информации, получаемой в процессе эксплуатационного контроля за условиями работы и напряженно-деформированным состоянием конструкций.

Ключевые слова: бетонные и железобетонные конструкции, экспериментальные исследования, сложнапряженное состояние, физическое моделирование, прочность бетона, оптические методы, хрупкие модели, натурные наблюдения, статика, сейсмостойкость, динамика.

Научные исследования ВНИИГ по оценке прочности бетонных плотин проводятся по ряду направлений: изучение физико-механических свойств материала с учетом различных условий его работы в сооружении, физическое и математическое моделирование поведения сооружений в период строительства и эксплуатации, полевые исследования (температурный и фильтрационный режим, напряженно-деформированное состояние сооружения при статических и температурных воздействиях, динамические и сейсмометрические наблюдения). На различных этапах развития отечественного гидротехнического строительства эти направления были востребованы по-разному.

1. Изучение физико-механических свойств бетона с учетом условий его работы в сооружениях различного типа

Напорные гидротехнические сооружения (ГТС) отличаются весьма разнообразными и сложными условиями работы в зависимости от степени водонасыщения, характера напряженного состояния, температуры окружающей среды, длительности и скорости нагружения и т.д. Экспериментальные исследования по изучению прочностных характеристик бетона, работающего в условиях сложного напряженного состояния, с учетом влияния вышеперечисленных факторов были начаты еще в 1940-х гг. под руководством А. З. Басевича. В послевоенные годы в связи с началом реализации широкомасштабных планов гидротехнического строительства в сложных природно-климатических условиях комплексные исследования в этом направлении были развернуты под руководством К. А. Мальцова [1]. А. З. Басевичем, К. А. Мальцовым, А. М. Архиповым, И. Б. Соколовым исследовалось влияние водонасыщения бетона на его прочность и деформа-

тивность. В. Д. Глебовым и А. П. Паком проводились эксперименты по исследованию прочности сначала силикальцита, позднее цементно-песчаного раствора при различных видах нагружения. В дальнейшем А. П. Паком подобные опыты выполнялись уже для бетона. Полученные результаты позволили разработать рекомендации по назначению марок бетона в сооружении в соответствии с условиями эксплуатации различных зон плотины.

Мощный толчок к развитию экспериментальных исследований дали проектирование и строительство уникальной арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС (СШГЭС). Изучению вопросов прочности бетона СШГЭС были посвящены работы И. Б. Соколова, В. А. Логуновой, А. П. Пака, А. В. Караваева, В. М. Власова, Л. А. Ширяевой, И. А. Лапук, И. В. Михалевской, В. Д. Дубяго, И. Н. Филиппович и др. В результате многочисленных испытаний образцов и выбуренных из плотины кернов были предложены зависимости для оценки прочностных и деформативных характеристик и даны рекомендации по оценке резерва прочности бетона, находящегося в сложном напряженном состоянии. На основании обобщения результатов исследований была получена зависимость прироста прочности хрупких материалов при трехосном сжатии от призменной прочности и минимального значения главного сжимающего напряжения. Результаты исследований были использованы при формулировании критериев прочности бетона СШГЭС и разработке СНиП 2.06.08-87 "Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений".

Исследованиями А. В. Караваева было обосновано нормативное требование 90 %-ной обеспеченности прочности бетона внутренней зоны плотины.

При исследовании свойств бетона в сооружениях изучалось влияние силового воздействия фильтрующей воды на тело и основание плотины. Работы Р. Р. Чугаева, И. Б. Соколова и В. А. Логуновой [2] по определению величины силового воздействия фильтрующей воды завершились внедрением в нормы проектирования рекомендаций по учету воздействия фильтрующей воды на систему «сооружение — основание».

Были выполнены исследования начальной стадии процесса разрушения бетона (образование и развитие микроповреждений). В результате фиксации звуковой и ультразвуковой эмиссии были определены пороговые значения напряжений, характеризующие начало микроразрушений, качественные закономерности перехода к макроразрушениям (распространению магистральных трещин).

С 1972 г. под руководством А. П. Пака выполнялись исследования поведения бетона с позиций механики хрупкого разрушения. В ходе лабораторных экспериментов исследовалась возможность применения к бетону классической теории трещин Гриффитса — Ирвина, определялось критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, изучалась его зависимость от длины трещины, состава бетона (в частности, от крупности заполнителя), типа образца, возраста бетона, температуры в момент испытания и др. Л. П. Трапезниковым совместно с М. С. Ламкиным и В. И. Пащенко были выполнены исследования процессов образования и кинетики температурных трещин в бетонных элементах типа «стена» и «плита». В результате проведенных исследований в 1979 г. Л. П. Трапезниковым была предложена модель разрушения бетона при растяжении, которая учитывает ползучесть, структуру материала, описывает развитие зоны предразрушения, образование макротрещины и ее кинетику [3].

В 90-е годы ввиду консервации большинства строящихся гидротехнических объектов экспериментальные работы по исследованию свойств бетона практически не велись. Они возобновились в начале 2000-х гг., когда было принято решение о пуске первой очереди Бурейской ГЭС. Экспериментальные работы этого периода, в значительной степени связанные с исследованием физико-механических свойств укатанного бетона, проводились под руководством В. М. Власова и В. М. Бертова.

2. Исследование прочности бетонных и железобетонных конструкций на физических моделях

Исследование конструкций на оптических моделях. В течение длительного времени (с начала 30-х и до 50-х гг.) научные исследования по опреде-

лению НДС в конструкциях ГЭС проводились в основном методом фотоупругости. У истоков этих исследований стоял руководитель лаборатории оптического метода исследования напряжений (ОМИН) С. Г. Гутман. Значительный вклад в развитие этого направления внесли Н. С. Розанов, Я. Г. Скоморовский, В. Н. Скородумов, Л. К. Малышев и др.

С. Г. Гутман разработал такие основные положения методики исследований на оптических моделях, как приведение силы тяжести к внешней гидростатической нагрузке (1934 г.) и моделирование действия собственного веса совместно с гидростатическим давлением воды на двойных центрифугируемых моделях (1964 г.).

Н. С. Розанов разработал стереометрический метод исследования деформаций в упругих плитах (1955 г.) и метод тензосетки для исследования НДС сооружений на моделях из вальцмассы (1958 г.). Предложенная им методика определения осредненных напряжений в массивных сооружениях на моделях переменной толщины послужила основой при исследовании напряжений в туннельных обделках и в элементах конструкций сооружений на объемных моделях. Под его руководством сотрудниками лаборатории ОМИН были предложены и разработаны методы исследования НДС обделки напорного кругового туннеля с учетом многослойности скального массива; методы исследования температурных напряжений, возникающих в бетонных массивах под действием одномерных тепловых полей, а также НДС бетонных плотин с учетом возможности раскрытия межстолбчатых строительных швов; методы исследования температурных напряжений на объемной модели, испытываемой в холодном состоянии, под действием эквивалентных нагрузок на «нагреваемые» элементы; методы моделирования влияния фильтрационного процесса в основании и теле сооружения на их НДС.

Я. Г. Скоморовский предложил моделировать гидростатическое давление на сооружение с применением эвтектических сплавов в процессе центрифугирования (1958 г.). Им же совместно с В. Н. Скородумовым был внесен ряд усовершенствований принципиального характера в технологию изготовления, испытания моделей и обработки полученных результатов.

Для вариантов облегченных гидросооружений Богучанского гидроузла Я. Г. Скоморовский разработал принципы моделирования швов без раскрытия, через которые не передаются растягивающие напряжения, и специальную методику изготовления фотоупругих моделей со швами, реализующими односторонние связи. В соответствии с этим было проведено моделирование плотины со смешанной разрезкой.

С середины 60-х годов метод фотоупругости начал применяться для изучения динамических напряжений, развивающихся в сооружениях при прохождении сейсмических волн как естественного, так и промышленного происхождения. Напряжения в плоской модели инициировались с помощью электровзрыва, а основным инструментом для регистрации оптической картины служила высокоскоростная кинокамера. Эти исследования на специальной установке, сконструированной и изготовленной в лаборатории, проводились Л. К. Малышевым.

Предметом изучения на экспериментальных установках динамической фотоупругости служили главным образом волны напряжений в откосах, вокруг подземных выработок, в гравитационных плотинах. При подборе модельных материалов были выполнены в большом объеме исследования по определению зависимости динамического модуля упругости от частоты гармонических колебаний. Эти результаты были в дальнейшем использованы при исследованиях собственных частот и форм колебаний на моделях плотины Саяно-Шушенской ГЭС.

В течение многих лет с начала 1970-х гг. во ВНИИГ интенсивно развивались экспериментальные исследования сейсмостойкости конструкций различного назначения. Теоретической основой экспериментальных исследований сейсмостойкости конструкций различного назначения стал предложенный Д. В. Монахенко способ определения передаточных функций “воздействие — реакция” по результатам измерений искомых величин при импульсном нагружении с последующим пересчетом на конкретное сейсмическое воздействие, заданное аналоговой акселерограммой (велосигграммой, сейсмограммой). Эти результаты были использованы Л. К. Малышевым при выполнении многочисленных экспериментов на фотоупругих моделях из оптически-активных материалов с дополнительной фиксацией объемного расширения. Были испытаны также модели ряда плотин, включая арочную плотину Худонской ГЭС высотой около 200 м.

Многолетними исследованиями в лаборатории ОМИН [4, 5] была обоснована прочность основных сооружений Усть-Каменогорской, Бухтарминской, Братской, Красноярской, Усть-Илимской, Богучанской, Ингурской, Нурекской, Рогунской, Токтогульской, Виллюйской, Ирганайской, Миатлинской ГЭС, зарубежных гидроузлов — Асуанского (Египет) и Саньмынься (Китай).

Исследование конструкций на хрупких моделях. В 1958 – 1959 гг. были построены первые в СССР стенды для испытания хрупких моделей арочных, гравитационных и контрфорсных плотин. В начале 60-х годов, в связи с возросшим объемом экспериментальных исследований началось строительство

испытательного зала, бетонно-растворного узла, испытательной башни и корпуса камеральных помещений. Новая экспериментальная база, строительство которой было окончено в 1965 г., позволила провести испытания на хрупких моделях практически всех бетонных плотин, запроектированных в 60 – 80-е годы. В моделях из хрупкого материала моделировались упругие свойства прототипа, а также его прочностные характеристики. При этом одним из требований подобия материалов являлось соблюдение отношения пределов прочности при сжатии и растяжении у модельного материала и у бетона натурного сооружения. Руководили испытаниями С. С. Антонов, Л. Е. Коган, А. В. Караваев, А. М. Архипов, А. П. Пак, В. М. Власов.

В различных проектных вариантах исследовались бетонные плотины Красноярской, Усть-Илимской, Курпсайской, Зейской ГЭС. На малом и большом испытательных стендах исследовались напряженное состояние и характер разрушения арочных плотин Кассеб (Тунис), Ладжанури, Нурбаз (Марокко), Чиркейской, Миатлинской, Ингурской, Саяно-Шушенской и Худонской ГЭС. Для плотины Ладжанурской ГЭС институтом была предложена арочная плотина из трехшарнирных поясов, и с целью проверки основных проектных предпосылок на площадке строительства была возведена опытная модель плотины высотой 15 м в масштабе 1:50. Испытания показали высокую надежность сооружения.

Были выполнены исследования напряженного состояния и прочности Чиркейской арочной плотины на модели из хрупкого материала в масштабе 1:110. Испытания проводились несколькими циклами. Вначале не учитывалась последовательность возведения плотины. После завершения цикла испытаний плотины полного профиля модель разрезалась тремя вертикальными швами на глубину, соответствующую 100 м в натуре, так, чтобы при нагружении модели ее верхняя часть не воспринимала усилия в арочном направлении. Затем вертикальные швы омоноличивались и нагружалась модель второй очереди. Далее испытывали модель плотины полного профиля. Во всех случаях омоноличивание велось под нагрузкой предыдущих очередей.

Поскольку створ арочной плотины Ингурской ГЭС имеет весьма сложное геологическое строение, то для обоснования укрепительных мероприятий по заделке крупных трещин и разломов была испытана геомеханическая модель основания, т.е. блочная, состоящая из малых элементов, одновременно обеспечивающих значение модуля деформации в заданных пределах и сохраняющих заданные значения коэффициентов сцепления и трения по основным блокообразующим поверхностям.

Для арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС была выполнена модель плотины в масштабе 1:125. Для изготовления модели такого масштаба потребовалось применение специальной технологии. Были изготовлены две модели основания: однородная и геомеханическая. Испытания модели проводились при разных сочетаниях нагрузок. Было выполнено три серии испытаний, в которых воспроизводились условия возведения сооружения. После завершения испытаний модели на эксплуатационные нагрузки она была доведена до разрушения, которое произошло при четырехкратной перегрузке. Столь масштабные испытания были призваны дать обоснование (насколько это представлялось возможным) прогноза прочности этого уникального объекта.

Для арочной плотины Худонской ГЭС были выполнены исследования по определению сейсмонапряженного состояния двух вариантов сооружения с использованием ударного способа возбуждения колебаний.

В связи со строительством высоконапорных ГЭС с гидроагрегатами большой мощности возникла проблема обеспечения прочности элементов водопроводящего тракта. Институтом была предложена новая сталежелезобетонная конструкция турбинных водоводов и спиральных камер, состоящая из внутренней герметизирующей стальной облицовки и железобетонной оболочкой, причём усилия распределялись между облицовкой и оболочкой. Для обоснования возможности использования таких конструкций под руководством А. М. Архипова в 60 – 80-х годах были проведены экспериментальные исследования совместной работы облицовки и железобетонной оболочки. Были выполнены эксперименты с элементами водопроводящего тракта Красноярской, Ингурской, Саяно-Шушенской, Бурейской ГЭС. На основании результатов этих экспериментов проектировщиками сталежелезобетонные конструкции были внедрены на строительстве этих станций.

К началу 80-х годов статические, а затем и динамические расчеты строительных конструкций стали выполняться преимущественно с применением методов математического моделирования, и к началу 90-х годов исследования на физических моделях практически прекратились.

3. Натурные наблюдения

Группа натурных наблюдений сформировалась во ВНИИГ в 30-е годы, когда появилась необходимость исследовать поведение отдельных конструкций гидроузлов. М. М. Дорохов и С. Я. Эйдельман заложили основы натурных наблюдений. Сразу после Великой Отечественной войны восстановление разрушенных Днепровской и Свирской ГЭС прохо-

дило с участием группы натурных наблюдений. В дальнейшем практически все бетонные плотины, в которых предусматривалась комплексная программа исследований, стали объектами исследований группы натурных наблюдений института. В первую очередь это были Каховская, Новосибирская, Усть-Каменогорская, Бухтарминская плотины, за которыми последовали все крупнейшие гидротехнические сооружения Сибири, Кавказа, Средней Азии, Украины, Прибалтики и т.д. [6]. Фильтрационными исследованиями в те годы занимались М. Б. Гинзбург и О. Н. Носова, оценкой статической работы бетонных плотин — В. В. Блинков и С. Я. Эйдельман.

Расцвет гидротехнического строительства в 1950 – 70-е гг. привел к расширению лаборатории натурных исследований и созданию своей школы специалистов (Э. К. Александровская, В. Н. Дурчева, С. М. Пучкова, Н. И. Чалый и др.). Был накоплен большой опыт проведения исследований и анализа натурных данных о работе таких уникальных сооружений, как плотины Братской и Усть-Илимской ГЭС [7, 8], Чиркейской, Красноярской, Саяно-Шушенской ГЭС и многих других объектов.

Строительство в суровых климатических условиях потребовало изучения свойств замороженного массивного бетона в натуральных условиях. На строительной площадке Братской и Усть-Илимской ГЭС были развернуты исследования влияния отрицательных температур на прочностные, упругие и пластические свойства бетона производственных составов.

Результаты многолетних натурных наблюдений за всеми режимами и состояниями контролируемых плотин, анализ и обобщение этих данных позволили углубить представления о работе высоких бетонных плотин в суровых климатических условиях и были использованы для совершенствования проектирования, разработки нормативных документов по установке КИА, наблюдениям и анализу натурных данных.

В конце 80-х годов специалисты ВНИИГ под руководством В. Н. Дурчевой впервые в мировой практике положили начало микробиологическим исследованиям на бетонных плотинах, эксплуатирующихся в различных климатических условиях. Эти исследования проводились совместно с Институтом микробиологии и вирусологии им. Д. К. Заболотного НАН Украины, ВНИИТИ антибиотиков и ферментов, Санкт-Петербургским технологическим институтом. Было установлено воздействие микробиологического фактора на структурные изменения в бетоне, происходившие в результате жизнедеятельности микроорганизмов.

С 2001 г. под руководством В. Н. Дурчевой и В. И. Загрядского начались комплексные натурные

наблюдения за температурным режимом и напряженно-деформированным состоянием бетонной гравитационной плотины Бурейской ГЭС при ее строительстве и эксплуатации. В результате наблюдений были определены особенности НДС плотины, связанные с принятой конструкцией и технологией ее возведения. Определены диагностические показатели для оценки состояния плотины. Разработаны рекомендации по мониторингу состояния бетонных сооружений и конструкций в период эксплуатации. Проведен анализ условий работы и состояния водоводов Бурейской ГЭС. Выполнено сопоставление состояния водоводов Бурейской и Усть-Илимской ГЭС, которое показало, что для встроенного водовода Усть-Илимской ГЭС характерен существенно меньший уровень трещинообразования.

4. Динамические исследования

Вопросы динамики строительных конструкций гидроэлектростанций стали особенно актуальны в середине прошлого века в связи с увеличением единичных мощностей энергетического оборудования, удельных сбросных расходов и снижением материалоемкости сооружений.

Во ВНИИГ динамические исследования начались в 60-е годы после организации в институте лаборатории динамики сооружений во главе И. С. Шейниным. Дальнейшее развитие натурные исследования динамики ГТС получили в 1964 г. в связи с необходимостью определения параметров колебаний плотины ДнепрогЭС, вызванных взрывными воздействиями во время подготовки к разработке котлована под здание ДнепрогЭС-2.

Были проведены динамические исследования здания ГЭС совмещенного типа Павловской ГЭС. Определялись собственные частоты колебаний основных конструктивных элементов, амплитуды вынужденных колебаний, вызванные работой на разных режимах гидроагрегатов и водосбросов, а также динамические нагрузки, передаваемые от гидроагрегатов на подгенераторные конструкции. Полученные результаты натурных динамических исследований использовались при проектировании аналогичного здания Плявиньской ГЭС.

Изучение вибрационного состояния ГТС при пропуске паводков проводилось на Колымской и Горьковской ГЭС. Были определены уровни вибрации в различных точках водосбросов (при различных ступенях открытия затворов) и выявлены неблагоприятные режимы работы водосбросов.

В последующие годы выполнялись динамические обследования Иркутской, Нарвской, Кривопорожской, Путкинской, Рижской, Серебрянской и других ГЭС, в ходе выполнения которых были определены наиболее благоприятные режимы работы

гидроагрегатов и разработаны мероприятия по снижению недопустимых уровней вибраций.

Опыт, полученный при проведении экспериментальных и теоретических исследований динамики ГТС, позволил ВНИИГ совместно с ОРГРЭС разработать “Типовой динамический паспорт ГТС” (ТДП). Наличие ТДП как приложения к техническому паспорту ГТС, расположенных в сейсмически опасных районах, регламентируется законодательством РФ. В настоящее время во ВНИИГ составлены ТДП для Бурейской, Волжской, Иркутской, Камской, Миатлинской, Чиркейской и других ГЭС России. ТДП содержит сведения об источниках динамических воздействий (ДВ) на ГТС и параметрах ДВ (допустимых и фактических), сведения о ГТС и их динамических характеристиках, сведения об организации контроля за ДВ и зафиксированных экстремальных ДВ (их параметрах и последствиях).

В 2010 – 2011 гг. при проведении ОАО “Силовые машины” гидромеханических испытаний гидроагрегатов Бурейской ГЭС ВНИИГ выполнял измерения вибраций элементов здания ГЭС при различных режимах работы гидротурбинного оборудования.

5. Сейсмометрические наблюдения

В 1993 – 1995 гг. на плотине Саяно-Шушенской ГЭС совместными усилиями специалистов ГЭС, Московского ГАСУ им. В. В. Куйбышева и специалистами ВНИИГ И. В. Ивановым и А. А. Пантелеевым был выполнен комплекс тестовых динамических испытаний, которые позволили идентифицировать динамические характеристики сооружения (включая модуль упругости и не менее пяти собственных частот и форм колебаний), а также прогнозировать расчетным путем НДС этого уникального сооружения.

В начале 90-х годов на арочно-гравитационной плотине Саяно-Шушенской ГЭС по предложению ВНИИГ была смонтирована автоматизированная система сейсмометрических наблюдений, аппаратная часть которой (сейсмокомплекс “Регион”, использующий аналоговый способ передачи данных) была разработана специалистами ПО “Сибцветметавтоматика”, а программное обеспечение верхнего уровня — программный комплекс “ТРИГРАФ-М” — сотрудниками ВНИИГ И. В. Ивановым и Л. Г. Колтоном. Одновременно во ВНИИГ под руководством А. А. Храпкива была начата разработка комплекса инженерно-сейсмометрических наблюдений на плотинах с использованием цифровой передачи данных. Опытно-промышленный образец комплекса был изготовлен в конце 90-х гг. Тогда же в продолжение работ по созданию автоматизированной системы для организации инженерно-сейс-

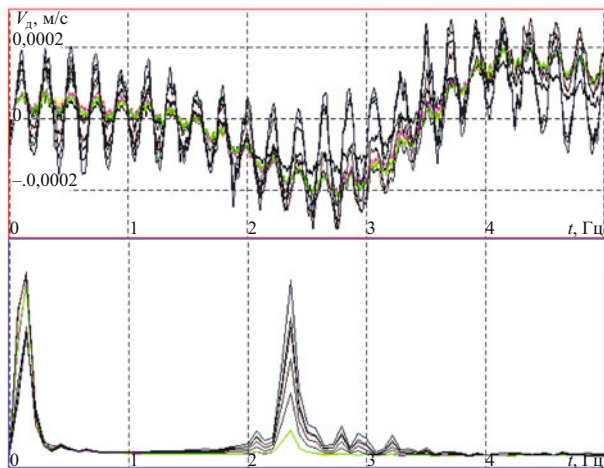


Рис. 1. Велосигramмы в направлении вдоль потока и их спектры Фурье (секция 16), запись землетрясения от 12 мая 2008 г.

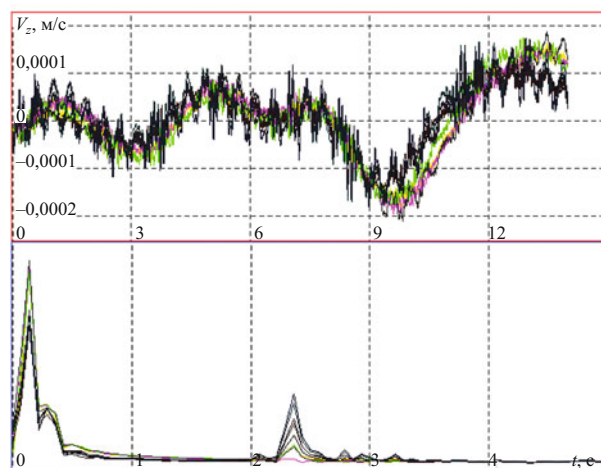


Рис. 2. Велосигramмы в вертикальном направлении и их спектры Фурье (секция 16), запись землетрясения от 12 мая 2008 г.

мометрических наблюдений А. Г. Левелевым, А. А. Никифоровым и И. В. Ивановым был разработан аппаратно-программный комплекс сейсмометрических наблюдений измерительный (КСНИ), который впоследствии был сертифицирован. В 2002 г. начались работы по внедрению системы инженерно-сейсмометрических наблюдений на объектах гидроэнергетики, в частности на строящейся Бурейской ГЭС.

С 2003 г. на Бурейской ГЭС функционирует 1-я очередь автоматизированной системы сейсмометрического контроля (АССК), разработанной во ВНИИГ. Основными элементами аппаратной части АССК являются комплекс сейсмометрических наблюдений измерительный (КСНИ-ВНИИГ) и велосиметры ВС-3к, ядро которых составляют сейсμοприемники АВ-16 (ЗАО “Геоакустика”). Вначале система состояла из центрального пункта сбора информации, двух цифровых регистрирующих станций и шести сейсμοприемников, расположенных на бетонной плотине в секции 16. В 2006 г. смонтирована и начала работать 2-я очередь системы. Дополнительно установили еще одну цифровую регистрирующую станцию и шесть сейсμοприемников. За время работы АССК зарегистрировала сотни событий природного и техногенного характера, в том числе дальние землетрясения с очагами, расположенными вблизи островов Индонезии, Японии и Курильской гряды, на Камчатском полуострове, а также в КНР. Зарегистрированы несколько землетрясений с очагами, расположенными в нескольких десятках километров от ГЭС (наиболее существенное 4 марта 2007 г.). По большинству содержательных записей выполнен анализ и произведено определение частотного состава и уровня колебаний.

На рис. 1 и 2 в качестве примера показаны велосигramмы одной из записей землетрясения, произошедшего в провинции Сычуань (КНР), которое

АССК Бурейской ГЭС зарегистрировала 12 мая 2008 г. Расстояние от эпицентра землетрясения до Бурейской ГЭС составляет около 3000 км. Анализ записей показал, что вклад колебаний непосредственно от землетрясения и от вибраций на самой плотине в направлении вдоль потока приблизительно одинаков; что касается вертикального направления, то здесь больший вклад дает землетрясение из дальнего очага.

На протяжении всего периода наблюдений фиксировались также события, связанные с техногенными явлениями (“биениями” или “вибрациями” при работе гидроагрегатов). В автоматическом режиме один раз в сутки выполнялись принудительные записи для оценки фоновых значений колебаний точек плотины и с целью проверки работоспособности системы. При определении уровня вибраций проводился анализ зарегистрированных скоростей в направлении вдоль потока (как наиболее значимых) на верхних отметках бетонной плотины. Наряду с фиксируемыми на протяжении практически всего времени наблюдения частотами около 2,1 – 2,3 Гц, 2,5 – 2,7 Гц и 2,9 – 3,2 Гц в настоящее время регистрируются также частоты 4,2 – 4,5 Гц и 8,3 – 8,8 Гц.

Углубленная обработка результатов сейсмометрических наблюдений позволила установить, что колебания точек наблюдения отражают движения по первым собственным формам колебаний сооружения, и первые три выделенные группы частот относятся именно к ним.

В результате многолетней эксплуатации АССК накоплены значительные объемы информации. Опыт, полученный при обработке и анализе записей сейсмособытий, показал, что система нуждается в дополнении новыми решениями и возможностями. В настоящее время А. Ю. Егоровым, А. А. Никифоровым и Е. Я. Скоморовской ведется

разработка и внедрение автоматизированной системы обработки сейсмической информации. Система предназначена для обработки информации с целью выделения сейсмических событий и их документирования, управления входными и выходными данными, а также обеспечения взаимодействия с автоматизированной системой диагностического контроля (АСДК) ГТС Бурейской ГЭС.

На Бурейской ГЭС продолжается монтаж 3-й очереди АССК. После установки дополнительных датчиков в плотине число каналов регистрации достигло 57. С целью повышения надежности и идентификации возникающих в различные моменты времени источников колебаний решено также дооснастить сейсмоприемниками турбинные водоводы, организовав 6 дополнительных точек наблюдения.

Выводы

1. В исследованиях прочности бетонных и железобетонных конструкций ГТС можно условно выделить четыре характерных периода:

первый — с начала 30-х до конца 50-х гг. прошлого века, когда в основном строились низко и средненапорные гидроузлы. Исследования по обоснованию прочности бетонных и железобетонных конструкций проводились преимущественно методами фотоупругости. В это же время были развернуты экспериментальные работы по изучению прочности бетона, находящегося в сложнапряженном состоянии;

второй — с конца 50-х до конца 70-х гг., когда экспериментальные исследования прочности осуществлялись как методами фотоупругости, так и на хрупких моделях. Были продолжены работы по изучению прочности и трещиностойкости бетона в условиях реальной эксплуатации. В это время запроектированы и построены в сложных природно-климатических условиях такие высокие бетонные плотины, как Чиркейская, Ингурская, Саяно-Шушенская. Выполненные исследования позволили адекватно оценить работу этих сооружений и их оснований и обосновать необходимые проектные решения;

третий — с начала 80-х гг. и до конца прошлого века, когда экспериментальные работы на физических моделях практически прекратились. Объем экспериментальных исследований свойств бетона в лабораторных условиях резко сократился и был связан в основном с исследованиями характери-

стик укатанного бетона. Исследования, связанные с обеспечением прочности бетонных и железобетонных конструкций, стали проводиться расчетными методами, что в значительной мере стало возможным в связи с достигнутым уровнем развития вычислительной техники.

В эти три периода исследования бетонных и железобетонных конструкций были в основном связаны с обоснованием конструктивных решений при проектировании гидроузлов. Как показал опыт эксплуатации бетонных плотин, принятые, в том числе с учетом результатов этих исследований, проектные решения обеспечили надежную работу построенных в эти годы бетонных плотин.

С начала XXI в. начался 4-й (современный) период, когда актуальными стали задачи, связанные с оценкой надежности не столько проектируемых, сколько эксплуатируемых в течение длительного времени энергетических объектов.

2. В настоящее время исследования прочности бетонных и железобетонных сооружений выполняются в основном с использованием методов математического моделирования. Эти методы, базирующиеся на современных возможностях вычислительной техники и программных продуктов, позволяют учитывать особенности поведения сооружений при статических, температурных, сейсмических и динамических воздействиях [9].

Список литературы

1. Мальцов К. А., Пак А. П. Учет сложного напряженного состояния при расчетах прочности бетона в сооружениях // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1972. Т. 100.
2. Соколов И. Б., Логунова В. А. Фильтрация и противодавление воды в бетоне гидротехнических сооружений. — М.: Энергия, 1977.
3. Трапезников Л. П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Розанов Н. С., Скоморовский Я. Г. Модельные исследования статике гидросооружений. — М.: Энергия, 1975.
5. Экспериментальные исследования строительных конструкций // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1996. Раздел 5. Т. 232.
6. Натурные исследования бетонных сооружений // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1996. Раздел 10 части II. Т. 232.
7. Эйдельман С. Я. Натурные исследования бетонной плотины Братской ГЭС. — Л.: Энергия, 1975.
8. Эйдельман С. Я., Дурчева В. Н. Бетонная плотина Усть-Илимской ГЭС. — М.: Энергия, 1981.
9. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных конструкций энергетических сооружений // Гидротехническое строительство. 2011. № 10.

Основные разработки и исследования ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева в области бетона и бетонных работ

В. Б. Судаков, доктор техн. наук (ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”)

Приведены результаты научно-исследовательских работ ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева в области бетона и бетонных работ, а также опыта строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений, подготовки нормативно-технической базы для использования новых конструктивно-технологических решений.

Ключевые слова: бетон, прочность, водопроницаемость, морозостойкость, кавитационная стойкость, технологии строительства, укатанный бетон.

С самого начала организации ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева исследовательские работы института в области бетона и бетонных работ ведутся в трех основных направлениях:

1. Исследования бетона как материала для гидротехнических сооружений, включая изучение процессов формирования его структуры в зависимости от применяемых для его приготовления цементов, заполнителей и добавок, а также поиск и исследования средств управления такими свойствами бетона, как прочность, водонепроницаемость, морозостойкость, кавитационная стойкость и т.д., с целью разработки приемов получения бетонов с техническими характеристиками, нужными для условий строительства и эксплуатации гидроузлов. Наряду с этим регулярно проводились подборы составов специальных бетонов для гидротехнических сооружений и конструкций крупных гидроузлов с выполнением необходимых в этих случаях исследований.

2. Исследования взаимозависимости технологии бетона и бетонных работ с разработкой наиболее рационально построенных технологических операций, выполняемых при возведении бетонных и железобетонных гидротехнических сооружений и конструкций.

Организация и проведение опытных работ в полигонных и производственных условиях для отработки и освоения новых технологических операций и новых модификаций бетонов с выполнением соответствующих исследований и испытаний.

Исследования, связанные с научным обоснованием не имеющих аналогов технических и технологических решений, принимаемых при проектировании и строительстве наиболее сложных и ответственных гидроузлов в нашей стране.

3. Изучение опыта строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений, возведенных в различных природно-климатических условиях, с подготовкой нормативно-методической базы для широкого использования новых конструктивно-технологических решений, успешно прошедших производственную апробацию, в практике отечественного гидротехнического строительства.

При проведении исследований по этим направлениям всегда учитывались уже имеющиеся данные, накопленные в результате разработок предыдущих лет как в области технологии бетона и бетонных работ [1 – 3 и др.], так и в смежных областях знания, которые могли бы дать возможность совершенствования конструктивно-технологических решений, используемых при проектировании и строительстве гидроузлов в нашей стране. С этой же целью постоянно поддерживались деловые контакты ВНИИГ с Гидропроектом, Гипроцементом, Институтом физической химии, Институтом химии силикатов, ЛПИ, МИСИ, НИИЦементом, НИИЖБ и другими проектными и исследовательскими институтами, а также с передовыми строительными организациями — Братскгэсстроем, Вилкойгэсстроем, Днепростроем, Куйбышевгидростроем, Нарын-гидроэнергостроем, Чиркейгидростроем и т.д.

Основные разработки и исследования в области бетона

Выполненные в довоенный период (1931 – 1941 гг.) исследования были посвящены главным образом изучению коррозионной стойкости различных цементов, их применимости для бетона гидротехнических сооружений, изучению свойств цементов с активными минеральными добавками (пуццолановых цементов), цементов и бетонов с золами ТЭС, а также тепловыделению при твердении цементов различного минералогического и вещественного состава [4 – 6]. Эти исследования не только положили начало формированию принципов выбора цементов для гидротехнического строительства, но и оказали значительное влияние на развитие отечественной цементной промышленности, тем более, что в процессе этих исследований были разработаны методы получения вяжущих с заранее заданными свойствами. Исследования в этом крайне важном направлении, конечно, продолжались и в последующие годы и на каждом этапе развития технологии бетона и бетонных работ в гидротехническом строительстве, принципы выбора цементов для гидротехнического строительства закреплялись

нормативными документами. ВНИИГ всегда был инициатором и основным их разработчиком и постоянно вел исследования, позволявшие их совершенствовать [7 и др.].

В довоенный период исследовались также особенности трамбованных и литых бетонов, приготовленных на разных цементах и заполнителях, и были подобраны составы бетонов для сооружений Нижнесвирской ГЭС, для проектируемых Камских ГЭС и др.

В соответствии с технологическими задачами того времени были проведены исследования торкрета и разработаны рекомендации по его применению при строительстве и ремонте гидротехнических сооружений [8].

В послевоенный период¹ одной из наиболее важных разработок ВНИИГ стало создание технологии бетона с добавками поверхностно-активных веществ (ПАВ), резко расширившей технические возможности бетона как материала для строительства гидротехнических сооружений [9, 10]. Эта разработка базировалась на разносторонних исследованиях, выполненных в содружестве с Институтом физической химии АН СССР [11]. Уже первые результаты этих исследований показали, что введение в бетоны очень небольших дозировок поверхностно-активных веществ (пластифицирующей добавки — ССБ или воздухововлекающей добавки — СНВ) может радикально изменить структуру бетонов, кинетику их твердения и такие важные для гидротехнических сооружений свойства бетонов как морозостойкость, тепловыделение, коррозионная стойкость и т.д. Впервые бетоны с добавками ПАВ по предложению ВНИИГ были применены в 1949 г. при строительстве Верхнесвирской ГЭС, где были продемонстрированы практические преимущества такой технологии и при этом сэкономлено 11000 т цемента. Естественно, что изучение возможностей целенаправленного управления свойствами бетонов стало одним из стратегических направлений в области строительства гидротехнических сооружений.

С течением времени круг добавок ПАВ, используемых с этой целью, значительно расширился: наряду с многочисленными новыми добавками гидрофильного и гидрофобного типов появились добавки комплексного действия (впервые примененные в плотинах при возведении Токтогульской ГЭС). Затем появились и суперпластификаторы, позволяющие одновременно с повышением

качества бетонов уменьшить содержание цемента в них уже не на 8 – 10 %, а на 15 – 20 %. Ряд высокоэффективных добавок ПАВ были разработаны ВНИИГ (как правило, совместно с Лесотехнической академией или другими организациями), запатентованы и с успехом применялись уже при строительстве таких крупных гидроузлов, как Бухтарминский, Братский, Ингурский, Красноярский и т.д.

Начиная с 70-х годов прошлого века в нашей стране уже не было ни одного крупного гидротехнического строительства, где бы в бетоны не вводились добавки ПАВ или добавки полифункционального действия [12 – 14]. В результате этого повысились и качество, и экономичность бетонных и железобетонных гидротехнических сооружений.

Нужно отметить, что резкое повышение морозостойкости бетонов при введении в них добавок ПАВ дало возможность ВНИИГ разработать специальную технологию высокоморозостойких бетонов, способных выдерживать без повреждений сотни и тысячи циклов замораживания-оттаивания в водонасыщенном состоянии. Она стала неотъемлемой и крайне важной частью той системы конструктивно-технологических мероприятий, которая создавалась ВНИИГ с конца 1950-х гг., чтобы обеспечить долговечность конструкций в зонах переменного горизонта воды даже в суровых климатических условиях [12, 15, 16]. Такая система, включающая методы назначения необходимого уровня морозостойкости бетонов в этих зонах в зависимости от условий эксплуатации гидросооружений и регламентирующая требования к качеству материалов для приготовления морозостойких бетонов, способы укладки бетонов в такие зоны и ухода за уложенными в них бетонами, была в целом сформирована уже в 1970-х гг. В дальнейшем она совершенствовалась по мере продвижения строительства гидроузлов в районы с суровым и особо суровым климатом и накапливающимся опытом их эксплуатации. В 1980-е гг. основные положения этой системы были включены в действующие и ныне нормативные документы — соответствующие ГОСТ, СНиП и ВСН.

О ее практической эффективности свидетельствует, в частности, тот факт, что бетоны сооружений Саяно-Шушенской ГЭС в зоне переменного горизонта воды даже после более чем 30-летней эксплуатации не имеют сколько-нибудь заметных повреждений. В то же время многие построенные ранее сооружения (например, Саратовской, Новосибирской ГЭС и др.) уже вскоре после ввода этих гидростанций в действие получили значительные разрушения именно в зонах переменного горизонта воды.

¹ Во время Великой Отечественной войны большая часть специалистов ВНИИГ в области бетона и бетонных работ были в саперных войсках, часть из них погибла в осажденном Ленинграде, а небольшая группа была эвакуирована в Узбекистан, где участвовала в создании ирригационных сооружений и конструкций.

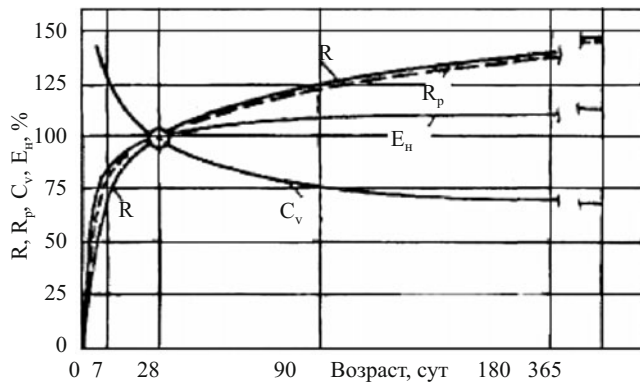


Рис. 1. Изменение прочностных и деформативных характеристик бетонов с течением времени:

R, R_p — прочность при сжатии и растяжении; C_v — коэффициент вариации показателей прочности; E_n — начальный модуль упругости

Еще одной разработкой ВНИИГ, существенно повысившей экономичность бетона и технологический уровень организации и производства бетонных работ, стало создание свода правил рационального учета изменений основных свойств бетонов за время строительства гидроузлов до ввода их в промышленную эксплуатацию. Исследования, результаты которых легли в основу этих правил, были начаты ВНИИГ в 1950-х гг. и продолжались в течение ряда лет. Они включали экспериментальные многоплановые исследования, анализ и обобщение данных натурных наблюдений, накопленных в мировой практике строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений [13, 15, 17]. Эти исследования показали, что наиболее рациональным, в особенности применительно к крупным гидроузлам, является назначение марок бетонов по прочности и водонепроницаемости в возрасте 180 дней (а для особо крупных — в возрасте 1 год) взамен принятого ранее “марочного” возраста 28 дней [7]. Эти правила были включены в основные нормативные документы, что позволило сократить содержание цемента в бетонах на 50 – 80 кг/м³ и, соответственно, улучшить термонапряженное состояние массивных гидротехнических сооружений. Кроме того, благодаря этим исследованиям впервые была четко установлена существенная разница в кинетике изменения во времени различных технических свойств бетонов (рис. 1, 2). Это позволило уточнить ряд принципиально важных представлений о процессах формирования структуры бетонов во время их твердения и тем самым создать научно-обоснованные предпосылки для совершенствования технологии бетонов [13 – 18].

По мере перехода к строительству гидроузлов с плотинами все большей высоты все более серьезную опасность для бетонных и железобетонных конструкций, соприкасающихся с высокоскоростными потоками воды, стало представлять воздейст-

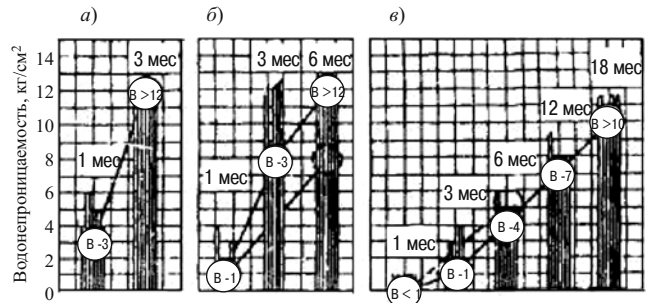


Рис. 2. Повышение водонепроницаемости с увеличением возраста бетонов на шлакопортландцементе Красноярского завода без добавок поверхностно-активных веществ:

a — состав бетона 1:2,01:3,76; В/Ц = 0,50; Ц = 330 кг/м³; *b* — состав бетона 1:2,54:4,41; В/Ц = 0,60; Ц = 279 кг/м³; *в* — состав бетона 1:3,06:5,00; В/Ц = 0,70; Ц = 240 кг/м³

вие на них кавитации. Экспериментальные исследования кавитационной стойкости бетонов разных составов, выполненные во ВНИИГ, и данные натурных наблюдений за состоянием водопропускных трактов позволили разработать специальную технологию кавитационно-стойких бетонов, требования к конструкциям таких трактов, а также выявить эффективные средства их защиты [18 – 20]. В результате разработанных правил проектирования и строительства водосбросных конструкций уже в 1980-х гг. удалось избежать значительных их повреждений под действием кавитации. Ярким примером в этом отношении является водосливная плотина Саяно-Шушенской ГЭС (высотой 245 м), где, несмотря на то что скорость потока воды на ее носке достигает 50 – 55 м/с, а объемы сбрасываемой при паводках воды неоднократно превышали десятки кубокилометров, за время более 30-летней эксплуатации на поверхности этой плотины не возникло сколько-нибудь существенных повреждений. Вместе с тем хорошо известно, что на построенном примерно в то же время гидроузле Дворшак (США) с плотиной высотой 219 м после сброса уже первых паводков кавитационные разрушения бетона достигли впечатляющих размеров и потребовали больших и сложных ремонтных работ [21].

Одним из практически важных направлений в развитии технологии бетона и бетонных работ всегда было изучение зависимости свойств этого материала от применяемых средств и способов уплотнения бетонных смесей, существенно изменявшихся на разных стадиях технического прогресса. При этом эффективными путями повышения экономичности и качества массивных гидротехнических сооружений еще в начале прошлого века считалось применение малопластичных и жестких (в последнее время — особо жестких) малоцементных бетонов, а для армированных конструкций — применение литых (самоуплотняющихся) и высокопластичных бетонных смесей.

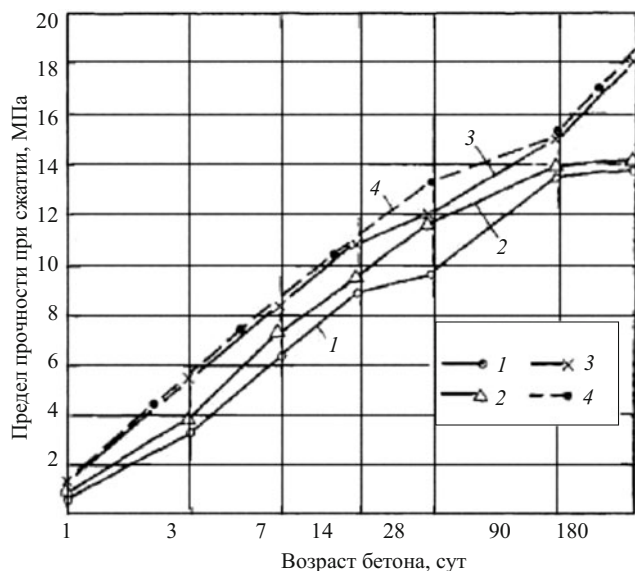


Рис. 3. Жесткость бетонной смеси и прочность бетона: бетонная смесь без добавок ПАВ с одним и тем же водоцементным отношением В/Ц = 90:

1 — Ц = 210 кг/м³, ОК = 20 см, Ж = 0 с; 2 — Ц = 195 кг/м³, ОК = 15 см, Ж = 3 с; 3 — Ц = 155 кг/м³, ОК = 2 см, Ж = 10 с; 4 — Ц = 135 кг/м³, ОК = 0 см, Ж = 30 с

В этом отношении на первых этапах формирования современной технологии строительства массивных сооружений специалисты ВНИИГ провели исследования бетонов, получаемых из бетонных смесей, уплотняемых вибраторами, которые в 1930-х гг. были впервые применены на строительстве Днепровской и Свирской ГЭС. Далее подобные исследования продолжались в связи с появлением все более мощной вибрационной техники и, соответственно, возможностью применять малопластичные и жесткие бетонные смеси все с меньшим содержанием цемента и воды [13, 22]. Установленные благодаря этим исследованиям особенности технических характеристик бетонов из жестких и особо жестких бетонных смесей (например, прочности и ее нарастания с течением времени — рис. 3) позволили перейти к опытным работам с такими смесями в полигонных условиях с использованием тяжелых уплотняющих машин, а затем и к практическому использованию так называемых укатанных бетонов при строительстве гидроузлов в нашей стране [23].

Несколько иначе развивалась технология бетонов, получаемых из высокопластичных и литых бетонных смесей. Широкое использование таких смесей при возведении железобетонных конструкций в начале XX в., объяснялось легкостью заполнения ими бетонируемых объемов, насыщенных арматурой, и низкими трудозатратами при таком выполнении бетонных работ (прежде всего по сравнению с трамбованными бетонами) [1, 3]. Но с течением времени выяснилось, что конструкции, выполнен-

ные из литых бетонов и подвергающиеся при эксплуатации частому замораживанию-оттаиванию, в особенности конструкции гидротехнических сооружений, отличаются крайне низкой морозостойкостью. Это, естественно, значительно сузило область применения литых бетонов в гидротехническом строительстве, где их стали использовать только для подводных конструкций, конструкций в зданиях гидростанций и т.п. При этом, чтобы снизить в литых и высокопластичных бетонных смесях содержание цемента, но не усилить их склонность к расслоению, в них стали вводить добавки бентонита, кремнегеля и т.п. Однако эти добавки, улучшая связность таких смесей, отнюдь не повышали морозостойкость получаемых из них бетонов.

Вместе с тем постепенное продвижение гидротехнического строительства в северные и северо-восточные районы нашей страны и необходимость возведения в них железобетонных конструкций, насыщенных арматурой, некоторые из которых будут подвергаться многократному замораживанию-оттаиванию, обусловили стремление создать, опираясь на технические достижения в технологии бетонов последних десятилетий, модификации литых бетонов, обладающих высокой морозостойкостью. Основными предпосылками для этого были результаты исследований высокоморозостойких бетонов с добавками ПАВ и данные долговременных натурных наблюдений за долговечностью гидротехнических сооружений, выполненных из таких бетонов.

Целенаправленные исследования в этом направлении в 70-х годах были проведены во ВНИИГ и НИИЖБ. Они подтвердили возможность, используя наиболее эффективные средства управления структурой бетонов, резко повысить морозостойкость бетонов и из высокопластичных бетонных смесей. С учетом их результатов ВНИИГ и НИИЖБ объединили свои усилия с тем, чтобы совместно разработать специальную технологию высокоморозостойких литых (самоуплотняющихся) бетонов и осуществить ее освоение строителями и использование на практике.

В качестве наиболее подходящего объекта для практического применения литых высокоморозостойких бетонов были выбраны водопропускные сооружения В-2 и В-4 Комплекса защитных сооружений Ленинграда от наводнений, строительство которых велось в 1980-х гг. [24]. Сооружения В-2 и В-4, доставляемые на место наплавным способом, были запроектированы как тонкостенные железобетонные коробки размерами 132 × 51 × 14 м с внутренними переборками. В стенах наплавных сооружений из-за их размеров (толщина 30 см) и высокой насыщенности арматурой (150–200 кг на 1 м³ бетона) виброуплотнение бетонных смесей ис-

ключалось, поэтому при их бетонировании было необходимо использовать бетонные смеси литой консистенции. При этом, в соответствии с условиями работы водопропускных сооружений, бетон стен должен был отвечать марке М400, W12, F500.

Литая (самоуплотняющаяся) бетонная смесь, состав которой установили ВНИИГ и НИИЖБ, при бетонировании стен подавалась в них бетононасосами или конвейерами "Ротек". О полном заполнении такой смесью тонких насыщенных арматурой стен наплавных сооружений убедительно свидетельствует тот факт, что при буксировке их к месту установки в полости внутри этих сооружений не просочилось ни капли воды. Контрольные испытания также подтвердили, что бетон стен имеет все требуемые проектом технические характеристики.

Таким образом, в итоге целенаправленных исследований и разработок была впервые создана технология высокоморозостойких литых бетонов и убедительно доказана ее практическая и экономическая эффективность. Это радикально изменило представление о технических возможностях самоуплотняющихся бетонных смесей и границах их рационального применения в гидротехническом строительстве.

В последние десятилетия XX в. в результате выполнения комплекса исследовательских работ стало возможным использовать еще одно средство управления структурой и свойствами бетонов путем введения в них небольших добавок (4 – 6 % от веса цемента) микрокремнезема (микросилики) — отхода производства полупроводников. Эта возможность появилась благодаря широкому повседневному применению при приготовлении бетонов на строительных гидроузлов добавок ПАВ, прежде всего пластифицирующих добавок и суперпластификаторов, без которых введение в них микросилики неэффективно.

В отличие от других минеральных добавок техногенного происхождения (в частности, от золы-уноса ТЭС²), введение в бетоны высокодисперсной (удельная поверхность микросилики в 100 раз больше поверхности портландцемента) чрезвычайно активной микросилики позволяет не только значительно уменьшить содержание в бетонах цемента, но и повысить связность бетонных смесей, повысить прочность и плотность бетонов, их стойкость к воздействию кавитации и истирающему действию наносов. Особенностью микросилики является также то, что при введении в бетоны она бурно реагирует со щелочами цемента, связывая их в устойчивые комплексы, и это практически полно-

стью исключает опасность разрушения конструкций в результате реакции между щелочами цемента и реакционно-способными заполнителями.

Кинетика взаимодействия микросилики с компонентами бетона существенно зависит от ее количественного соотношения с дозировкой добавки-пластификатора. Это позволяет управлять эффективностью микросилики и целенаправленностью ее действия, но требует глубокого знания современной технологии бетона и бетонных работ. Без этого, вводя в бетоны микросилику, можно получить либо неустойчивые, либо вообще негативные результаты от ее практического применения.

Примером успешного использования микросилики при возведении бетонной плотины в сложных природных условиях является создание плотины Коусар (высотой 144 м) в Иране, где впервые для этой страны по рекомендациям ВНИИГ была применена микросилика [25]. В этом случае ее применение было обусловлено тем, что все местные карьеры заполнителей содержали реакционно-способные частицы; грунтовые воды и вода водохранилища отличались сульфатной агрессивностью, район строительства — высокой сейсмичностью, а труднодоступность ущелья вынуждала подавать бетонные смеси в блоки бетонирования по трубопроводам на большие расстояния и смеси должны были обладать высокой связностью. Введение в бетоны микросилики позволило избежать серьезных осложнений производства бетонных работ в этих условиях.

Кстати в технически развитых странах (Норвегия, США, Швейцария, Япония и др.) микросилика как добавка к бетонам также применяется уже с 80-х гг. XX столетия.

Еще одним практически важным направлением разработок ВНИИГ в области технологии бетонов всегда были проектирование и подборы составов бетона для наиболее крупных и ответственных гидротехнических сооружений нашей страны с выполнением необходимых в этих случаях исследований. Бетоны, составы которых были подобраны во ВНИИГ и адаптированы к условиям строительства конкретных гидроузлов, использовались при возведении основных сооружений Братской, Бухтарминской, Красноярской, Курпсайской, Токтогульской, Саяно-Шушенской, Чиркейской ГЭС и др.

Обычно эти разработки были связаны с проведением ряда разнообразных испытаний, занимавших много времени. Но были и исключения из этого правила. Так, например, подбор состава бетона для Ингурской ГЭС с арочной плотиной высотой 271 м был первоначально поручен институту ТНИСГЭИ в Тбилиси. Переданный строительству этим институтом состав бетона для арочной плотины был рассчитан на основе математической моде-

² По рекомендациям ВНИИГ зола-уноса ТЭС вводилась в бетоны Братской, Саяно-Шушенской и других ГЭС в количестве 20 – 30 % от веса цемента.

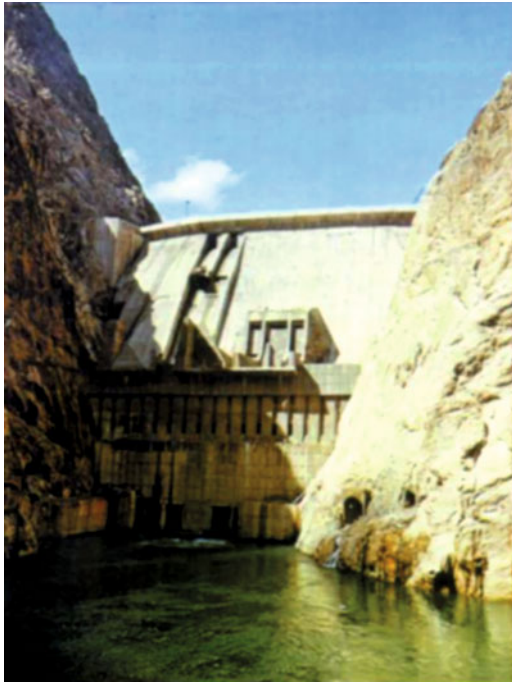


Рис. 4. Токтогульская ГЭС с плотиной высотой 215 м

ли наиболее плотного бетона, созданной в ТНИС-ГЭИ для этой цели. При укладке такого бетона в первые блоки седла арочной плотины была получена явно дефектная бетонная кладка, совершенно не державшая воду, которую пытались налить в скважины, пробуренные в этих блоках. В возникшей ситуации попросили ВНИИГ срочно (на строительстве уже была введена в действие 1-я очередь мощного бетонного хозяйства общей производительностью 360 м³ бетона в час) подобрать состав бетона с нужными параметрами. Это было сделано в кратчайшие сроки, причем предложенный ВНИИГ состав бетона затем использовался до конца строительства Ингурской ГЭС.

Обобщив свой разносторонний опыт в этом отношении, ВНИИГ разработал специальную методику проектирования и подбора составов гидротехнического бетона [18], которая исключала серьезные промахи в этом важном деле.

Основные разработки и исследования в области бетонных работ

Одно из первых мест среди наиболее важных разработок ВНИИГ занимает созданная в нашей стране система зонального распределения бетона в гидротехнических сооружениях. Эта система формировалась и совершенствовалась в течение десятилетий, соединяя в себе и результаты исследовательских работ в области технологии бетонов, и рациональные приемы укладки специальных бетонов в разные зоны сооружений, и способы определения геометрических параметров выделенных зон, и

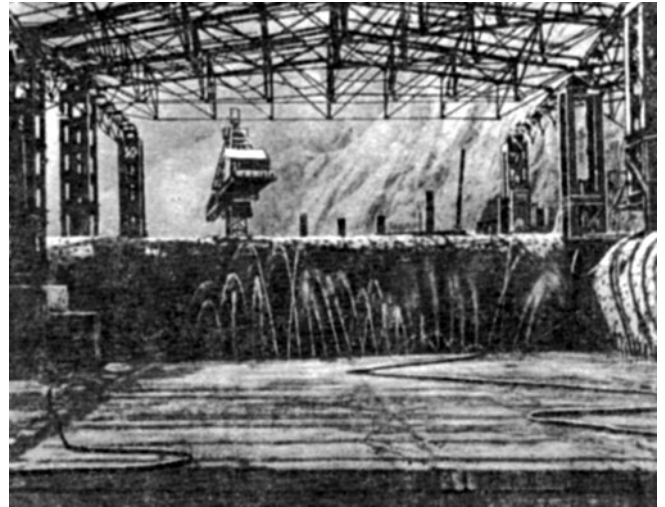


Рис. 5. Поверхностное охлаждение однослойных блоков с предварительным распылением воды

данные натурных наблюдений за состоянием и долговечностью бетона этих зон при эксплуатации сооружений в различных природно-климатических условиях [2, 3, 7, 13, 18 – 20, 26, 27 и др.]. Эта система стала одной из главных предпосылок для создания надежных, безопасных и долговечных гидротехнических сооружений и принесла огромный экономический эффект нашей стране. Формируя эту систему, ВНИИГ непосредственно при проектировании целого ряда гидроузлов (Братского, Красноярского, Курпсайского, Ташкумырского, Саяно-Шушенского и др.) участвовал в разработке для их сооружений зонального распределения бетона [13, 25 – 27].

Огромное практическое значение для гидротехнического строительства имела совместная разработка Нарынгидроэнергостроя и ВНИИГ технологии бетонирования массивных сооружений однослойными блоками с поверхностным охлаждением — “токтогульского” метода бетонирования [28, 29]. Основные положения этого метода были обоснованы в 1968 г. в ходе крупномасштабных опытно-исследовательских работ, позволивших установить необходимые значения параметров всех технологических операций, входящих в комплекс бетонных работ. Их результаты были рассмотрены комиссиями Минэнерго СССР, после чего было принято решение об использовании нового метода бетонирования для возведения плотины Токтогульской ГЭС высотой 215 м (рис. 4) и объемом 3,2 млн. м³ бетона.

Возведение плотин однослойными блоками толщиной 0,3 – 1,0 м с поверхностным охлаждением (рис. 5) дало возможность резко увеличить их площадные размеры и выполнять все технологические операции мощными высокопроизводительными машинами. Переход к этой технологии стал поворотным моментом в развитии плотиностроения.

При строительстве первых плотин по этой технологии она применялась в сочетании с малопластичными бетонными смесями, с уплотнением их пакетами вибраторов. Так был построен ряд крупных плотин: Токтогульская, Андижанская, Ахурянская, Кировская, Курпсайская (СССР), Чаира (Болгария), Коусар (Иран) (рис. 6) и др. Опыт строительства этих плотин показал, что возведение их по технологии однослойного бетонирования (рис. 6) позволяет снизить их стоимость на 20 % и более и уменьшить затраты труда на бетонные работы в 1,5–2 раза. Высокая же надежность и безопасность бетонных плотин, возведенных однослойными блоками, была убедительно доказана тем, что ряд таких плотин перенесли 8–9-балльные землетрясения без каких-либо повреждений: Суусамырское (1992 г., Киргизия) — плотины Токтогульской и Курпсайской ГЭС, Спитакское (1988 г., Армения) — плотина Ахурянской ГЭС и т.д.

Через некоторое время эта технология стала применяться преимущественно в сочетании с малопластичными жесткими бетонными смесями, уплотняемыми укаткой (укатанными бетонами). Последнее сочетание оказалось особенно удачным, так как укатанный бетон способен воспринимать строительные нагрузки сразу же после его укладки и уплотнения. Это позволило еще больше снизить стоимость плотин и затраты труда на их возведение, сократив сроки строительства гидроузлов в 1,5–3 раза по сравнению с недавним прошлым. По этой технологии в нашей стране построена в 1985 г. плотина Ташкумырской ГЭС (высотой 70 м) и недавно закончено строительство плотины Бурейской ГЭС (высотой 136 м). В зарубежных же странах начиная с 1990-х гг. стало бурно развиваться именно строительство гидроузлов с плотинами из укатанного бетона. К настоящему времени число таких плотин в мире превысило 400.

Очень полезными для строительства гидроузлов в нашей стране явились разработки ВНИИГ в области технологии бетона и бетонных работ, подготовившие необходимые предпосылки для каскадного метода их строительства с организацией массовых перевозок бетонных смесей на расстояния 30–50 км. Главным объектом при практической реализации этого метода была Курпсайская ГЭС с гравитационной плотиной высотой 113 м. В месте расположения этой ГЭС не было ни карьеров заполнителей для бетона, ни площадки, подходящей для размещения бетонного хозяйства и подсобных предприятий. Поэтому при ее строительстве бетонные смеси, приготовленные на бетонном заводе Токтогульской ГЭС, перевозились круглогодично автосамосвалами на расстояние 40 км. Так было перевезено около 1 миллиона кубов бетона. Благодаря этому был предельно сокращен подготови-



Рис. 6. Современный метод бетонирования плотин (плотина Коусар высотой 144 м)

тельный период, сокращены соответствующие затраты и строительство крупной гидроэлектростанции установленной мощностью 800 МВт было завершено за 5 лет. Затраты на строительство Курпсайской ГЭС окупались за 1 год [26].

Вслед за этим были успешно осуществлены массовые перевозки бетонных смесей на 20 км при строительстве Майнской ГЭС (Саяно-Шушенская ГЭС-Майнская ГЭС) и на 30 км при реконструкции Кегумской ГЭС (Рижская ГЭС-Кегумская ГЭС).

Не менее важными разработками ВНИИГ являются методы зимнего бетонирования, особенно метод зимнего бетонирования без отогрева мерзлого основания — метод модифицированного термоса. Этот метод нашел широкое применение при реконструкции шлюзов Беломоро-Балтийского пути и прискальных блоков при сооружении ряда гидроузлов. В наиболее сложных условиях этот метод был использован при возведении спецперехода через р. Лену — устройстве фундаментной плиты объемом 10 тыс. м³ под опору ЛЭП 500. Бетонирование этой фундаментной плиты, расположенной на отмели посредине реки, обнажавшейся только в зимнюю межень, пришлось вести при устойчивых морозах минус 40–45° С с доставкой бетонных смесей автосамосвалами с бетонного завода, расположенного в 40 км от объекта бетонирования. Бетонные работы были выполнены Виллюйгэстроом, а в организации их непосредственно участвовали сотрудники ВНИИГ.

Естественно, что, располагая богатыми и разнообразными исследовательскими материалами и данными натурных наблюдений за практической реализацией различных конструктивно-технологических решений, ВНИИГ стал главным разработчиком всех основных нормативных документов в области технологии бетона и бетонных работ в гидротехническом строительстве.

Список литературы

1. *Житкевич Н. А.* Бетон и бетонные работы. — СПб., 1912.
2. Бюллетень Волховской гидроэлектрической силовой установки. — Л., 1927.
3. *Выгодский С. Я., Мейер Р. А., Хоциалов Н. Ф.* Гидротехнические бетоны. — М.: ОНТИ, 1937.
4. *Пуццолановые цементы:* Сборник. — М.: ВНИЦ, 1936.
5. *Кинд В. А., Окороков С. Д., Вольфсон С. Л.* Теплота твердения портландцементов различного химического состава // Цемент. 1937. № 7.
6. *Окороков С. Д.* Взаимодействие минералов портландцементного клинкера в процессе твердения цемента. — М.: Стройиздат, 1945.
7. *ГОСТ 4795-4801-49.* Гидротехнический бетон. — М.: Стандартгиз, 1949.
8. *Глузге П. И.* Торкрет и его применение в гидротехнике. — М.: Госстройиздат. 1933.
9. *Стольников В. В.* Воздухововлекающие добавки в гидротехническом бетоне. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1953.
10. *Гинзбург Ц. Г.* Пластифицирующие добавки в гидротехническом бетоне. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956.
11. *Ребиндер П. А.* Поверхностные явления в дисперсных системах. — М.: Наука, 1979.
12. *Адамович А. Н., Судаков В. Б.* Применение комбинированных поверхностно-активных веществ гидрофильного и гидрофобного типов в условиях гидротехнического строительства // VII Международный конгресс по поверхностно-активным веществам. — М.: Внешторгиздат, 1976.
13. *Судаков В. Б.* Рациональное использование бетона в гидротехнических сооружениях. — М.: Энергия, 1976.
14. *Судаков В. Б., Гинзбург Ц. Г., Морозова Г. В., Бель А. А., Миклашевич Н. В.* Применение комплексных добавок ПАВ в бетоне гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 1985. № 6.
15. *Судаков В. Б.* Морозостойкость бетонов в разном возрасте. — М.-Л., 1964.
16. *Гинзбург Ц. Г., Судаков В. Б., Литвинова Р. Е.* Основные мероприятия по обеспечению морозостойкости гидротехнического бетона // Гидротехническое строительство. 1975. № 8.
17. *Стольников В. В., Губарь А. С., Судаков В. Б.* Влияние возраста бетона на его основные технические свойства. — М.: Госэнергоиздат, 1960.
18. *П 21-74 / ВНИИГ* Руководство по проектированию состава гидротехнических бетонов. — М.: Энергия, 1974.
19. *П 58-72.* Методические рекомендации по технологии изготовления бетона, подверженного воздействию кавитации, и износостойких облицовок гидротехнических сооружений. — М.: Энергия, 1972.
20. *Гинзбург Ц. Г., Иноземцев Ю. П., Кармелев Б. Г.* Кавитационная износостойкость гидротехнического бетона. — М.: Энергия, 1972.
21. *ACI Committee 210.* Compendium of Case Histories on Repair of Erosion-Damaged Concrete in Hydraulic Structures. 1994.
22. *МКС по гидротехнике.* Малоцементные бетоны для гидротехнических сооружений. — М.: Энергия, 1978.
23. *Судаков В. Б.* Строительство плотин из укатанного бетона. — М.: Информэнерго, 1988.
24. *Судаков В. Б., Гинзбург Ц. Г., Бель А. А., Бергер Т. Ф., Корниенко И. В., Морозова Г. В.* Особенности бетонов наплавных конструкций // Известия ВНИИГ. 1988. Т. 213.
25. *Синев В. В., Судаков В. Б., Солтани Н. Х., Кейхамтур К. Т.* Особенности конструкции и технологии бетонирования плотины Коусар // Гидротехническое строительство. 2006. № 6.
26. *МКС по гидротехнике.* Пути повышения технологичности конструкций гидросооружений для районов Сибири и Дальнего Востока. — М.: Энергоиздат, 1981.
27. *Судаков В. Б.* Особенности зонального распределения бетона в гравитационных плотинах при современных методах их возведения // Известия ВНИИГ. 1984. Т. 177.
28. *Толкачев Л. А., Судаков В. Б.* Токтогульский метод бетонирования массивных сооружений. — М.: Энергия, 1973.
29. *Судаков В. Б., Толкачев Л. А.* Современные методы возведения бетонных плотин. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
30. *Ивашищев Д. А., Судаков В. Б., Василевский А. Г., Шангин В. С., Юркевич Б. Н., Караваев А. В., Латин Г. Г.* Принципы конструирования современных бетонных плотин // Гидротехническое строительство. 2004. № 2.

Исследования систем технического водоснабжения и охладителей тепловых и атомных электростанций

Свердлин Б. Л., Ищук Т. Б., Николаева О. С., кандидаты техн. наук
(ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»)

Приведены наиболее значимые результаты исследований ВНИИГ в области градирен, водоемов-охладителей, гидротехнических сооружений систем технического водоснабжения, а также примеры реализации наилучших разработок на различных объектах.

Ключевые слова: система технического водоснабжения, башенная градирня, вентиляторная градирня, оросительное, водоуловительное и разбрызгивающее устройство градирни, номограмма градирни, водоем-охладитель, брызгальный бассейн, водозабор, насосный блок, водовыпуск, эффективность, охлаждение

Гидротермические исследования и экологический мониторинг водоемов и водотоков, используемых в качестве охладителей, являются одним из основных направлений, по которым выполняются научные работы по техническому водоснабжению тепловых и атомных электростанций.

В нашей стране начало систематическому изучению гидротермических процессов в охладителях тепловых электростанций, в частности водоемах-охладителях, было положено образованием в 1930 г. в Ленинградском бюро Энергостроя, позже переименованного в институт «Теплоэлектропроект», специального сектора прудового хозяйства. В дальнейшем центр научных исследований в области технического водоснабжения и охладителей тепловых электростанций переместился во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. В это время появляются первые публикации по теории и практике термического расчета градирен и водоемов-охладителей. Основоволожниками этих исследований являлись Б. В. Проскуряков и Д. Н. Бибииков [1, 2, 3, 4].

В 1947 г. была организована лаборатория промышленной гидравлики, первым руководителем которой был доктор технических наук А. П. Зегжда.

В 1960 – 1970 гг. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева был признан ведущим институтом в СССР и странах СЭВ по вопросам охлаждения оборотной воды.

Длительное время работами по этому направлению научной деятельности института руководили кандидаты технических наук А. Г. Аверкиев (1955 – 1973 гг.) и И. И. Макаров (1974 – 1993 гг.). Со временем тематика исследований постепенно расширялась. В разные годы исследованиями в области технического водоснабжения и охладителей тепловых и атомных станций занимались А. Г. Аверкиев, Г. В. Востржел, Г. Н. Лапшин, В. Е. Андрианов, И. И. Макаров, В. Б. Дульнев, Ю. С. Недвига, Л. Г. Акулова, Е. А. Сухов, Г. П. Мандрыкин и др. В настоящее время научными проблемами в этой области продолжают заниматься сотрудники ВНИИГ В. А. Кякк, В. В. Гончаров, Р. Е. Гельфанд, Т. Б. Ищук, А. С. Соколов, Б. Л. Свердлин.

После распада СССР ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева остался практически единственной в стране организацией, занимающейся фундаментальными исследованиями, необходимыми для проектирования градирен и систем технического водоснабжения.

Изучение и прогнозирование гидротермических и гидрохимических процессов в водоемах-охладителях

В период интенсивного строительства ТЭС и АЭС проектирование систем технического водоснабжения водоемов-охладителей (ВО) основывалось на результатах моделирования гидротермического режима на крупномасштабных моделях. Во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева (Нарвское и Красноярское отделения), Южтехэнерго, ГГИ исследовался гидротермический режим водоемов-охладителей всех крупных ГРЭС и АЭС. В 1985 – 2000 гг. были проведены натурные исследования гидротермического режима ряда крупных водоемов-охладителей с объемной циркуляцией с целью прогнозирования температурного режима в системах водоснабжения ТЭС в различных условиях. На основе материалов исследований гидротермического режима больших водоемов, используемых для охлаждения циркуляционной воды (Ириклинская, Гусиноозерская, Пермская ГРЭС, Кольская АЭС и другие объекты) была выявлена малая эффективность водовыпускных и водозаборных сооружений. На основе результатов исследований внесены коррективы в методику определения оптимальных компоновок систем технического водоснабжения на глубоководных ВО и выбора типа водовыпускных и водозаборных сооружений.

Работы по обеспечению экологической безопасности водоемов и водотоков, используемых для охлаждения циркуляционной воды ТЭС, проводились как экологический мониторинг совместно с гидробиологическими организациями [5]. Мониторинг водохранилища на р. Шелонь (Псковская ГРЭС) выявил положительное влияние подогрева его зоны на экологию. Увеличилось количество теплолюбивых видов рыб, водоплавающей птицы;

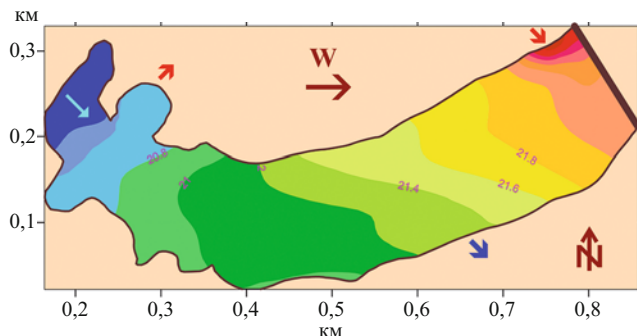


Рис. 1. Результаты численного моделирования гидротермического режима водоема-охладителя

бобры интенсивно заселяют зону подогрева. По результатам мониторинга на р. Шелонь и р. Сейм (Курская ТЭЦ-1) согласованы спорные условия водопользования из этих рек. Для ряда ТЭС выработаны рекомендации по предотвращению “теплого загрязнения”.

На основании результатов лабораторных и натурных исследований гидротермических характеристик разбрызгивающих устройств различных типов и условий формирования гидравлического режима в бассейнах со стратифицированными потоками в нестационарном режиме была разработана методика определения параметров брызгальных бассейнов в системах охлаждения ответственных потребителей АЭС. По результатам работы обоснованы основные параметры бассейнов Ленинградской АЭС-2, Нововоронежской АЭС-2, Ростовской АЭС и АЭС “Белене” (Болгария).

Сотрудниками ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” разработаны математические модели, вычислительные алгоритмы и программы для расчетов процессов переноса тепла и примесей в водоемах-охладителях [6], вероятностные модели; применяется стохастическое моделирование гидротермического режима водоемов-охладителей; выполняются расчеты, лабораторные и натурные исследования гидротермических гидрохимических режимов водоемов-охладителей и конструкций гидротехнических сооружений, обеспечивающих эксплуатацию водоемов-охладителей (рис. 1).

Для водоемов и водотоков, используемых для охлаждения циркуляционной воды, за последние годы выполнялись исследования: термического режима акватории Персидского залива в районе сброса подогретой циркуляционной воды АЭС “Бушер” (Иран), гидротермических процессов в оз. Гусино при различных режимах эксплуатации Гусиноозерской ГРЭС, гидроледотермического режима водоема-охладителя и подводного канала Ростовской АЭС, гидротермических процессов в водоеме-охладителе Балаковской АЭС, гидротермических процессов при эксплуатации плавучего энергетического блока в бухте Крашенинникова (г. Вилючинск). Изучено влияние водосбросного сооружения до-

полнительной продувки на Цимлянском водохранилище Ростовской АЭС и режима эксплуатации Курской ТЭЦ-1 при прямоточном водоснабжении на температурный режим р. Сейм, а также охлаждающей способности водохранилища при сбросе технической воды хранилища отработанного ядерного топлива при его работе в режиме уплотненного хранения. Выполнено обоснование системы технического водоснабжения проектируемой Ленинградской АЭС-2 с оценкой влияния сброса подогретой циркуляционной воды на термический режим Копорской губы Финского залива при различном расположении АЭС и мест выпуска и забора циркуляционной воды.

Гидравлика и термика водозаборов, насосных блоков, подводных и отводящих трактов (напорных и безнапорных), водовыпусков, струнаправляющих и струераспределяющих сооружений

Высокая эффективность охлаждения в системах технического водоснабжения ТЭС и АЭС является следствием хорошо организованного подвода воды к охладителям [7].

Гидравлические исследования сооружений, входящих в системы технического водоснабжения ТЭС и АЭС, ведутся во ВНИИГ уже около 50 лет. Их результаты легли в основу проектов большинства тепловых и атомных электростанций, запроектированных и построенных в нашей стране и за рубежом.

Гидравлические и аэродинамические лабораторные исследования проводятся по следующим основным направлениям:

- обоснование гидравлически оптимальных конструкций оголовков глубинных водозаборов;
- разработка гидравлически оптимальных компоновок водозаборов и аванкамер блочных насосных станций, обеспечивающих надежную работу насосного и гидравлического оборудования путем создания равномерного распределения расходов воды вдоль водозаборного фронта и исключения заносимости входных окон водоприемников;
- разработка новых типов водоочистного оборудования водоприемников насосных станций;
- расчеты переходных процессов в системах технического водоснабжения при пуске и останове насосных агрегатов;
- определение зависимостей для гидравлических оптимизационных расчетов сложных трубопроводных систем ТЭС и АЭС и сами расчеты;
- разработка рекомендаций и определение зависимостей для расчетов и проектирования узлов подключения сливных трубопроводов конденсатора турбин к отводящим каналам;
- определение гидравлически оптимальных конструкций сооружений, сопрягающих отводящие ка-

налы ТЭС с водохранилищами при значительных перепадах уровней воды;

обоснование конструкций рассеивающих водовыпусков при сбросе больших расходов воды.

Исходя из гидравлических особенностей водного тракта электростанций, в нем можно отметить следующие элементы:

водозаборное устройство, которое должно обеспечить гарантированный отбор воды из водоемника в требуемом количестве при всех гидрологических условиях;

аванкамеры насосных станций, определяющие условия подвода воды к водоприемникам и оказывающие серьезное влияние на всю гидравлику потока в водоприемнике и насосной станции при разных режимах эксплуатации;

насосные станции с необходимой системой водоочистных устройств, особенностью режимов работы которых являются большие расходы воды, достигающие $15 - 17 \text{ м}^3/\text{с}$ на один насос, постоянное или мало изменяющееся водопотребление, необходимость тонкой очистки воды.

Следует отметить, что условия подвода воды к водоприемникам насосных станций являются наиболее важными с точки зрения обеспечения надежного функционирования систем технического водоснабжения.

В последние годы были проведены гидравлические исследования компоновки водоприемников насосных станций Тяньваньской АЭС в КНР и АЭС "Бушер" в Иране. Совместно с СПб "Атомэнергопроект", и СПКТБ "Ленгидросталь" были выполнены гидравлические исследования и проект реконструкции всей системы технического водоснабжения Сормовской ТЭЦ с заменой насосов и водоочистного оборудования с применением двухконтурных сеток.

Проведены гидравлические исследования отводящего канала эксплуатируемой Калининской АЭС при разных режимах его работы.

Выполнены гидродинамическое моделирование водозаборных ковшей циркуляционных насосных станций и математическое моделирование в системах технического водоснабжения ЛАЭС-2, Нововоронежской АЭС-2 (блоки № 1 и № 2), Ростовской АЭС (блоки № 3 и № 4), Калининской АЭС (блок № 4).

Исследования, испытания и проектирование систем оборотного водоснабжения с применением градирен

За последние 10 лет сотрудниками ОАО "ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева" были проведены натурные испытания башенных градирен Казанской ТЭЦ-2 (1520 м^2), Ново-Рязанской ТЭЦ (1520 м^2), Ровенской АЭС (10000 м^2), Астраханской ТЭЦ-2 (2600 м^2), Северной (1600 м^2), Южной (3200 м^2) и Правобережной ТЭЦ (3200 м^2) г. Санкт-Петербур-



Рис. 2. Градирни Калининской АЭС

га, Петрозаводской ТЭЦ (1600 м^2), Саранской ТЭЦ-2 ($800, 1200, 1600, 2300 \text{ м}^2$) и др.

Теплотехнические расчеты и разработка номограмм выполнены для градирен Тюменской ТЭЦ-2 (3200 м^2), Калининской АЭС ($10\,000 \text{ м}^2$) (самые большие по площади орошения из всех существующих на сегодняшний день) (рис. 2), Ростовской АЭС ($14\,200 \text{ м}^2$) (находится в стадии проектирования), Ново-Ангренской ТЭС (7100 м^2), Новгородской ТЭЦ (725 м^2), Южной ТЭЦ ТГК-1 (32000 м^2).

Комплексное технологическое обследование и теплотехнические расчеты выполнены для вентиляторных градирен НПЗ "Ангарская нефтехимическая компания", "Киришинефтеорсинтез", "Самараоргсинтез", кемеровского "АЗОТ", башенных градирен ТЭЦ-ПВС "Северсталь", Новгородской ТЭЦ.

Проводились лабораторные исследования новых вариантов полимерного водоуловительного устройства с оценкой их влияния на охлаждающую способность вентиляторных градирен ТЭС "Нассирия" (Ирак).

Гидравлические и теплотехнические расчеты выполнялись для вентиляторной градирни Мутновской (Камчатка) геотермальной электростанции, использующей природное тепло Земли для производства электричества*. В связи с реконструкцией необходимо было разработать рекомендации по выбору типа оросителя и разбрызгивающих сопел для градирни. Для этого были проведены технологические расчеты охлаждающей способности градирни с применением различных вариантов оросительных устройств и выполнены гидравлические расчеты водораспределительной системы градирни с

* Расположена к северо-востоку от вулкана Мутновский в юго-восточной части полуострова Камчатка на отметке 780 м над уровнем моря, в 116 км от Петропавловска-Камчатского. Геотермальные электростанции обеспечивают до 30% энергопотребления центрального Камчатского энергоузла и позволяют значительно ослабить зависимость полуострова от дорогостоящего привозного мазута.



Рис. 3. Градирни ТЭЦ «ССГПО» (Казахстан)

различными типами разбрызгивающих сопел. Градирня Мутновской геотермальной электростанции представляет собой четырехсекционную вентиляторную градирню с секциями площадью 149 м^2 каждая. Водораспределительная система градирни — напорная. Разбрызгивающие сопла имеют различные типоразмеры и производительность и расположены несимметрично относительно магистрально-го трубопровода.

По итогам расчетов градирни выполнено сравнение различных вариантов оросительных устройств по температурам охлажденной воды, а также сравнение различных вариантов разбрызгивающих сопел по величине напора воды на входе в водораспределительную систему и коэффициентам неравномерности водораспределения. В результате для работы в реальных условиях станции удалось подобрать технологическое оборудование отечественного производства, которое не только не ухудшило, а даже улучшило эффективность работы градирни.

Также стоит отметить, что сам факт применения вентиляторной градирни в энергетике нехарактерен для нашей страны. Исторически сложилось, что на ТЭЦ для охлаждения оборудования используются башенные градирни. Вентиляторные градирни применяются крайне редко. Однако они имеют ряд неоспоримых преимуществ перед башенными градирнями и, как показывает анализ, могут найти и уже находят широкое применение на электростанциях.

В 2006 г. для нужд ТЭЦ Соколовско-Сорбайского горно-обогатительного производственного объединения (Казахстан) (рис. 3) построена вентиляторная градирня площадью орошения $4 \times 256 \text{ м}^2$. В конце 2008 г. в связи с расширением производства и по результатам трехлетней эксплуатации вентиляторной градирни было принято решение о строительстве еще одной вентиляторной градирни той же площади рядом с первой градирней. Решение о

строительстве второй вентиляторной градирни было принято после обследования существующих башенных градирен ТЭЦ АО «ССГПО» специалистами ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева». Обследование показало, что металлоконструкции этих градирен находятся в аварийном состоянии. Была проведена проработка возможных вариантов, включая демонтаж башенных градирен и строительство на их водосборных бассейнах секционных вентиляторных градирен.

Среди основных достоинств вентиляторных градирен можно отметить их компактность по сравнению с башенными той же производительности, возможность рассчитать градирню непосредственно под заданные технологические нагрузки и требования заказчика (расположение на генплане, количество и размеры секций, мощность вентилятора, диаметр вентилятора, тип оросителя), более глубокое охлаждение воды, быстроту монтажа на площадке и относительно низкую стоимость строительства.

К недостаткам вентиляторных градирен можно отнести более высокое энергопотребление, потребность в высокой квалификации обслуживающего персонала и наладчиков, а также необходимость более частого проведения ревизий и ремонтных работ.

Технико-экономическое сравнение вариантов применения вентиляторных и башенных градирен показывает, что по приведенным затратам вентиляторные градирни, как минимум, не уступают башенным.

Исследования оросительных устройств градирен. Тепловые расчеты

Для обоснования выбора нового, наиболее эффективного оросителя при проектировании новой градирни или при реконструкции старой необходимо выполнить расчеты по определению температуры охлажденной воды для определенного набора режимных параметров: номинальной гидравлической и тепловой нагрузки и метеоусловий определенной, как правило, 5 %-ной обеспеченности. При этих условиях проводятся расчеты температуры охлажденной воды t_2 для нескольких оросителей. Лабораторные исследования всех основных технологических элементов градирен: оросительных устройств, водоуловителей, разбрызгивающих сопел — проводятся на сертификационных стендах. В испытаниях определяются гидроаэротермические и аэродинамические характеристики элементов градирен: объемные коэффициенты тепло- и массоотдачи, числа испарения, а также коэффициенты аэродинамического сопротивления [8]. Обработка результатов испытаний ведется на основе модели испарительного охлаждения воды [9, 10], которая основана на численном интегрировании систем

Аэротермические характеристики оросительных устройств градирен

Ороситель	Высота $H_{ор}$, м	Параметры формулы $K_{исп} = A_p \lambda^m$			Параметры формулы $\zeta_{ор} = \zeta_{сух} + K_{\zeta} q_1$		Температура охлажденной воды t_2 , °С
		A_p	m	$k_{\beta p}$	$\zeta_{сух}$	K_{ζ}	
АЦ-25	2,50	0,82	0,60	0,95	3,70	0,43	34,4
ОДГ-60/40+ВСС-55	1,50	1,19	0,42	0,96	14,3	0,36	31,7
Тип 19	1,52	1,30	0,54	0,93	17,3	0,35	32,1

дифференциальных уравнений тепломассообмена в градирине. За последние годы испытано более ста современных конструкций оросительных и водопользовательных устройств наиболее крупных производителей оборудования, как отечественного, так и зарубежного производства.

Результаты проведенных исследований используются при последующих тепловых расчетах градирен с определением температуры охлажденной воды, при проведении технико-экономических расчетов систем технического водоснабжения и выборе оптимальных конструкций оросительных устройств градирен применительно к конкретным объектам промышленности и определенным условиям их эксплуатации. Пример такого расчета приведен в таблице.

В качестве исходных данных была принята градирия площадью орошения 1600 м². Расход воды на градирию 14 400 м³/ч (плотность орошения 9 м³/(м² · ч)); тепловая нагрузка 170 МВт (перепад 10 °С); метеофакторы 5 %-ной обеспеченности для Москвы — температура воздуха 24,5 °С, относительная влажность 57 %.

Из таблицы следует, что оросители ОДГ-60/40+ВСС-55 и тип 19 обеспечивают примерно одинаковое охлаждение — $t_2 \approx 32$ °С. Окончательный выбор оросителя и градирии в целом делается проектировщиком по результатам технико-экономического обоснования, базирующегося на тепловых расчетах. Для выбранного варианта градирии рассчитывается и строится графически тепловая характеристика — нормативная номограмма для определения температур охлажденной воды [11]. Методика расчета и построения номограммы реализована в программе для персонального компьютера.

В ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” регулярно проводятся международные научно-практические конференции, посвященные гидротехническим сооружениям в системах техводоснабжения энергетических и промышленных предприятий. В них участвуют представители проектных организаций и предприятий Российской Федерации, а также ряда

зарубежных стран — Украины, Белоруссии, Казахстана, Узбекистана, Латвии, Чехии, Польши, Бельгии, Венгрии, США, Германии. Информация о новых разработках, существующих проблемах и методах их решений, обмен опытом — все это позволяет ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” многие годы занимать лидирующие позиции в области исследований, испытаний и проектирования систем оборотного водоснабжения.

Список литературы

1. *Исследования систем технического водоснабжения и охладителей тепловых и атомных электростанций* / Под ред. Макарова И. И. // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1997. Т. 230. Ч. 2. С. 107 – 109.
2. *Бернадский Н. М., Проскуряков Б. В.* Опыт теории и практики расчета прудов-холодильников / Материалы по гидрологии, гидрографии и водным силам СССР. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1931. Вып. 5.
3. *Проскуряков Б. В.* Теория термического расчета пленочных градирен // Известия НИИГ. 1935. Т. 16. С. 112.
4. *Проскуряков Б. В., Бибииков Д. Н.* Метод прогноза температур воды в естественных водоемах // Известия НИИГ. 1935. № 16.
5. *Каяк В. А.* Тепловое загрязнение водных объектов циркуляционной водой электростанций и связанное с ним природоохранное законодательство // Теплоэнергетика. 2002. № 4. С. 42 – 46.
6. *Соколов А. С.* Исследование гидротермического режима водоемов-охладителей методами математического моделирования // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1997. Т. 230. Ч. 2. С. 128 – 141.
7. *Ишук Т. Б.* Местные потери напора в водоводах технического водоснабжения электростанций // Электрические станции. 1980. № 6. С. 47 – 52.
8. *Сухов Е. А., Гельфанд Р. Е.* Определение коэффициентов тепло- и массоотдачи оросительных устройств градирен по опытным данным // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1971. Т. 96. С. 256 – 262.
9. *Гельфанд Р. Е.* Дифференциальные уравнения теплового расчета поперечно-противоточных градирен // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1968. Т. 86. С. 144 – 154.
10. *Гельфанд Р. Е.* Расчеты противоточных и поперечноточных градирен на ЭЦВМ // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1970. Т. 93. С. 244 – 254.
11. *Гельфанд Р. Е., Свердлин Б. Л., Николаева О. С.* О формах представления тепловых характеристик испарительных градирен // Электрические станции. 2007. № 10. С. 7 – 14.

Участие ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева в создании Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений

Василевский А. Г., кандидат техн. наук
(ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”)

Рассматриваются вопросы оказания ВНИИГом научно-технической помощи в создании и подготовке Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений к вводу в эксплуатацию.

Ключевые слова: Комплекс защитных сооружений (КЗС), информационно-диагностическая система (ИДС), контрольно-измерительная аппаратура (КИА), эксплуатация, водопропускные сооружения, судопропускные сооружения, дамбы, батопорт, автодорожный туннель, затворы.

Проблема наводнений в Санкт-Петербурге возникла сразу же после его основания. С тех пор наводнения в городе происходят систематически со средней повторяемостью одно наводнение в год. Катастрофические наводнения, причинившие городу огромный материальный ущерб и вызвавшие человеческие жертвы, произошли (по новому стилю):

21 сентября 1777 г., когда впервые в истории города подъем уровня воды в дельте Невы превысил 3 м над ординаром (максимум составил 3,1 м БС);

19 ноября 1824 г. произошло самое высокое за всю историю города наводнение с подъемом уровня воды на 4,1 м БС;

23 сентября 1924 г. наблюдалось второе по высоте наводнение в г. Ленинграде с подъемом до 3 м БС.

Во второй половине 20-го столетия число наводнений увеличилось.

Комплекс защитных сооружений (КЗС) 2-го класса предназначен для защиты г. Санкт-Петербурга от наводнений посредством изоляции Невской губы от Балтийского моря при угрозе нагонной волны. КЗС представляет собой линейно-протяженное гидротехническое сооружение, расположенное по трассе пос. Горская – о. Котлин – г. Ломоносов, длиной 25 400 м, в том числе по акватории Финского залива длиной 22 200 м при средней глубине 2,9 м (рис. 1 и таблица).

Технический проект защиты Ленинграда (Санкт-Петербурга) от наводнений разрабатывался на основе технико-экономического обоснования (ТЭО) с 1972 по 1977 г. генеральным проектировщиком — Ленинградским отделением института “Гидропроект” Минэнерго СССР при активном участии ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” и еще 60 научно-исследовательских и проектных организаций (главные инженеры проекта С. С. Агалаков и С. Н. Кураев) [1].

В работе над проектом принимали участие: ОАО “Ленморниипроект” — генпроектировщик судопропускных сооружений С-1 и С-2; ОАО “Трансмост” — подводный туннель под судопропускным сооружением С-1, подъемный мост над судопропу-

ским сооружением С-2; ФГУ ЦКБ МТ “Рубин” — проектирование батопортов; ОАО “СГЭМ” — внешнее электроснабжение; ГУП “Ленгипроинжпроект” — автодорога по КЗС с неразводными мостами через водопропускные сооружения В-1 — В-6 и транспортными развязками и др.

В связи с постоянной угрозой затопления территории Санкт-Петербурга при наводнениях после утверждения проекта правительство СССР в 1979 г. приняло постановление о начале строительства Комплекса защитных сооружений (КЗС) в акватории Финского залива. Строительство было организовано на условиях генерального подряда. Генеральным подрядчиком был определен Ленгидроэнергоспецстрой, специально организованное строительное управление Минэнерго СССР под руководством известного гидростроителя Ю. К. Северна [2].

В короткие сроки были сформированы коллективы строительно-монтажных организаций, созданы базы строительства, развернуто жилищное строительство для строителей. К началу перестройки КЗС был возведен на 70 % и были намечены сроки ввода его в эксплуатацию. Строительство КЗС, начатое в 1979 г., было приостановлено в 1987 г. на 10 лет в связи с дискуссией по негативному экологическому воздействию КЗС на акваторию Невской губы.

Обсуждения экологических проблем КЗС проходили в форме общественных слушаний, создавались комиссии, в том числе с участием иностранных специалистов. Черту под многочисленными дискуссиями подвела международная экспертная комиссия в 1990 г., сделавшая вывод, что концепция КЗС от наводнений является обоснованной и рекомендовала форсировать завершение строительства.

Учитывая возрастающую опасность катастрофического наводнения в Санкт-Петербурге и особую важность ввода КЗС, построенного к тому времени на 70 %, правительство Российской Федерации 25 ноября 1994 г. приняло постановление “О завершении строительства сооружений защиты

Санкт-Петербурга от наводнений”. Этим постановлением правительству Санкт-Петербурга было поручено провести необходимую корректировку проекта, а Министерству строительства России — осуществить экспертизу и переутвердить проектно-сметную документацию. Откорректированный проект был утвержден Главгосэкспертизой.

В реализации управления проектом Комплекса защиты Санкт-Петербурга от наводнений в процессе его завершения принимают участие:

федеральные и региональные органы исполнительной власти — Министерство регионального развития Российской Федерации, Министерство финансов Российской Федерации, Министерство экономического развития и торговли Российской Федерации, Федеральное агентство по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству (Росстрой), правительство Санкт-Петербурга;

международные финансовые организации — Европейский банк реконструкции и развития, Европейский инвестиционный банк, Северный инвестиционный банк;

группа реализации проекта (Фонд инвестиционных строительных проектов Санкт-Петербурга).

Заказчик-застройщик при завершении строительства Комплекса защитных сооружений г. Санкт-Петербурга от наводнений — Федеральное казенное предприятие “Дирекция Комплекса защитных сооружений Министерства регионального развития Российской Федерации”.

Для обеспечения комплексного подхода в вопросах проектирования, строительства и координации действий всех участников реализации проекта

Госстроем на конкурсной основе были отобраны: консультант-проектировщик — английская компания “Halcrow Group Ltd.” (Великобритания); консультант-инженер — консорциум ЗАО “Тенинжконсалт”, ЗАО “Институт “Стройпроект” — Royal Haskoning (Нидерланды).

Таким образом, строительство КЗС — стройка международного масштаба как по количеству участников проекта, так и по объему строительно-монтажных работ (50 млн. м³ грунта, 2 млн. м³ бетона, 40 тыс. т металлоконструкций).

На всех этапах создания объекта ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” принимало активное и непосредственное участие. За это время институтом для КЗС выполнено более 100 работ (по перечню научно-технических отчетов).

Составление проекта сопровождалось обширными научными исследованиями. В центре исследований находились вопросы экологического обоснования проекта [3]. Необходимо было создать такую компоновку сооружений, которая бы пропускала сток р. Невы без подпора и не образовывала бы застойных зон в Невской губе Финского залива. Для этой цели в институте использовали 20 моделей различных масштабов и генеральная гидравлическая модель размерами 120 × 60 м, моделирующая устье Невы, Невскую губу и восточную часть Финского залива [4].

На генеральной гидравлической модели была обоснована ныне реализованная компоновка сооружений. Как показал опыт эксплуатации, компоновка оказалась весьма удачной.

Общая характеристика КЗС

Показатель	Значение показателя
Протяженность КЗС, км	25,4
В том числе по акватории, км	22,2
Число водопропускных сооружений	6
Число судопропускных сооружений	2
Число защитных дамб	11
Ширина дамб по гребню, м	36
Ширина отверстий, м:	
двух примыкающих к берегам водопропускных сооружений (В-1, В-6)	по 288
четырех центральных водопропускных сооружений (В-2 — В-5)	по 240
южного судопропускного сооружения С-1	200
северного судопропускного сооружения С-2	110
Высота волноотбойной стенки над уровнем моря, м	8,0

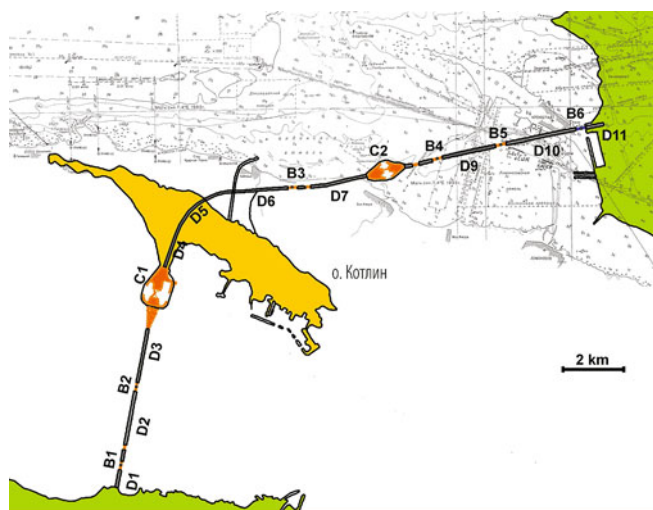


Рис. 1. Ситуационный план

При проведении исследований на большой модели использовались самые современные измерительные комплексы. Методика исследований широко обсуждалась с участием институтов Академии наук.

В обосновании компоновки и конструкций сооружений приняли участие многие сотрудники института, среди них М. Ф. Складнев, Л. В. Мошков, Я. З. Маневич, Т. С. Артюхина и др.

Утвержденный проект КЗС отличается рядом необычных и уникальных решений (рис. 1).

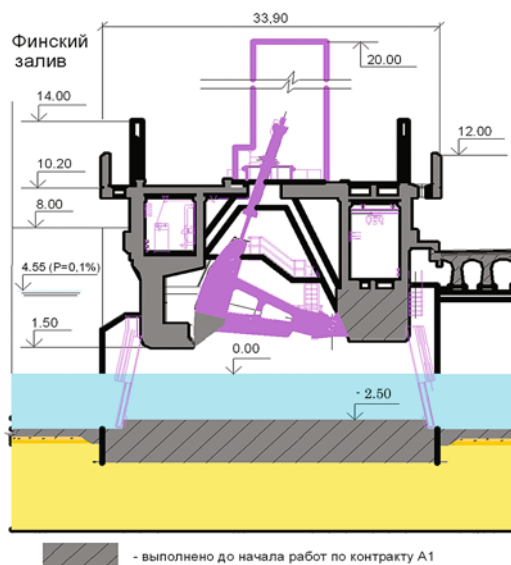
Из шести водопропускных сооружений (рис. 2) два водопропускных сооружения (В-2 и В-4) возведены насухо в доках-котлованах и доставлены к месту установки наплавным способом (автор проекта Л. Б. Бернштейн). Чтобы выполнить эту работу, необходимо было запроектировать тонкостенную ячеистую густоармированную и водонепроницаемую конструкцию больших размеров 132×51 м. Эту работу выполнили совместно с проектными организациями сотрудники института во главе с В. Б. Судаковым [5]. Вряд ли такое решение дало значительный экономический эффект, но получен бесценный опыт проектирования и строительства подобных сооружений.

Отработанная технология бетонирования затем широко использовалась при возведении автодорожного туннеля и используется в настоящее время при возведении других сооружений как общепринятая.

Большое участие в сопровождении строительства бетонных сооружений КЗС приняли сотрудники лаборатории во главе с Г. З. Костыря.

Опыт возведения бетонных сооружений КЗС может широко использоваться при возведении морских сооружений при нефте- и газодобыче.

Уникальным комплексом сооружений является судопропускное сооружение С-1, перекрывающее



Основные характеристики:

Количество водопропускных пролетов · 12
 Ширина каждого пролета · 24 м
 Глубина на пороге · 2,5 м

Рис. 2. Типовой разрез по водопропускному сооружению

морской канал во время наводнений (рис. 3, 4). Непосредственно в перекрытии судопропускного отверстия С-1 участвуют следующие технологические узлы:

две доковые камеры (северная и южная), предназначенные для постоянного размещения в них батопортов в период отсутствия:

двустворчатые сегментные ворота, предназначенные для открытия прохода батопорта из доковой камеры. Ворота постоянно находятся в закрытом положении. При угрозе наводнения доковые камеры заполняются водой и двустворчатые сегментные ворота открываются;

плоский колесный затвор водопроводной галереи, предназначенный для заполнения доковой камеры водой. Затвор постоянно находится в опущенном состоянии. При угрозе наводнения, если доковая камера осушена, колесный затвор с помощью гидропривода поднимается и происходит заполнение доковой камеры;

пневматическая система для поддержания майны перед воротами в зимний период и индукционный обогрев ворот и закладных частей, работающих в зависимости от температуры окружающего воздуха;

два батопорта (северный и южный), непосредственно предназначенные для перекрытия судопропускного отверстия в период наводнения. Батопорт состоит из затвора и опорной рамы, предназначенной для крепления затвора и придания ему строго определенной траектории перемещения (автор идеи и в целом проекта С-1 — ОАО «Ленморнии-проект»).



Рис. 3. Общий вид КЗС с судопропускным сооружением С-1

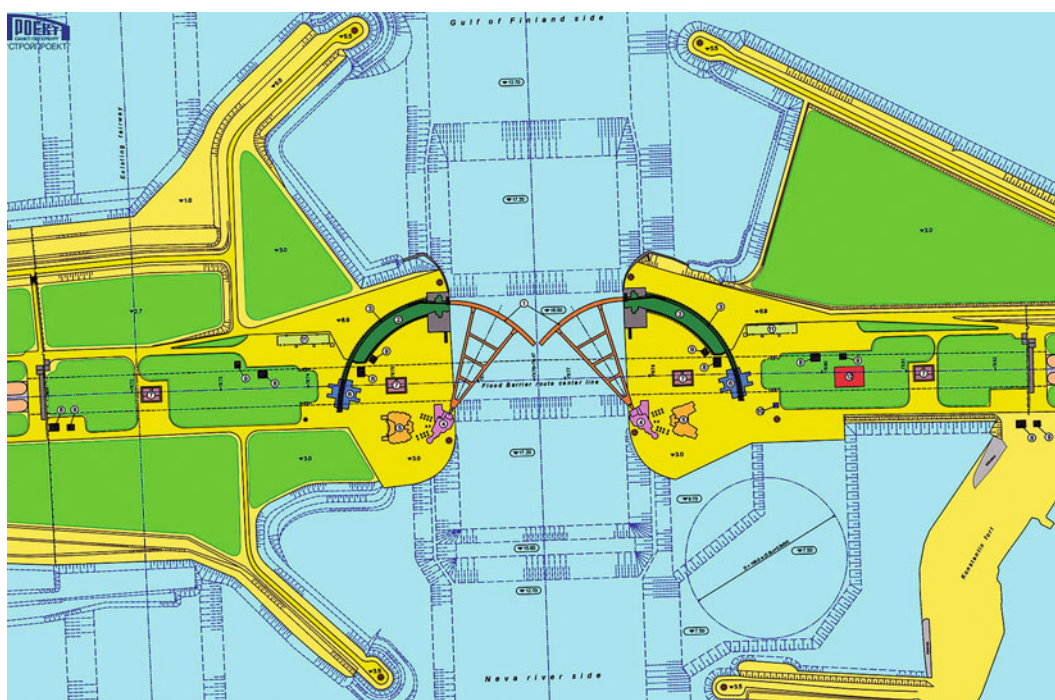


Рис. 4. Схема судопропускного сооружения С-1 и участка туннеля под ним

В комплекс С-1 также входит автодорожный туннель, проходящий под морским каналом и обеспечивающий прохождение автомобильного транспорта по КЗС.

Конструкции батопорта, особенно обтекаемой нижней части, отрабатывались во ВНИИГ на пространственных и фрагментарных моделях с применением математического моделирования. Первые принципиальные решения на основе моделирова-

ния приняты под руководством С. М. Мищенко. Окончательная доводка конструкций батопорта выполнена совместно с ФГУ ЦКБ МТ "Рубин" под руководством В. И. Климовича.

Вторым важнейшим сооружением КЗС является судопропускное сооружение С-2 (рис. 5). Непосредственно в перекрытии судопропускного отверстия С-2 участвуют следующие основные технологические узлы:

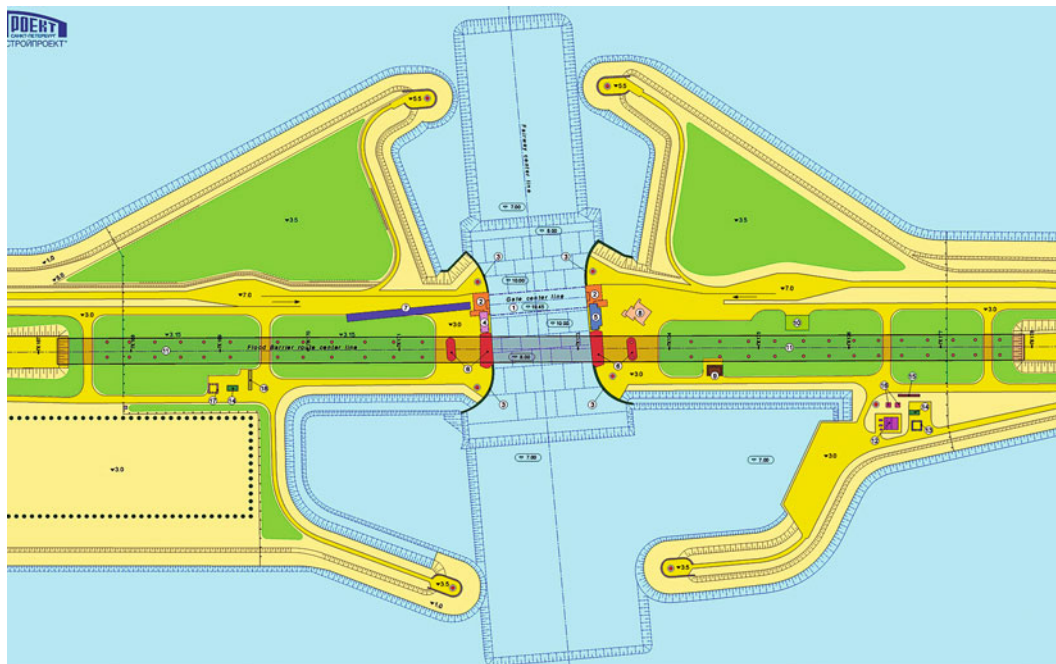


Рис. 5. Схема судопропускного сооружения С-2, включая автомобильный мост

плоский вертикальный затвор, предназначенный для перекрытия судопропускного отверстия при угрозе наводнения;

камера затвора, предназначенная для размещения затвора при открытом судоходном отверстии, при этом верхний край затвора располагается ниже порога судоходного отверстия. Торцевые стены камеры поддерживают по два подъемных гидроцилиндра затвора, установленные по краю затвора соответственно с северной и южной сторон;

две идентичные гидромеханические системы (северной и южной сторон).

Плоский затвор пролетом 110 м также следует отнести к уникальным сооружениям.

Для обеспечения судоходства через С-2 в комплекс его сооружений входит автомобильный мост с подъемной частью над самим каналом.

Под руководством И. Н. Шаталиной (ВНИИГ) были обоснованы зимние режимы эксплуатации затвора, так как его конструкция должна быть рассчитана на проламывание ледяного поля при зимних наводнениях.

Принятая в проекте конструкция поперечного профиля одиннадцати защитных дамб различна в зависимости от глубин акватории, параметров волн и ледовых воздействий, характеристик грунтов основания, компоновочных решений, технологии строительства, условий примыкания дамб к водо- и судопропускным сооружениям. Учтена необходимость размещения (рис. 6) шестиполосной скоростной автодороги; кабельных коммуникаций электро-снабжения, связи и управления КЗС; многоканаль-

ной телефонной канализации; дождевой канализации.

Большая протяженность и гигантские объемы работ по укладке грунта потребовали новых решений в технологии их возведения. Сотрудники ВНИИГ М. П. Павлич, В. Г. Радченко, Е. А. Филиппова и др. совместно со строителями и проектировщиками успешно решили эту задачу путем отсыпки грунта в воду пионерным способом с опережающей отсыпкой каменных банкетов [6, 7]. Указанный способ уменьшил экологический ущерб и ликвидировал возможные потери грунта за счет скоростного и волнового воздействия водного потока при производстве работ.

Особую проблему создавали геологические условия строительства дамб южной стороны КЗС. Основную часть основания дамб составляют слабые глинистые грунты озерно-ледникового происхождения (инженерно-геологические элементы 24, 25, 25а, 25д, 26). Все указанные грунты отличаются пониженной прочностью, высокой деформируемостью и слабой водопроницаемостью, что вызывает большие и длительно протекающие осадки. Особенно слабыми являются грунты инженерно-геологического элемента 25д.

С учетом этого при возведении Д-2 было принято решение о дренировании основания, что и выполнено на опытном участке. К сожалению, добиться ощутимого эффекта по осадкам не удалось. Осадки дамб в затухающем режиме продолжают. Поэтому при возведении Д-3 на участке примыкания дамбы Д-3 к автомобильному туннелю на расстоянии примерно 700 м слабый грунт основания

Защитные дамбы

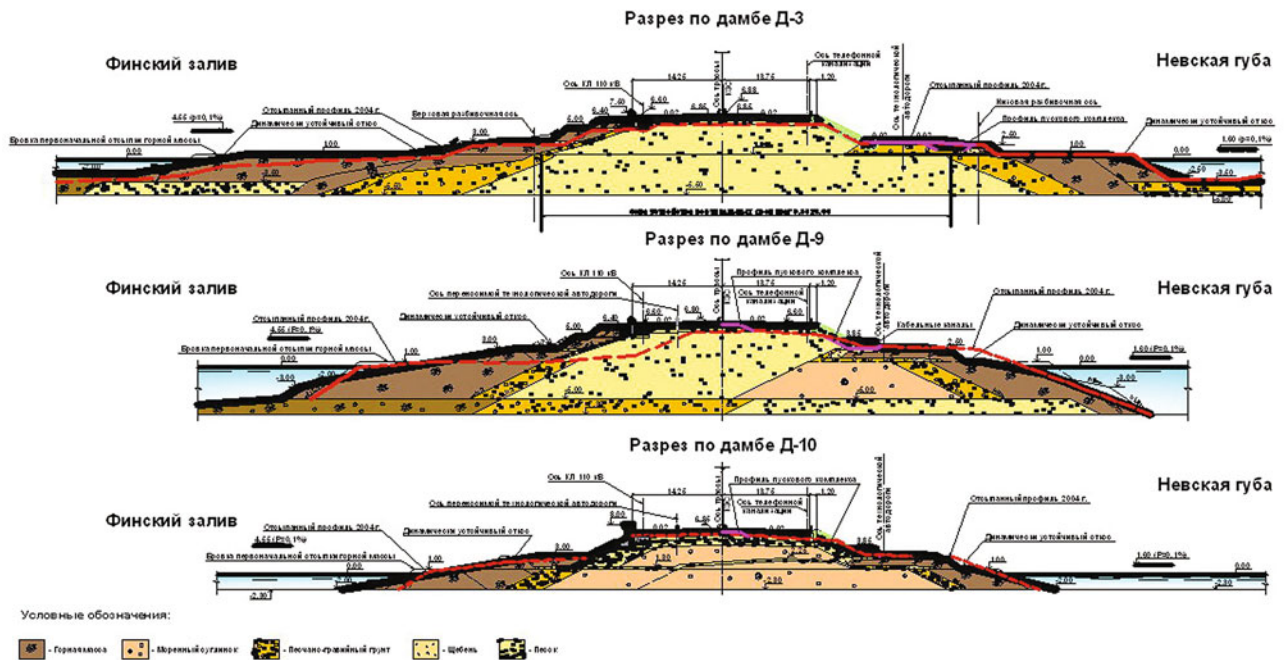


Рис. 6. Типовые разрезы по защитным дамбам

был удален и заменен отсыпкой песка в воду. Тем не менее возможность дополнительных деформаций тела дамбы и ее основания сохраняется.

Указанное свидетельствует о том, что можно было бы принять и другое решение, если бы не существовало на гребне автомобильной дороги первой категории, где осадки, особенно неравномерные, недопустимы.

Гигантские размеры затворов и мостовых переходов потребовали нестандартных решений при их монтаже [8].

Сооружение КЗС сопровождалось натурными наблюдениями с установкой закладной КИА, в основном струнного типа, по проектам ВНИИГ (В. С. Кузнецов и А. П. Николаев). Всего в сооружении заложено 5800 датчиков.

На заключительном этапе строительства полностью оформлена геодезическая сеть для наблюдений за осадками и смещениями сооружений, состоящая из системы базисных, опорных реперов и осадочных марок.

Созданная система наблюдений [9] достаточна и позволяет давать достоверную оценку сооружениям.

В настоящее время по проекту ВНИИГ создается информационно-диагностическая система (ИДС) контроля состояния ГТС. ИДС особенно актуальна для сооружений КЗС, испытывающих нагрузку только во время наводнений, а зафиксировать эту нагрузку возможно лишь путем автоматической записи показаний КИА.

Информационно-диагностическая система предназначена для контроля состояния гидротехнических сооружений; повышения эффективности их технической эксплуатации и обслуживания; своевременного обнаружения и предотвращения возникновения и развития аварийных ситуаций, снижения рисков аварий и непредвиденных расходов; оптимизации эксплуатационных расходов, обеспечивающих необходимый уровень безопасности; своевременного планирования и подбора вариантов воздействий на базе анализа результатов регулярных инструментальных и визуальных наблюдений, осмотров и обследований зданий и сооружений.

Системой натурных наблюдений установлено, что в настоящее время показатели надежности и безопасности гидротехнических сооружений КЗС не превышают критериальных значений.

На ранее возведенных сооружениях (северные части КЗС, туннели) осадки и смещения не превышают точности показаний измерительной аппаратуры. Продолжаются осадки вновь возведенных сооружений (южной части туннеля и примыкающей к ней части дамбы Д-3). Динамика осадок контролируется с участием ВНИИГ. Процесс консолидации сооружений и их оснований пока не вызывает опасений. Напряжения в бетоне и арматуре составляют не более 25 % от несущей способности, что следует считать нормальным явлением, так как замеры выполнены при отсутствии проектных нагрузок.

ВНИИГ оказывает научно-техническую помощь в подготовке КЗС к вводу в эксплуатацию.

Проводятся детальные обследования ГТС, созданы правила их эксплуатации, написаны производственные инструкции, формируется база нормативно-технических документов для эксплуатационного персонала, подготовлена декларация безопасности гидротехнических сооружений, установлены критерии их безопасности.

ВНИИГ принимает активное участие в подготовке и обучении эксплуатационного персонала КЗС с получением документов Ростехнадзора на право выполнения работ по эксплуатации и ремонту сооружений.

Под руководством автора статьи по научно-техническому обеспечению эксплуатации КЗС работают пять отделов ВНИИГ и ведущие специалисты А. Л. Гольдин, В. Б. Судаков, В. Б. Штильман, Т. С. Тихонова, Д. В. Мишин, В. М. Доненберг, В. С. Кузнецов, А. П. Николаев и др.

Планируемая дата ввода в эксплуатацию гидротехнических сооружений Комплекса защитных сооружений г. Санкт-Петербурга от наводнений — 2011 г.

Список литературы

1. *Кураев С. Н., Мошков Л. В., Севенард Ю. К.* Защита устьевых участков рек и прибрежных территорий от морских наводнений // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1992.
2. *Севенард Ю. К.* Основные этапы строительства комплекса сооружений защиты Ленинграда от наводнений // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1989. Т. 213.
3. *Мошков Л. В.* Гидравлические исследования в обосновании компоновки защитного комплекса и проектов отдельных сооружений // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1989. Т. 213.
4. *Маневич Я. З.* Обоснование основных параметров генеральной гидравлической модели Невской губы // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1989. Т. 213.
5. *Судаков В. Б., Гинзбург Ц. Г., Костыря Г. З.* и др. Бетоны с новыми добавками ПАВ для основных сооружений защиты Ленинграда от наводнений // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1989. Т. 213.
6. *Павич М. П., Пахомов О. А., Радченко В. Г.* Исследование плотности моренного суглинка в сооружениях защиты г. Ленинграда от наводнений // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1983. Т. 165.
7. *Севенард Ю. К., Ройко И. Ф.* Производственный эксперимент по пионерной отсыпке моренного суглинка в воду на большую глубину // Энергетическое строительство. 1985. № 11.
8. *Колушев И. Е., Николаев В. Е., Герасимов А. Г.* Уникальный объект — уникальные технологии // Гидротехника. 2010. № 1.
9. *Василевский А. Г.* Система наблюдений за состоянием гидротехнических сооружений комплекса защитных сооружений г. Санкт-Петербурга от наводнений // Гидротехника. 2010. № 1.

Сооружения на континентальном шельфе

Глаговский В. Б., Финагенов О. М., доктора техн. наук
(ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”)

Освоение континентального шельфа в настоящее время является одной из первоочередных задач Российской Федерации и мирового сообщества. Проблемы, возникающие при проектировании и строительстве стационарных морских ледостойких платформ, соизмеримы по сложности с аналогичными проблемами при создании крупных энергетических объектов в суровых климатических условиях, которыми ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” занимается традиционно. В рамках направления проводится научно-техническое сопровождение разработки ТЭО и рабочих проектов сооружений на шельфе.

Ключевые слова: континентальный шельф, стационарные морские ледостойкие платформы, ледовые и волновые нагрузки, сейсмические нагрузки, инженерно-геологические изыскания, расчет устойчивости, бетонные конструкции, защита от размыва

С 1989 г. ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” принимает активное участие в обосновании и разработке ТЭО и технических проектов стационарных сооружений на шельфе морей России. Результаты исследований, проведенных в институте, используются в следующих проектах платформ на шельфах:

о. Сахалин — месторождения Пильтун-Астохское, Лунское, Аркутун-Даги и Чайво;

п-ов Ямал — Харасавейское и Крузенштерновское месторождения;

Балтийское море — Кравцовское (Д-6) месторождение;

шельф Баренцева моря — Штокмановское месторождение (ГКМ);

Печорское море — месторождение Приразломное;

Северный Каспий — месторождения им. Корчагина и Филановского.

При проектировании стационарных нефтегазодобывающих платформ на континентальном шельфе возникает большое количество вопросов, обусловленных уникальностью проекта, сложностью климатических условий в районе предполагаемого строительства, а также наличием методически отличающихся подходов и даже определенных расхождений между расчетными положениями различных нормативов (как российских, так и зарубежных).

При проектировании опорных частей гравитационных платформ на шельфе в ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” проводилась следующая научно-исследовательская работа

анализ инженерно-геологических условий площадок строительства, схематизация основания, состава и значений необходимых расчетных характеристик;

определение расчетных значений сейсмических, ледовых и волновых нагрузок на платформы;

оценка устойчивости платформ под воздействием статических и динамических нагрузок.

Кроме того, для обеспечения надежности сооружений на всех стадиях их возведения (установки и

эксплуатации в проекте необходимо было выполнить следующие расчеты и оценки:

расчеты несущей способности основания и устойчивости системы “платформа — грунтовое основание” при различных сочетаниях нагрузок с учетом реальных свойств грунтов основания;

расчеты консолидации грунтов основания, включающие определение избыточного порового давления;

расчеты вертикальных и горизонтальных перемещений и кренов платформы;

расчеты напряжений, передаваемых от грунта основания на юбки и днище опорной плиты платформы; разработку мероприятий, исключающих возникновение растягивающих напряжений на контакте опорных оснований с грунтом;

расчеты возможности размывов и разжижения примыкающего к подошве сооружения грунта и разработку необходимых конструктивных мероприятий;

расчеты для определения условий установки платформы с вдавливанием юбок в грунт основания; оценку условий подъема платформы.

При этом решались следующие задачи:

анализировались действующие отечественные и зарубежные нормативные документы в части определения состава требований по нагрузкам и воздействиям;

выбирались наиболее адекватные и обоснованные подходы к назначению нормативных значений нагрузок;

определялись возможные расчетные сочетания нагрузок и коэффициенты сочетаний;

разрабатывались методики и программы расчетных исследований устойчивости и прочности платформ.

Решение поставленных задач обеспечивало необходимый уровень надежности и безопасности платформ.

Кроме того, институт участвовал в разработке:

разделов технических проектов по указанным выше вопросам;

специальных технических условий и нормативных документов по определению свойств грунтов морского дна при статических и динамических воздействиях, определению нагрузок и воздействий на морские стационарные ледостойкие сооружения, проектированию оснований и опорных конструкций стационарных сооружений на шельфе;

разделов технических проектов по вопросам, относящимся к конструкциям верхних строений стационарных сооружений на шельфе, с проведением верификационных расчетов на различные природные и техногенные нагрузки и их сочетания.

Геотехнические характеристики грунтов

Геотехнические характеристики грунтов, определяемые в процессе полевых и лабораторных исследований, должны не только максимально соответствовать природному состоянию грунтов, но и адекватно прогнозировать изменения их свойств в результате воздействий, связанных с установкой сооружений. Оптимизация общего объема исследований, в частности, путем выбора разумного соотношения количества полевых и лабораторных испытаний — основная задача, которая решалась нами при составлении программы инженерно-геологических изысканий.

При исследованиях грунтов шельфа возникают специфические сложности, наиболее значительными среди которых являются:

переслаивание грунтов в пределах одного ИГЭ, когда даже соблюдение требования ГОСТа к необходимому для статистической обработки количеству опытов не гарантирует достоверную оценку характеристики ввиду большого разброса результатов;

невозможность выполнения требуемого по ГОСТу количества лабораторных определений из-за высокой стоимости самих лабораторных определений, а также высокой стоимости и сложности пробоотбора.

Поэтому в зарубежной практике основным методом исследования морских грунтов является статическое зондирование (РСРТ), результаты которого широко используются для определения физико-механических характеристик путем использования корреляционных зависимостей. При этом лабораторные определения (часто всего 2 – 3 опыта на ИГЭ) выполняются только для корректировки коэффициентов в корреляционных зависимостях.

Для анализа значимости полевых и лабораторных исследований на примере определения сопротивления недренированному сдвигу s_u грунтов площадки Приразломная нами были выполнены исследования, показывающие, что для глинистых оснований достоверная оценка устойчивости может быть обеспечена только сочетанием полевых и лабораторных исследований. Особенно это касается слабых грунтов, когда на устойчивость сильно влияет вес сооружения. Однако в том случае, если

наиболее вероятной схемой разрушения будет плоский сдвиг, величина ошибки может оказаться приемлемой и количество лабораторных опытов можно минимизировать.

При лабораторных испытаниях грунтов площадки Приразломная была выполнена большая работа по усовершенствованию методики определения прочности грунтов в нестабилизированном состоянии.

Разумное сочетание полевых и лабораторных методов исследований грунтов было обосновано и реализовано в проекте “Сахалин 2”.

Обоснованные на базе этих исследований методики вошли в разработанную по заказу ЗАО “Росшельф” “Методику лабораторных испытаний слабых высокопористых грунтов арктического шельфа” и частично — в новую редакцию СП “Основания гидротехнических сооружений”.

Нагрузки и воздействия

Волновые нагрузки и воздействия на опорные элементы сооружений должны определяться на основе расчетов по апробированным инженерным методикам с помощью программных приложений. Для уточнения процессов взаимодействия сооружений с морским волнением используются данные физического моделирования.

Для различных этапов строительства и эксплуатации сооружений находятся:

горизонтальные и вертикальные волновые силы, моменты этих сил (средние значения, амплитуды и относительные фазы сил и моментов, распределение и повторяемость амплитуд за время расчетного шторма);

волновые давления на напорные поверхности сооружений;

максимальные возвышения волновой поверхности над спокойным уровнем воды;

волновые давления на грунт в пределах призмы выпора грунта.

Волновые нагрузки и воздействия определяются с учетом действия ветра и морского течения. При этом принимаются наиболее неблагоприятные, но реальные сочетания интенсивности волнения, уровня воды, скорости ветра и течения.

Волновые нагрузки на сооружения для эксплуатационного периода (волновые силы, моменты и давления) определяются на основе расчетных моделей нерегулярных и регулярных волн.

Ледовые нагрузки на платформы в целом должны приниматься по наибольшему из значений, определенных при действии различных ледовых образований. Глобальная ледовая нагрузка определяется как для групп вертикальных шахт при различной их ориентации относительно направления движения льда (с учетом их взаимного влияния и затенения), а в случае забивки льдом пространства между опорами — как для вертикального цилиндра с диа-

метром, равным наибольшему расстоянию между наружными границами шахт.

При оценке сейсмической опасности предусматривается двухуровневый подход, позволяющий обеспечивать необходимую надежность оценки сейсмических нагрузок на проектируемые сооружения Сахалинского шельфа.

Нижний уровень — это “проектные землетрясения” (ПЗ). Опорные основания платформ должны воспринимать ПЗ без угрозы для людей и с сохранением собственной ремонтпригодности. При этом допускаются остаточные смещения, деформации, напряжения, трещины и иные повреждения, не нарушающие нормальную эксплуатацию объекта.

Верхний уровень — это “максимальное расчетное землетрясение” (МРЗ). Опорные основания платформ должны обладать способностью воспринимать МРЗ без угрозы собственного разрушения. При этом допускаются любые иные повреждения, в том числе нарушающие нормальную эксплуатацию объекта.

Анализ сейсмических воздействий включает последовательный анализ реакции площадки, взаимодействия сооружения с грунтом и реакции сооружения.

Первый этап сейсмических расчетов — нахождение реакции площадки, которое позволяет определить ускорения свободной поверхности грунта в отсутствие сооружения.

Анализ взаимодействия сооружения с грунтом составляет второй этап сейсмических расчетов. Анализ взаимодействия сооружения с грунтом используется для калибровки модели реакции сооружения. Целью является разработка упрощенной модели грунта для использования в анализе реакции сооружения. Другой целью является оценка устойчивости и несущей способности основания. В этом случае проводится тщательный расчет взаимодействия сооружения и грунта с использованием детальной модели грунта и упрощенной модели сооружения.

Анализ взаимодействия сооружения с грунтом проводится для всех сооружений, не стоящих на скальном основании. Исходными данными для расчетов являются движения свободной поверхности грунта около юбок гравитационных сооружений или свай.

Анализ реакции сооружения составляет третий и последний шаг сейсмического анализа. Анализ реакции сооружения включает определение реакций сооружения и палубного оборудования для использования их в проектировании. Движения свободной поверхности грунта, соответствующие глубинам юбок гравитационных сооружений или свай, являются исходными данными для анализа реакции сооружения. Сейсмические реакции комбинируются с другими базовыми нагрузками для проверки

пределов прочности, устойчивости, усталости и работоспособности.

В анализе реакции сооружения используется детальная модель сооружения. При этом можно использовать упрощенную модель основания с сосредоточенными параметрами, частотно-зависимыми жесткостью, затуханием и присоединенными массами воды, полученную на основе анализа взаимодействия сооружения с грунтом.

Используются следующие типы анализа реакции сооружения:

- линейный или нелинейный временной анализ;
- линейно-спектральный анализ;
- эквивалентный статический анализ.

Нелинейный временной анализ проводится для шельфовых гравитационных сооружений и платформ на свайном основании для учета поведения грунта и свай, особенно при максимальном землетрясении, которое влияет на реакцию платформы.

Анализ реакции сооружения дает все реакции, необходимые для проектирования, включая обобщенные реакции, например: сдвиги и опрокидывающие моменты, смещения и повороты фундамента, усилия в элементах, перемещения, напряжения, деформации, ускорения, скорости и смещения палубы. Эти реакции даются в виде записей по времени, спектров реакции или максимальных и минимальных значений. Анализ реакции сооружения дает ускорения, скорости и смещения палубы в виде записей по времени или спектров.

Расчетные критерии надежности системы “гравитационная платформа — грунтовое основание”

Критерий несущей способности системы регламентирует требования к соотношению между силовым воздействием на нее (F_d) и силой сопротивления (R_d). Критерий несущей способности системы должен соблюдаться при всех возможных схемах достижения предельного равновесия (плоского и глубинного сдвига при различном потенциально возможном очертании поверхностей сдвига).

Уровень надежности системы считается обеспеченным, если расчетная нагрузка F_d не превосходит расчетного сопротивления R_d , полученных по Det norske Veritas (1995) с использованием метода частных коэффициентов:

$$F_d \leq R_d. \quad (1)$$

Расчетная нагрузка получается путем умножения нормативной нагрузки F_k на заданный нагрузочный коэффициент γ_f :

$$F_d = \Sigma \gamma_f^i F_k^i. \quad (2)$$

Расчетное сопротивление может быть вычислено делением нормативного сопротивления R_k на коэффициент надежности по грунту γ_g :

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_g}. \quad (3)$$

Альтернативный подход к оценке уровня надежности системы “платформа — основание” регламентируется российскими нормами, в соответствии с которыми критерий несущей способности может быть также представлен выражением (1), но где

$$F_d = \frac{\gamma_n \gamma_{ic}}{\gamma_c} \Sigma F_k^i \gamma_f^i \text{ — обобщенное расчетное си-$$

ловое воздействие; R_d — обобщенная расчетная сила сопротивления, определенная с учетом коэффициентов надежности по нагрузке γ_f и грунту γ_g ; F_k — нормативное значение нагрузки; γ_f — коэффициент надежности по нагрузке; γ_c — коэффициент условий работы; γ_n — коэффициент надежности по ответственности; γ_k — коэффициент сочетаний нагрузок.

При оценке несущей способности системы по результатам расчетов напряженно-деформированного состояния производится сопоставление F_d и силового воздействия F_{lim} , приводящего систему в предельное равновесие. В этом случае критерий имеет следующий вид:

$$F_d \leq F_{lim}. \quad (4)$$

При сейсмических нагрузках уровня МРЗ и невыполнении принятых критериев для окончательного суждения о надежности системы “платформа — основание” рекомендуется выполнить расчеты деформаций конструкции и сравнить их с допустимыми деформациями, установленными проектом.

Кроме того, рассматриваются еще следующие критерии надежности системы.

Критерий предельного эксцентриситета в приложении равнодействующей нагрузок устанавливает требования, направленные на исключение возможности предельного состояния при больших эксцентриситетах в приложении нагрузок относительно центра подошвы платформы, обуславливающих возникновение отрыва части подошвы от основания.

Критерий предельного эксцентриситета определяется выражением

$$e \leq e_{lim}, \quad (5)$$

где e — эксцентриситет приложения равнодействующей всех расчетных нагрузок (за исключением бокового давления грунта), действующих на платформу; e_{lim} — предельно допустимое значение эксцентриситета равнодействующей расчетных нагрузок

относительно центра тяжести площади подошвы платформы, устанавливаемое расчетами.

Критерий предельных смещений определяет требования, направленные на исключение возможности появления опасного состояния, связанного с нарушением условий нормальной эксплуатации платформы.

Критерий предельных смещений определяется выражением

$$S \leq S_u, \quad (6)$$

где S — расчетное значение совместной деформации основания и сооружения (осадки s , горизонтальные перемещения u , крены i и др.); S_u — предельное значение совместной деформации основания и платформы, устанавливаемое проектом и правилами технической эксплуатации оборудования (при назначении S_u необходимо учитывать возможность нарушения нормальной эксплуатации связанных с сооружением коммуникаций).

Критерий величины давления грунта на элементы конструкции устанавливает требования, направленные на исключение возможности опасных состояний, связанных с нарушением прочности элементов конструкции, обусловленным давлением (отпором, реакцией) грунта.

Критерий должен соблюдаться для всех элементов конструкции, соприкасающихся с грунтом, и для сочетаний нагрузок.

Критерий предельного давления (отпора) грунта определяется выражением

$$P \leq P_{lim}, \quad (7)$$

где P — характерное значение эпюры давления грунта, определяемой с использованием 2-D конечно-элементного расчета; P_{lim} — предельно допустимая величина характерного значения эпюры давления (отпора) грунта. Величина P_{lim} соответствует предельно допустимым наибольшим напряжениям в юбках и прилегающих участках подошвы платформы по условиям статической и усталостной прочности.

Критерий по разжижению грунтов производится при наличии в основании или ядре платформы водонасыщенных несвязных грунтов. Оценка возможного разжижения этих грунтов следует производить при сейсмических воздействиях. Для такой оценки используется либо методика с использованием результатов циклических трехосных испытаний потенциально способных к разжижению грунтов, либо методика, основанная на определении предельных сдвиговых динамических деформаций. По этому критерию определяются зоны разжижения грунтов (зоны предельного состояния), допустимые величина и расположение которых устанавливаются на основе общего анализа совместной работы сооружения с грунтом.

Критерий по разжижению грунтов, основанный на определении предельных сдвиговых динамических деформаций, определяется выражением

$$\gamma^{dyn} < \bar{\gamma}_{lim}, \quad (8)$$

где γ^{dyn} — сдвиговые динамические деформации, определяемые по результатам расчета НДС системы “сооружение — грунтовое основание”; $\bar{\gamma}_{lim}$ — критические значения сдвиговых деформаций, определяемые по данным виброкомпрессионных исследований образцов грунта.

По этому критерию определяются зоны разжижения грунтов (зоны предельного состояния), допустимые величина и расположение которых устанавливаются на основе общего анализа совместной работы сооружения с грунтом.

При установке платформы должна быть гарантирована возможность вдавливания юбок в грунт основания на всю высоту, что обеспечивает надлежащие условия совместной работы платформы с грунтовым основанием.

Критерий обеспечения условий установки определяется выражением

$$P \geq R, \quad (9)$$

где P — расчетное значение вертикальной силы, передаваемой от платформы на грунтовое основание в момент ее установки; R — расчетное значение силы сопротивления грунта вдавливанию юбок.

Математическое моделирование платформ при расчетах устойчивости и прочности

На всех стадиях проектирования стационарных морских ледостойких платформ широко используются методы математического моделирования напряженно-деформированного состояния системы “основание — платформа”. Существующий арсенал программных комплексов, в том числе реализующих метод конечных элементов, позволяет без лишней идеализации учитывать основные особенности системы и сочетаний нагрузок, отмеченные выше.

В ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” для обоснования надежности сооружений на различных стадиях установки и эксплуатации используются такие программы, как “ДИСК-Геомеханика”, “Устойчивость” и “Dolphin” (разработки ВНИИГ), “Plaxis”, “ANSYS”, “LS-DYNA”, “ABAQUS”, “COSMOS/M”. Расчеты проводятся на плоских и трехмерных моделях системы и ее элементов.

Расчеты несущей способности системы “платформа — основание” проводятся как инженерными методами по наперед заданным поверхностям сдвига или механизмам разрушения, так и методом численного моделирования разрушения основания.

Расчет прочности железобетонного опорного основания гравитационного типа (ОГТ) основывается на определении напряженно-деформированного состояния конструкции. Расчетами охватываются основные и особые сочетания нагрузок и воздействий зимнего и летнего периодов эксплуатации сооружения в соответствии с требованиями российских нормативных документов.

Модель сооружения выполняется в виде системы железобетонной конструкции опорного основания и грунтового массива. Напряженно-деформированное состояние конструкции от собственного веса ОГТ, веса верхнего строения, от гидростатического давления воды оценивается на первом этапе расчетов и рассматривается как начальное состояние сооружения, предшествующее восприятию временных и особых нагрузок.

Расчеты на основное сочетание нагрузок и воздействий проводятся в статической постановке, при рассмотрении особого сочетания с сейсмическим воздействием решается динамическая задача с учётом работы фрикционных маятниковых подшипников на контакте верхнего строения с ОГТ.

Проводится анализ напряженно-деформированного состояния конструкции опорного сооружения, определяются зоны и величины максимального растяжения и сжатия. Выполняется сравнительная оценка влияния на напряженно-деформированное состояние сооружения различных нагрузочных сочетаний. На рис. 1 приведен пример результатов расчета главных напряжений, возникающих в ОГТ от ледовой нагрузки.

Обоснование прочности несущих конструкций верхнего строения платформы (ВСП) проводится на основе расчетов для наиболее существенных комбинаций нагрузок, являющихся определяющими для работы сооружения.

Рассматриваются следующие расчетные ситуации:
погрузка ВСП на баржу;
транспортировка ВСП;
установка ВСП;
эксплуатация (основные и особые сочетания нагрузок).

Расчетами охватываются основные и особые сочетания нагрузок и воздействий на сооружение. Учитывается вес верхнего строения эксплуатационного периода, ветровые и снеговые нагрузки и нагрузки от гололеда, температурные нагрузки, нагрузки при погрузке ВСП на баржу, его транспортировке и установке.

Особые сочетания нагрузок включают:
сейсмическое воздействие на ВСП;
воздействие взрыва.

Также производится проверка элементов стальных конструкций верхнего строения платформы на выносливость. Выполняются:

анализ расчётов опоры подъёмного крана на выносливость;

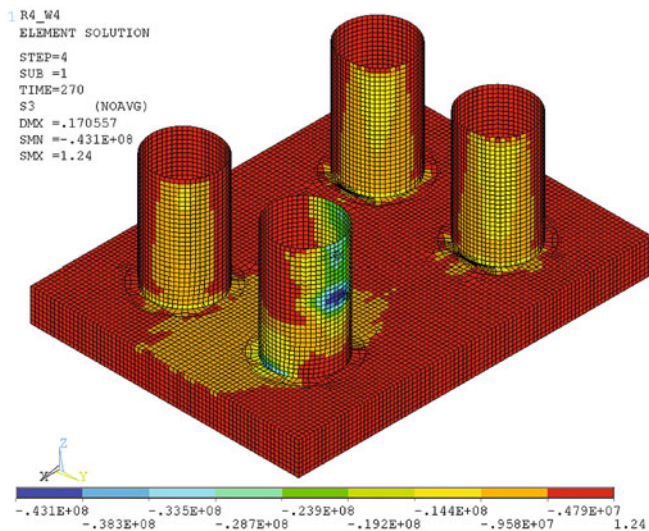


Рис. 1. Наименьшие главные напряжения от ледовой нагрузки, Па

расчет опорных элементов конструкций пьедестальных кранов на малоцикловую прочность; анализ чувствительности к длительным вибрационным явлениям элементов конструкции факельной стрелы под действием ветра.

Исследования защиты от размывов

В 1996 г. были проведены экспериментальные исследования защиты от размывов для морской платформы месторождения Приразломное. По результатам проведенных исследований показано, что для условий месторождения Приразломное устройство защиты от размывов вблизи МЛСП в виде несортированной каменной наброски обеспечивает надежную защиту дна от размывов.

В 2004 г. проводились также дополнительные экспериментальные исследования защиты от размывов для морской платформы месторождения Приразломное для варианта ее конструкции без защитной юбки. По результатам проведенных исследований рекомендовано двухслойное крепление с



Рис. 2. Модельная площадка ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” при исследованиях защиты от размывов вблизи платформы “Приразломная”



Рис. 3. Модель платформы “Арктун-Даги” (масштаб 1:60) с защитой от размывов

защитным слоем из несортированной каменной наброски и слоем фильтра из щебня. Даны также рекомендации по очередности возведения защиты от размывов на период установки платформы. Экспериментальная площадка с моделью платформы “Приразломная” с защитой от размывов показана на рис. 2.

В 2000 г. ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” совместно с ЦНИИ им. А. Н. Крылова принимало участие в экспериментально-расчетных исследованиях по определению воздействия на грунтовое основание от двигателей танкеров, швартующихся к платформе “Приразломная” в условиях тихой воды и волнения. По результатам исследований даны оценки размеров ямы размыва, образующейся при работе винтов пришвартованного к платформе танкера, и высоты отложений вынесенного из ямы грунта.

В 2010 г. ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” совместно с “Alkyon” (Голландия), “Aker Solutions” (Норвегия) и “DHI” (Дания) принимало участия в экспериментальных исследованиях защиты от размывов для платформы месторождения Арктун-Даги (Сахалин 1). Особенностью защиты от размывов для платформы “Арктун-Даги” являлось то, что эта защита от размывов была динамической (т.е. в отличие от статической защиты динамическая защита от размывов может деформироваться при расчетных воздействиях, не теряя при этом своей основной функции защиты от размывов дна). Экспериментальные исследования проводились для нерегулярного волнения при наличии течения с их различными направлениями по отношению к платформе. По результатам проведенных исследований рекомендовано на углах прямоугольной платформы “Арктун-Даги” установить специальные обтекатели, позволяющие существенно снизить деформацию крепления в угловых зонах платформы. Отработан окончательный вариант двухслойной защиты от размывов, состоящей из слоя фильтра и защитного слоя каменной наброски. Рекомендовано перед установкой платформы произвести укрепления



Рис. 4. Транспортировка железобетонного основания для установки на месторождение

дна отсыпкой гравия для предотвращения недопустимых размывов дна в период инсталляции платформы на место. Модель платформы “Аркутун-Даги” с защитой от размывов показана на рис. 3.

В процессе работы исследовалась также защита от размывов для трубопроводов. Показано, что устройство защиты от размывов для трубопроводов из каменной наброски обеспечивает надежную (фактически статическую) защиту дна от размывов трассы трубопроводов вблизи платформы.

Технологии бетона и бетонных работ

Мировая практика показала преимущества применения для морских платформ бетонных конструкций.

В проекте морской ледостойкой платформы “Приразломная” рассматривался вариант использования бетона для заполнения балластных цистерн бортовых стенок и коффердамов (2000 – 2001 гг.). В ходе выполнения работы проведены экспериментальные испытания разработанных в ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” составов бетонной смеси в натуральных условиях.

В 2002 – 2004 гг. специалисты ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” совместно с компанией “ARUP” (Великобритания) в рамках проекта “Сахалин-2” принимали участие в проектировании нефтегазовых платформ для Лунского (Лун-А) и Пильтун-Астокского (ПА-Б) месторождений. Во ВНИИГ проведен анализ проектных решений конструкций железобетонных опорных оснований платформ, назначены проектные требования к бетону, разработаны и утверждены специальные технические условия.

При возведении конструкций опорных оснований платформы применен плотный, высокопрочный, морозостойкий и водонепроницаемый бетон.

Проектные требования к бетону:
опорный кессон — В60 F200 W16;
колонны — В60 F500 W20;
перекрытия колонн — В50 F200 W12.

Работы по изготовлению железобетонных опорных оснований производились в 2004 – 2005 гг. на территории порта Восточный (Приморский край, п. Врангель) в сухом доке. Бетонирование конструкций осуществлялось как с применением переставной опалубки — при бетонировании нижней и верхней плит кессона, так и с применением скользящей опалубки — бетонирование стен кессона и колонн. В 2005 г. изготовленные железобетонные основания установлены на месторождения в Охотском море, и в настоящее время платформы успешно эксплуатируются (рис. 4 и 5).

В 2008 – 2011 гг. специалисты ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” совместно с генеральным проектировщиком — компанией “Aker Solutions” (Норвегия) принимали участие в проектировании и строительстве нефтяной платформы для месторождения Аркутун-Даги (проект “Сахалин-1”). С конструктивной точки зрения данная платформа похожа на ранее изготовленные платформы для проекта “Сахалин-2”. Исходя из условий эксплуатации сооружения и действующих на него нагрузок к бетону опорного основания предъявляются следующие требования:

В60 F100 W16 — для кессона и колонн до отм. + 13,40 м;

В85 F100 W16 — для колонн до отм. + 26,10 м;

В85 F500 W12 — для колонн до отм. + 40,30 м;

В85 F400 W12 — для колонн до отм. + 46,625 м;

В60 F400 W12 — для колонн до отм. + 54,70 м.

Для бетонирования конструкций опорного основания проекта “Сахалин-1” в ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” совместно со специалистами



Рис. 5. Пильгун-Астокское месторождение. Платформа ПА-Б (лето 2010 г.)

“Aker Solutions”, “Sintef” (Норвегия) проведены разработки и исследования бетонов. На основании результатов лабораторных исследований качества материалов и бетонов производилась апробация составов в производственных условиях на опытных моделях. По результатам модельных испытаний назначены составы бетона, которые в настоящее время рекомендованы для бетонирования основных конструкций опорного основания.

Работы по изготовлению опорного основания начались в мае 2010 г. в сухом доке на территории порта Восточный (Приморский край, п. Врангель). По аналогии с проектом “Сахалин-2” бетонирование конструкций производится как с применением переставной опалубки — при бетонировании нижней и верхней плит кессона, так и с применением скользящей опалубки - бетонирование стен кессона и колонн (рис. 6). Бетонирование конструкций ОГТ планируется завершить в конце осени 2011 г.

Заключение

Проблемы, возникающие при проектировании и строительстве стационарных морских ледостойких



Рис. 6. Изготовление ОГТ платформы “Аркутун-Даги” (октябрь 2010 г.)

платформ, соизмеримы по сложности с аналогичными проблемами при создании крупных энергетических объектов в суровых климатических условиях.

Имея богатый опыт научно-исследовательских, внедренческих, опытно-конструкторских работ в области гидротехнического и энергетического строительства ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” с конца 80-х гг. прошлого столетия успешно включилось в работы по обоснованию технических проектов стационарных сооружений на шельфе морей России.

Нашими заказчиками являются такие компании, как “Газпром”, “Росшельф”, “Sakhalin Energy”, “Exxon Mobil”, “BP”, “Aker Solutions”, “ARUP” и др. Разработанные методики и опыт участия в научном обосновании проектирования и строительства крупнейших гидротехнических объектов позволили получить результаты, которые были использованы при разработке проектов и строительстве платформ для Приразломного, Пильгун-Астокского, Лунского, Аркутун-Даги и других нефтегазовых месторождений, а также терминалов для отгрузки нефти и газа на Охотском море.

Сдано в набор 20.08.2011. Подписано в печать 12.09.2011. Формат 60×84 1/8.

Печать офсетная. Печ. л. 13,0. 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”
