

Научно-технический и производственный сборник

# БЭС

Безопасность  
энергетических  
сооружений



Вып. 15  
2005

## КОЛЛЕКТИВУ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ПРИРОДООБУСТРОЙСТВА

*Уважаемые коллеги!*

*Коллектив «Научно-исследовательского института энергетических сооружений» и редакционная коллегия сборника БЭС поздравляет коллектив Московского государственного университета природообустройства со славным юбилеем — семидесятилетием со дня основания!*

*Славная история вуза начинается в далеком 1930 году, но по праву датой его возникновения считается июнь 1894 г. За этот долгий период институт сменил много названий. Он был Московским инженерно-мелиоративным институтом, Московским институтом гидротехнического строительства, Московским гидромелиоративным институтом, Московским институтом инженеров водного хозяйства, входил в состав МСХА им. К.А.Тимирязева, а в настоящее время гордо именуется — Московский государственный университет природообустройства.*

*В 70 — 80-е годы МГМИ заслуженно занял ведущее положение в системе подготовки кадров и научного обеспечения в области мелиорации и водного хозяйства. В институте используется многолетний опыт подготовки специалистов по широкому спектру естественно-научных, социально-экологических, природоведческих и других направлений высшего профессионального образования. Творческие усилия ученых и педагогов МИИВХ-МГМИ-МГУП, их достижения ныне совершенствуются плодотворной деятельностью профессорско-преподавательского состава. Слаженная и целеустремленная работа педагогического коллектива МГУП, включая его основные кафедры, а также кафедры общеобразовательного плана, способствует подготовке высококвалифицированных специалистов и ученых.*

*Современное название ВУЗа отразило его базовую ориентацию на подготовку специалистов нового типа, способных применять широкий спектр инженерных методов в сфере охраны природы и экологии. В настоящее время подготовка специалистов ведется на шести факультетах и более чем по 17 специальностям. Выпускники ВУЗа трудятся в проектных, научно-исследовательских, строительных организациях и вносят существенный вклад в дело развития российской энергетики, гидротехники и мелиорации. Практически в каждом отделе и центре ОАО «НИИЭС» работают выпускники МГМИ-МГУП.*

*Несмотря на сложные экономические условия, сложившиеся в России в последние годы, на реформирование науки и образования МГУП сохранил свой кадровый потенциал, продолжает приумножать свой педагогический коллектив квалифицированными специалистами, включая молодые научно-технические кадры. Московский государственный университет природообустройства занимает устойчивое положение среди строительных и энергетических ВУЗов России.*

*Уважаемые коллеги, друзья!*

*Редакционная коллегия сборника желает Вам в этот знаменательный день творческих успехов, больших трудовых достижений, осуществления всех планов, благополучия.*

**Российское открытое акционерное общество энергетики и электрификации  
«Единая энергетическая система России»  
(ОАО РАО «ЕЭС России»)**

---

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

# **БЕЗОПАСНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ СБОРНИК**

**Выпуск 15**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ  
СООРУЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**Москва  
2005**

УДК 621.311

Председатель редакционного совета: к.т.н. С.О. Бритвин  
Научный редактор: д.т.н. И.Н. Ивашенко  
Технический редактор Т.А. Григорьева  
Выпускающий редактор А.Г. Мелихова

**Безопасность энергетических сооружений.** // Научно-технический и производственный сборник. Вып. 15. ОАО «НИИЭС». М.: 2005. 208 с. (цв. вкл. — 8 с.)

Проблема безопасности гидротехнических сооружений весьма многообразна. Некоторые общие вопросы обеспечения безопасности рассмотрены в первой части настоящего сборника. Особое внимание уделено практике реализации положений Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений» при декларировании безопасности ГТС, разработке критериев безопасности, оценке вреда от возможных аварий ГТС. Во второй части сборника приведены результаты исследований безопасности конкретных сооружений. В представленных разработках технических решений главное внимание уделено фильтрационным проблемам, с которыми связано большинство наблюдаемых в процессе эксплуатации локальных разрушений и повреждений ГТС.

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

Строительный проезд, д. 7а  
Факс: (095) 363 56 51

ISBN 5-902144-07-8

© ОАО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений», 2005

## **АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

*Бритвин С. О., кандидат техн. наук,  
Иващенко И. Н., доктор техн. наук (ОАО «НИИЭС»)*

Практика реализации положений Федерального закона 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» (далее — Закона) определила тематику статей настоящего сборника трудов НИИ энергетических сооружений. ОАО «НИИЭС» являлся головной научно-исследовательской организацией по разработке проекта Закона и по сопровождению проекта при его рассмотрении в органах исполнительной и законодательной власти. Принятый в 1997 г. Закон соответствует мировой тенденции законодательного регулирования безопасности гидросооружений [1]. В нашей стране на основе Закона создана система обеспечения безопасности гидросооружений: Закон формулирует требования к собственнику (эксплуатирующей организации), определяет статус и функции единого государственного органа исполнительной власти, специально уполномоченного для надзора за безопасностью гидросооружений, а также дает четкий перечень нарушений Закона и определяет ответственность за указанные нарушения. Прошедшие годы подтвердили эффективность Закона.

В соответствии с Законом часть положений и требований в рассматриваемой сфере определена Постановлениями Правительства Российской Федерации. К числу важнейших следует отнести следующие Постановления: № 1320 от 16.10.97 «Об организации государственного надзора за безопасностью гидротехнических сооружений»; № 490 от 23.05.98 «О порядке формирования и ведения Российского регистра гидротехнических сооружений»; № 1303 от 06.11.98 «Об утверждении Положения о декларировании безопасности гидротехнических сооружений».

В настоящее время в стране создана также и необходимая для практической реализации требований Закона нормативно-методическая база, включающая в том числе документы [2, 3, 4, 5].

Центральным моментом реализации требований Закона является процедура составления, экспертизы и утверждения органом надзора Декларации безопасности гидросооружений. Составлению Декларации в обязательном порядке раз в пять лет (или иной, более короткий срок, который может быть установлен органом надзора в случае нарушений требований безопасности) предшествует комиссионное обследование состояния эксплуатируемых сооружений. Без утверждения Декларации безопасности эксплуатация гидросооружения не допускается.

Сотрудники ОАО «НИИЭС» имеют большой опыт участия в процедурах Декларирования безопасности гидросооружений и реализации требований Закона в части:

*разработки (или пересмотра) Деклараций безопасности, составляемых на стадии проектирования, сдачи в эксплуатацию или в процессе эксплуатации гидросооружений, а также при их сопровождении в процессе утверждения в Ростехнадзоре России;*

*разработки критериев безопасности ГТС в соответствии с РД 153-34.2-21.342-00 «Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений», М., 2001 и сопровождения в процессе утверждения в Ростехнадзоре России;*

*участия в экспертизе Деклараций безопасности гидросооружений, эксплуатируемых в различных отраслях хозяйства нашей страны;*

*расчета параметров волны прорыва, образующейся в случае аварии, а также оценки вероятного ущерба в результате аварии ГТС в соответствии с «Методикой определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварий гидротехнических сооружений предприятий топливно-энергетического комплекса», М., 2004;*

*выполнения поверочных расчетов устойчивости и фильтрационной прочности сооружений, а также фильтрационных расходов через эти сооружения и их основания;*

*ревизии и оценки работоспособности системы КИА, разработки предложений по ее модернизации и ремонту, изготовления и монтажа на сооружениях необходимых измерительных устройств и технических средств;*

*разработки и поставки компьютерных систем хранения, обработки данных натурных наблюдений и диагностики состояния сооружений;*

*многофакторного анализа состояния эксплуатируемых ГТС в соответствии с требованиями действующих ПТЭ;*

*разработки технических решений (включая разработку проекта и рабочих чертежей) для устранения причин снижения уровня безопасности ГТС, указанных в экспертном заключении органа надзора.*

На основе обобщения накопленного опыта можно сформулировать перечень некоторых наиболее характерных случаев отступлений от требований Закона:

*локальные разрушения и повреждения ГТС (низкая эффективность или полная неработоспособность противофильтрационных устройств и дренажных систем, смачивание низовых откосов, фильтрационные деформации, очаговые выходы фильтрационных вод на низовых откосах земляных плотин, сопровождающиеся выносом мелких фракций, периодическое локальное разрушение каменного банкета плотины с выносом камня образовавшимся льдом; интенсивные значительные осадки сооружений напорного фронта, продольные трещины на гребне грунтовых плотин и дамб, значительные разрушения, в том числе вследствие волновых воздействий, крепления, локальные обрушения, частичный размыв верхового откоса; заиление водопропускных отверстий, оползание подводной части откосов, заиление, уменьшение живого сечения каналов);*

*несоответствие некоторых фактических конструктивно-компоновочных параметров ГТС их проектным значениям и нормативным требованиям (несоответствие повышенному в процессе эксплуатации классу ГТС, несоответствие возросшим расчетным, в том числе сейсмическим, воздействиям; несоответствие отметки порога водосброса проектной отметке, несоответствие отметки гребня земляной плотины нормативным требованиям при форсированном подпорном уровне, отсутствие парапета на гребне земляной плотины; непроектное заложение откосов, наличие пониженных участков гребня, отсутствие крепления откосов дамб; отсутствие или заиление дренажных призм, превышение допустимых градиентов фильтрационного потока, в том числе на входе в дренаж; отсутствие, повреждение или несоответствие проекту количества установленной на ГТС контрольно-измерительной аппаратуры).*

К числу общих недостатков, ведущих к снижению уровня безопасности эксплуатируемых гидросооружений, следует также отнести:

*отсутствие или низкое качество критериев безопасности, а также оценок параметров волны прорыва и ущербов от возможных аварий;*  
*несоответствие объема и периодичности контроля состояния ГТС требованиям действующей нормативной документации, не-*

*возможность достоверной оценки состояния сооружений, отсутствие материалов обработки и нерегулярность анализа данных; отсутствие современных, адаптируемых к возможным изменениям состояния сооружений и условий эксплуатации, компьютерных систем диагностики состояния сооружений*

*отсутствие или недостаток данных о параметрах внешних воздействий и нагрузок и возможности превышения проектных значений этих параметров, а также данных о физико-механических свойствах материалов оснований, сооружений, конструкций и их изменении в процессе эксплуатации.*

Существенным нерешенным полностью вопросом является оценка риска аварии ГТС. Необходимость такой обобщенной оценки безопасности справедливо указана в документах, на основании которых осуществляется декларирование безопасности ГТС. Указание действующего СНиП 33-01-2003 [2] о допустимости вероятностных оценок риска при обосновании проектных решений является своевременным, важным и весьма прогрессивным. В то же время, как это следует из приведенного перечня недостатков и отступлений от требований Закона (являющихся, по существу, факторами безопасности), большинство из них может быть оценено только на качественной основе и в силу этого обстоятельства не может быть непосредственно представлено в вероятностной форме. Поэтому, в частности, оценки риска аварии эксплуатируемых ГТС, приводимые в Декларациях безопасности, весьма часто носят формальный характер. В этой связи актуальна разработка формализованных методов оценки нечеткостей, связанных с необходимостью учета качественного характера ряда факторов безопасности.

Важно отметить, что излишняя формализация и стандартизация содержания Деклараций безопасности весьма распространена и является серьезным недостатком, так как зачастую затрудняет выявление основных опасностей и, соответственно, принятие необходимых мер по предотвращению аварий.

Важным достижением истекшего после принятия Закона периода явилась достигнутая стабильность ситуации в сфере обеспечения безопасности гидросооружений нашей страны. Однако некоторые тревожные факты все же имели и имеют место. Так, несколько лет назад была предпринята попытка отменить действие Закона, включив взамен некоторые общие и достаточно формальные положения Закона в «Водный Кодекс». Указанная попытка не имела успеха. При этом весьма

положительную роль сыграла совместная решительная позиция ОАО «НИИЭС» и ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» по защите Закона, поддержанная рядом академиков РАН и ведущих специалистов-гидротехников нашей страны.

Однако в настоящее время ведется разработка технического регламента, название которого полностью повторяет название Закона. Технический регламент, в случае его принятия, также приобретает статус Федерального закона. Двойственная ситуация, связанная с наличием двух Федеральных законов, имеющих одинаковые названия, может, безусловно, понизить эффективность реализации требований Закона. Поэтому название указанного технического регламента должно быть изменено, а его содержание не должно дублировать содержание Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений».

Также необходимо отметить, что с вводом в действие технического регламента отменяется СНиП 33-01-2003 [2]. Данный СНиП является, безусловно, прогрессивным нормативным документом. В нем нашли отражение и конкретизированы требования Закона в части:

необходимости разработки специального проекта натурных наблюдений в составе проекта гидротехнических сооружений;

необходимости разработки Декларации безопасности и критериев безопасности в качестве обязательных частей проекта и указаний об их корректировке в процессе эксплуатации гидросооружений;

оценки возможных материальных и социальных ущербов от потенциальной аварии ГТС с нарушением напорного фронта;

применения современных технических и программных средств систем мониторинга состояния ГТС;

применения современных локальных систем оповещения об угрозе прорыва напорного фронта.

Эти положения действующего СНиП необходимо включить в состав технического регламента.

Важным вопросом является учет накопленного опыта составления Деклараций безопасности. В этой связи безотлагательным является утверждение и регистрация в установленном порядке «Дополнительных требований к декларированию безопасности гидротехнических сооружений объектов энергетики», разработка которых предписана постановлением Правительства РФ №1303 от 06.11.98 (см. статью Радкевича Д.Б., Асарина А.Е., Рассказова Л.Н. и др. в настоящем сборнике).

Необходимо отметить еще одну важную задачу, касающуюся организации единого Федерального органа исполнительной власти, специально уполномоченного для надзора за безопасностью ГТС. Создание такого органа предусмотрено Законом. Частично эта задача решена путем создания Ростехнадзора, объединившего ранее разрозненные службы надзора Минэнерго России, Минтранса России и Госгортехнадзора России. Хотя теперь основные опасные гидросооружения находятся под единым надзором (эти гидросооружения создают около 95% общего объема водохранилищ России), все же большое количество водоподпорных сооружений находится пока вне сферы деятельности Ростехнадзора. Необходимость создания единого органа надзора неоднократно подчеркивалась на разных уровнях власти, а особая актуальность ее решения связана с тем, что именно на указанных небольших сооружениях возникает самое большое количество аварий и аварийных ситуаций.

Проблема безопасности гидротехнических сооружений весьма многообразна. Некоторые общие вопросы обеспечения безопасности рассмотрены в первой части настоящего сборника. Особое внимание уделено практике реализации положений Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений» при декларировании безопасности ГТС, разработке критериев безопасности, оценках вреда от возможных аварий ГТС. Во второй части сборника приведены результаты исследований безопасности конкретных сооружений. В представленных разработках технических решений главное внимание уделено фильтрационным проблемам, с которыми связано большинство наблюдаемых в процессе эксплуатации локальных разрушений и повреждений ГТС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Брэдлоу Д. Нормативно-правовая база безопасности плотин. М.: «Весь мир». 2003.
2. СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Госстрой России, М.: 2004.
3. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений. РД 153-34.2-21.342-00, М.: 2001.
4. Пособие к «Методике определения критериев безопасности гидротехнических сооружений». М.: 2004.
5. Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварий гидротехнических сооружений предприятий топливно-энергетического комплекса. М., 2004 (Методика утверждена приказом МЧС России и Минэнерго России от 29 декабря 2003 г. 776/508).

## **I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

### **СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСЧЕТНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ ПРОЕКТИРУЕМЫХ И ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ГИДРОУЗЛОВ**

*Асарин А.Е., доктор техн. наук (Филиал ОАО «Инженерный  
центр ЕЭС — «Институт Гидропроект»»)*

Необходимость составления настоящего обзора используемых в мировой и российской проектной практике методических подходов к нормированию и обеспечению гидрологической безопасности гидротехнических сооружений определяется значением и ответственностью правильного выбора параметров водосбросных устройств, роль которых, судя по анализу мировой статистики аварий плотин, является решающей.

В статье рассматриваются два аспекта гидрологической безопасности: нормирование или выбор расчетной вероятности превышения максимального притока к сооружениям и методы его расчета и обоснование адекватных параметров водопропускных устройств.

#### **1. Современные подходы к назначению расчетной вероятности превышения максимального стока**

Большая часть ныне действующих в России нормативных и полунормативных (рекомендательных) документов разработана и введена в действие, в основном, в 1980-е годы в составе норм строительного проектирования бывшего Советского Союза. Составление документов нового поколения, предполагаемое законом о техническом регулировании, только начинается — их состав, структура и полномочия довольно смутны.

Расчетная вероятность превышения максимальных расходов воды паводья (паводка) регламентируется СНиП 33-01-2003 «Гидротехнические сооружения. Основные положения» применительно к четырем классам ответственности напорных сооружений, соответствующих высоте плотины, инженерно-геологическим характеристикам ее основания и хозяйственной роли гидроузла и водохранилища.

В значительной части передовых гидростроительных стран, в первую очередь в США, выбор вероятности расчетного паводка основан на оценке последствий разрушения плотины в случае наступления паводка, превосходящего принятый в качестве расчетного при назначении параметров водосбросных сооружений. Угроза человеческой жизни и крупный экономический ущерб при гидротехнической аварии могут служить основанием для существенной реконструкции существующих гидроузлов и для принятия сложных, подчас чрезвычайно капиталоемких, инженерных решений, а иногда явиться причиной для отказа от строительства объекта.

Для приближения особо ответственных гидроузлов к абсолютной (практически недостижимой) или близкой к ней надежности в США было сформулировано и снабжено инженерным расчетным аппаратом понятие Максимальный Вероятный Паводок (МВП, в английской транскрипции PMF — probable maximum flood), до сих пор не использовавшееся при проектировании гидросооружений в СССР и в России.

#### ***Обзор подходов и методов назначения расчетной вероятности превышения***

Идеология вероятностного нормирования максимальных расходов воды при гидротехническом проектировании сформировалась в США и СССР уже в начале 1930-х годов. В «Гидроэлектрическом справочнике» американских инженеров Кригера и Джестина [5] указывалось: «Так как стоимость плотины возрастает с размерами максимального паводка, на который она рассчитана, там, где повреждение плотины не угрожает человеческим жизням, принято рассчитывать водосбросные сооружения на 50-летний (т.е. повторяемостью раз в 50 лет) или даже на 20- или 10-летний паводок, если можно доказать, что периодические ремонты для устранения причиняемых им повреждений более выгодны, чем вложение дополнительных средств на увеличение пропускной способности водослива с расчетом на более высокие паводки. При этом, однако, всегда следует учитывать то обстоятельство, что хотя

$n$ -летний паводок имеет повторяемость раз в  $n$  лет, паводок больше  $n$ -летнего может случиться во всякое время и даже повториться за короткий промежуток времени.

При проектировании больших сооружений, расположенных выше крупных населенных центров, в расчет следует принимать 1000-летние или даже 10000-летние паводки»<sup>1</sup>.

Несколько позднее в США пришли к выводу, что в случаях, когда разрушение плотины может привести к значительным человеческим потерям и крупным материальным ущербам, плотина и водохранилище должны быть рассчитаны на пропуск максимального вероятного паводка (МВП). В США метод МВП используется при проектировании практически всех новых и актуализации проектов существующих плотин [11].

В 1932 г. в монографии С.Н.Крицкого и М.Ф.Менкеля [6] была предложена классификация гидротехнических сооружений с позиций расчетной обеспеченности максимального расхода воды, удивительно напоминающая нормативы, принятые в Советском Союзе и в ряде стран через несколько десятилетий.

В ныне действующих в России строительных нормах (СНиП 33-01-2003 «Гидротехнические сооружения. Основные положения») [8] ежегодная вероятность превышения максимальных расходов воды<sup>2</sup> регламентируется в зависимости от класса сооружений для двух расчетных случаев — основного и поверочного (табл. 1).

*Таблица 1*

Расчетный случай	Ежегодная вероятность превышения, %, в зависимости от класса сооружения			
	I	II	III	IV
Основной	0.1	1.0	3.0	5.0
Поверочный	0.01 с гар. попр.	0.1	0.5	1.0

Идеология современного подхода к выбору или назначению вероятности превышения расчетного паводка при проектировании речных гидроузлов в большинстве развитых и развивающихся стран, а также в некоторых слабо развитых странах, проекты для которых разрабатываются при техническом содействии специалистов американских или европейских фирм, излагается ниже (в основном по материалам Бюллетеня ICOLD № 82 [13]).

*Общие принципы.* Выбор расчетного паводка зависит от степени риска, ожидаемого в случае превышения расчетного или поверочного паводка. Он влияет как на безопасность плотины,

<sup>1</sup>сноски в конце статьи

так и на размеры водосбросных сооружений и дополнительно объема водохранилища, необходимого для срезки пика расчетного паводка.

Во многих случаях последствия разрушения плотины могут быть столь тяжелыми, что даже самая малая вероятность прорыва вообще недопустима. При менее серьезных последствиях незначительная вероятность прорыва может допускаться, и тогда затраты на обеспечение надежности гидроузла можно сократить. В действительности невозможно запроектировать абсолютно безопасный гидроузел и с некоторой вероятностью его прорыва необходимо согласиться, исходя из того, что с практической точки зрения событие, имеющее очень малую вероятность наступления, можно считать невозможным.

При определении расчетного паводка первой задачей является установление принимаемой, т.е. допустимой, степени безопасности. В идеале выбор следует делать, основываясь на технических и экономических соображениях, относящихся к гидроузлу и условиям в его бьефах. Однако если дело касается, как это часто бывает, человеческих жизней, то психологические, моральные или политические аспекты перевешивают. В таких случаях действуют, придерживаясь обычаев или правил, которые в разных странах весьма различны.

Так, в некоторых странах, в том числе в отдельных штатах США, административные или руководящие органы выдают более или менее точные директивы, которые помогают выбрать расчетные условия в зависимости от возникающих в случае прорыва последствий.

Безопасность подпорных сооружений определяется величиной паводка, который может привести к разрушению плотины. Этот разрушительный паводок может соответствовать расчетному, если тот определяют методом максимизации (максимальный вероятный паводок или МВП), но может и значительно превышать его, поскольку в ряде случаев при выборе размеров водосбросных сооружений учитываются как реальные, так и надуманные технические ограничения, скрытым образом обеспечивающие дополнительный запас надежности, и гидроузел может «вынести» существенно более высокий максимум.

Часто предполагают, что расчетный паводок приходит в уже наполненное до НПУ водохранилище и при этом в нижний бьеф сбрасывается расход, равный максимальному среднесуточному притоку, рассчитанному по продолжительному ряду наблюдений. В действительности, к началу расчетного паводка водохра-

нилише может быть сработано и располагать аккумулярующим объемом, а сброс воды в нижний бьеф гидроузла еще до достижения НПУ может быть больше приточного расхода. Такие гипотезы в сочетании с сохранением запаса гребня плотины над максимальным расчетным уровнем воды ведут к очень высокой, однако плохо определяемой степени безопасности.

В последние десятилетия во многих странах (также как в России, а ранее в СССР) имеет место разделение аспектов безопасности плотины и определения размеров водосбросных сооружений. На практике этот подход ведет к определению двух расчетных паводков:

расчетного или проектного (Design Flood) паводка, который в нормальных условиях должен пропускаться через гидроузел с запасом надежности, обеспечиваемым заданным превышением гребня плотины над уровнем воды. Обычно этот паводок оценивают или с заданной вероятностью превышения (0,1; 0,01%; ...) или в долях (процентах) от МВП;

«безопасного паводка», называемого также «поверочным» (Safety Check Flood), соответствующего пределу, за которым неизбежен прорыв плотины, то есть не дающего дополнительного запаса прочности и зачастую равного МВП.

Выбор расчетного паводка и определение размеров водосбросных сооружений теоретически основываются на технических и экономических соображениях и на анализе ущербов в случае прорыва плотины, однако они зависят также и от того, насколько можно доверять исходным данным, от технических параметров сооружения и от ограничений, принимаемых во внимание при расчетах водосбросных и подпорных сооружений.

На этот выбор влияют многие факторы, однако в первую очередь должна учитываться надежность исходных данных, важнейшим показателем которой является продолжительность периода гидрологических наблюдений. В российской проектной практике при определении максимального притока к особо ответственным сооружениям в максимальный расход вероятностью превышения 1/10000 вводится так называемая ГАРАНТИЙНАЯ ПОПРАВКА тем большая, чем короче гидрологический ряд<sup>3</sup>. Прочие факторы связаны со структурой гидроузла (тип плотины, тип водосбросного сооружения, величина превышения гребня плотины над уровнем воды, эффект срезки максимума водохранилищем), а также с наличием водохранилищ выше по течению или крупных населенных пунктов или хозяйственных объектов в нижнем бьефе рассматриваемого гидроузла.

*Риск в нижнем бьефе.* Для оценки этого риска следует оценить уровень воды в нижнем бьефе при разрушении плотины, который в ряде случаев будет намного превышать возможные естественные паводки.

Обычно устанавливают связь между параметрами водохранилища и параметрами прорывной волны и рассчитывают ее трансформацию по мере продвижения по речной долине.

Возможные ущербы в нижнем бьефе плотины можно распределить по трем категориям:

людские потери;

прямые экономические потери в результате ущербов, причиненных собственности: жилью, сельскохозяйственным, производственным или торговым строениям и т.д.;

косвенные экономические потери, связанные с функциями гидроузла, теряемыми при его разрушении: выработка электроэнергии, подача воды на водоснабжение и орошение, регулирование паводков, влияние на окружающую среду и т.д.

Поскольку срок существования плотин как эксплуатируемых, так и намечаемых измеряется десятилетиями, возможные ущербы от их разрушения должны оцениваться с учетом будущего экономического развития, т.е. роста стоимости собственности в зоне возможного затопления в долине реки.

*Экономический анализ.* Повышение надежности плотины ведет к увеличению ее стоимости. Необходимо найти равновесие между надежностью и стоимостью.

Теоретический подход заключается в установлении оптимального экономического соотношения между стоимостью подпорных и водосбросных сооружений и размером ущербов, которые хотят предотвратить.

Практическое использование метода анализа экономического риска сопряжено со многими трудностями:

оценка стоимости разрушений и их последствий (ущербов) редко бывает простой операцией и в большинстве случаев приводит к неточному результату, что приводит к необходимости использовать «вилку» значений;

в случае риска людских потерь<sup>4</sup> оказывается весьма сложно или даже невысказимо по психологическим, моральным или политическим причинам установить размер денежных средств, выплачиваемых за каждую жертву. Однако эту проблему частично можно разрешить путем оценки стоимости системы оповещения (только если населенные пункты расположены на достаточном удале-

нии от плотины и время добегания позволяет использовать оповещение, предупреждение) и эвакуации населения в нижнем бьефе, необходимой для предупреждения человеческих жертв.

Таким образом, экономический подход оказывается утопическим, как только речь заходит о больших плотинах, разрушение которых поставило бы под угрозу население нижнего бьефа (особенно при наличии крупных населенных пунктов, которые стремятся обеспечить «абсолютной гарантией»). Напротив, этот подход может представлять интерес, когда нет риска потерять человеческие жизни, то есть в случаях, когда объекты располагаются в безлюдных районах или непосредственной близости от моря, озера, а также в случае плотин, образующих небольшие водохранилища.

*Безопасность и общественное мнение.* Трудно оценить, как повлияет разрушение плотин на общественное мнение, однако можно предположить, что общество не потерпит повторения такого несчастья в одном и том же регионе чаще чем (например) раз в 40 лет. В этом случае необходимо принять меры, чтобы для всех имеющихся в регионе (или стране) плотин вероятность двух разрушений за период менее 40 лет могла бы считаться пренебрежимо малой. Эта вероятность задается законом Пуассона, и чтобы она, например, не превышала 2% за 40 лет, нужно, чтобы в среднем разрушение происходило только один раз в 200 лет.

*Национальные нормы и правила, регламентирующие расчетную вероятность превышения паводка.* Используемым в разных странах — Австралии, Бразилии, Китае, Испании, США, Финляндии, Чехии — методам определения расчетных паводков были посвящены доклады, представленные на 16-й конгресс по большим плотинам (Сан-Франциско, 1988), на международный симпозиум «Плотины и экстремальные паводки, Гренада (Испания), 1992 и на 18-й конгресс по большим плотинам (Дурбан, ЮАР, 1994).

В ряде стран нет формальных правил для установления расчетного паводка, а есть только простые приемы, используемые применительно к каждому конкретному случаю. В других странах, например в США, Великобритании, Австралии, Швейцарии и ЮАР, имеются рекомендации научных комиссий и руководящих органов. В практике ряда швейцарских проектных фирм и бюро для всех гидроузлов рассчитывается максимум вероятностью превышения 0,1%, для наиболее ответственных он увеличивается в 1,5 раза. И, наконец, кое-где в Польше, Чехии и Японии величина принимаемого расчетного паводка устанавливается в законодательном или административном порядке.

Единственной страной (помимо бывших соцстран), где требования к безопасности плотин уже 15 лет назад были регламентированы законом, является Португалия (Декрет от 06.01.90). Эти требования распространяются на плотины высотой более 15 м или плотины меньшей высоты, создающие водохранилища объемом более 100 тыс.м<sup>3</sup>. В них расчетная повторяемость (вероятность превышения) максимального паводкового притока зависит от типа и высоты плотины ( $h$ ) и потенциального риска, т.е. потерь при ее разрушении.

При наличии в стране действующих норм или правил вероятность превышения расчетного паводка выбирается на основе классификации гидроузлов, которая обычно определяется с учетом значения и функций гидроузла и его технических характеристик, а чаще — исходя из последствий возможного прорыва.

В качестве примера можно назвать указания Национального Австралийского комитета по большим плотинам (ANCOLD), основанные на классификации нанесенных паводками дополнительных ущербов, то есть ущербов, связанных с разрушением плотины и превосходящих те, что могут иметь место в экстремальные паводки при отсутствии гидроузлов.

В 1990 г. в Швеции в результате совместных усилий гидроэнергетиков (ассоциация предприятий по регулированию речного стока) и специалистов национального гидрометеорологического института были выпущены нормы, регламентирующие обеспеченность проектных паводков. Эти нормы не являются общешведским законом, однако их рекомендации, выработанные и согласованные множеством специалистов и фирм, строго соблюдаются шведскими гидроэнергетическими предприятиями.

В некоторых случаях при определении (переоценке) уровня безопасности эксплуатируемых гидроузлов выясняется, что расчетные максимальные расходы воды требуют уточнения (в большую сторону) в связи с прохождением в период эксплуатации гидроузла экстремальных паводков, либо оказывается необходимым повысить их класс, изменить расчетную вероятность превышения и, соответственно, увеличить пропускную способность водосбросных устройств.

Причиной этих изменений обычно является застройка пойменных земель в нижнем бьефе гидроузла, а значит, увеличение собственности и числа человеческих жизней, подверженных угрозе потерь при прорыве плотины. Выходом из положения в этих случаях является понижение отметки порога существующих водо-

сбросов (с затворами) или строительство дополнительных (аварийных) береговых водосбросов или плавких вставок (в т.ч. hydroplus), изменение функций и режима наполнения (сработки) водохранилища. В России примером необходимости пересмотра класса построенных сооружений является Ириклинский гидроузел на р. Урал с плотиной высотой 43 м, относящийся ко второму классу и рассчитанный на половодья вероятностью превышения 1% (основной случай) и 0,1% (поверочный случай). Через несколько дней после постройки гидроузла рядом с ним была введена в эксплуатацию Ириклинская ГРЭС установленной мощностью 3200 МВт, обеспечиваемая водой из Ириклинского водохранилища, являющегося водоемом-охладителем ГРЭС. Класс гидроузла, обслуживающего ГРЭС, поднялся до первого и оказалось, что пропускная способность существующих водосбросов на 6000 м<sup>3</sup>/с меньше требующейся для пропуска расчетного половодья. Строительство дополнительного водосброса в плотно застроенной зоне расположения гидроузла оказалось крайне затруднительным. Поиски конструктивного решения продолжаются по сей день.

## **2. Основные методы расчета максимального стока**

### *Общий обзор методов расчета*

Можно выделить два подхода к оценке расчетного паводка, применяемые в разных странах мира.

Первый подход заключается в максимизации, т.е. получении как бы предельно возможных гидрометеорологических параметров на водосборном бассейне, чтобы обезопасить себя от самых страшных природных явлений:

наибольший расход воды, когда-либо наблюдавшийся в данном створе, умножают на коэффициент запаса (2, 3, 4..., где остановиться?);

строят огибающие кривые для рекордных максимальных зарегистрированных в различных районах мира паводковых расходов в зависимости от площади водосборного бассейна. Однако даже если делать это по регионам, все равно речь идет о смешении событий, имеющих различную вероятность;

максимальный вероятный паводок (МВП) рассчитывается по максимальным вероятным осадкам (МВО) в отдельных пунктах водосборного бассейна, которые распространяют на весь бассейн посредством функции переноса, задаваясь гипотезой о поглощении водосбором.

Второй подход заключается в том, чтобы приписывать экстремальным паводкам некую вероятность превышения и рассчитывать ее — подбор (подгонка) функций распределения (законы вероятности) типа Гумбеля, Фреше, лог.Пирсона 3 рода и ряда других к многолетним (за несколько десятилетий) данным о максимальных годовых паводковых расходах воды и экстраполяция кривых распределения на малые вероятности превышения  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$ .

К числу вероятностных методов условно можно отнести так называемые региональные, основанные на объединении гидрологических наблюдений на группе рек на гидрологически однородных территориях и построении эмпирических кривых распределения вероятностей.

Специального внимания заслуживают методы, основанные на моделях «осадки — сток» и рекомендуемые к использованию национальными организациями многих стран. Наиболее популярным (и детально разработанным) является упомянутый выше метод МВП. Освоение этого метода, включенного в число рекомендуемых СНиП [7], российскими гидрологами<sup>5</sup> крайне желательно, имея в виду как перспективы участия в проектах гидроузлов в странах муссонного климата, так и требования международных банков-кредиторов проверять проектируемые сооружения на условия пропуска МВП.

К обеим категориям подхода (максимизация осадков и статистический анализ) можно отнести и метод ГРАДЭКС, где повторяемость экстремальных расходов воды выводят из повторяемости экстремальных осадков, распределение которых подчиняется закону Гумбеля, опираясь при этом на несколько простых физических гипотез (преимущественно для малых и средних бассейнов). Этот метод разработан в конце 1960-х годов, а позднее усовершенствован специалистами «Электриситэ дэ Франс» [10,12] и широко применяется в проектах, выполняемых этим ведомством.

*Критика МВП.* У МВП имеются оппоненты, которые сомневаются как в обоснованности самого понятия, так и достоверности определения значения (слоя) *максимально возможных осадков* (МВО), лежащего в основе расчета МВП. Действительно, если в районах, расположенных в глубине континентов, можно говорить о предельно мыслимом слое осадков за период, необходимый для формирования паводка, то в зонах циклонической деятельности и, что создает дополнительные трудности исследователю, на территориях, куда заход циклонического фронта хотя бы минимально вероятен, понятие МВО становится количественно неопределенным. Кроме того, практически во всех географи-

ческих зонах остается неясным вопрос о территории, на которую могут выпасть МВО, т.е. о редукции максимального слоя осадков по площади. В то же время известно, что МВП, определенный для одного и того же пункта, с годами растет по мере увеличения ряда наблюдений за осадками, включающими выдающиеся штормы, учет которых приводит к увеличению МВО. Кроме того, при сопоставлении МВП с оценками максимумов, полученными по многим, в том числе и продолжительным, рядам, подчас выясняется, что вероятность его превышения, считавшаяся равной или близкой к нулю, составляет 0,1% и более.

Методы определения МВП, даже по мнению их авторов, имеют ограниченное применение, в некоторых работах называется предельная площадь бассейна 50 тыс. км<sup>2</sup>. Однако имеются примеры расчета МВП с максимизацией осадков на территориях в сотни тысяч квадратных километров.

В завершение раздела, затрагивающего вопросы практического использования этого весьма популярного в мире метода, представляется целесообразным привести следующие сведения.

Единственными, известными нам, примерами практического применения метода МВП в российской проектной практике являются выполнявшиеся в институте «Гидропроект» расчеты максимального стока р. Да во Вьетнаме [3] и р.Кванза в Анголе [4].

К этим результатам в 2005 г. прибавились расчеты МВП для гидроузла Рогун на р. Вахше в Таджикистане, проектирование и строительство которого предполагается осуществить с использованием кредитов международных банков.

Расчет параметров МВП в этом случае осложнялся необычными (не встречавшимися в известных нам проектах и публикациях) условиями питания реки, основная часть стока которой имеет ледниковое происхождение.

Композиция ледниковых максимумов р. Вахша с экстремально высокими ливневыми осадками, обычно не совпадающими по времени, дала следующие результаты (табл.2).

Таблица 2

Характеристика максимума	Значение, м <sup>3</sup> /с
Вероятность превышения 0,01% с г.п. по проекту Средазгидропроекта, 1977 г.	5710
по проработкам Гидропроекта: 2000 г. 2005 г.	6100 5700
МВП	7100-7500

Полученный А.Н.Жиркевичем результат неблагоприятен как для проекта Рогунского гидроузла, так и для существующего Ну-рекского гидроузла, рассчитанного на приточный (срезочный или мгновенный) максимум, равный 5720 – 5760 м<sup>3</sup>/с. Ведь до постройки Рогунского гидроузла, водохранилище которого (при высокой подпорной отметке), возможно, позволит срезать приточный расход на 10 – 15%, Нурекский гидроузел с насыпной плотиной, не рассчитанной на перелив через гребень, теоретически должен гарантировать (в течение 6 – 8 лет) пропуск расходов воды, величины которых приведены в табл. 2. Не ясно положение и со строящимся Сангтудинским гидроузлом, расчетный максимальный среднесуточный расход которого в проекте 1989 г. был принят равным 5406 м<sup>3</sup>/с (мгновенный вероятностью превышения 0,01% – 5760 м<sup>3</sup>/с).

#### *Статистические методы*

Наиболее распространенными (в России практически преобладающими) в большинстве стран являются статистические методы. Известно, что ряды гидрологических наблюдений и наблюдений за максимальным стоком, даже самые продолжительные (сто и более лет), существенно короче так называемого расчетного периода повторяемости (flood return period) максимальных расходов воды (1000 или 10000 лет) при проектировании ответственных гидротехнических сооружений. Для экстраполяции максимальных значений, получаемых на основании данных наблюдений до указанных периодов повторяемости или (в привычных терминах) до соответствующих вероятностей превышения (0,1 – 0,01%), применяются графические и аналитические методы. Простота графической интерполяции эмпирических кривых распределения, однако, не перекрывает возможных ошибок оценки расчетного максимума в связи с субъективным (подчас произвольным) очертанием кривой в зоне экстраполяции.

Более распространенным и надежным подходом является аналитическое описание распределения вероятностей максимального стока - подбор законов распределения вероятностей, наилучшим образом отвечающих эмпирическому материалу (данным наблюдений), определение закона и параметров кривых распределения и определение значений максимума любой заданной повторяемости (вероятности превышения).

Наиболее популярными в мировой гидрологической практике при оценке максимальных расчетных расходов воды являются распределения Гумбеля, Гудрича, Пирсона III и логнор-

мальное. Трехпараметрическое распределение Крицкого-Менкеля, широко применяемое в России (и в республиках, входивших в состав СССР), в Европе и США, известно лишь узкому кругу исследователей.

Гидрологи и математики ряда стран продолжают исследования по выбору типов и законов распределения вероятностей максимальных расходов воды, наилучшим образом отражающим эмпирический материал или природу явления. Швейцарский исследователь Г. Ломбарди [15] справедливо отметил, что распределение вероятностей тем лучше может соответствовать ряду наблюдений, чем больше в описывающей это распределение формуле свободных параметров. Однако число свободных параметров не может быть слишком большим, поскольку с его (числа) увеличением математическое распределение настолько приближается к эмпирическому, что всякая разумная и достойная доверия экстраполяция в сторону расходов, превышающих наблюдаемые, становится невозможной.

Представляет интерес выполненное Г. Ломбарди сопоставление квантилей (значений различной вероятности превышения) максимальных среднесуточных расходов воды, вычисленных по 77-летнему ряду (среднемаксимальный расход 2510 м<sup>3</sup>/с) с использованием различных законов распределения вероятностей (табл.3).

*Таблица 3*

Распределение	Максимальный расход воды, м <sup>3</sup> /с				предельный
	вероятностью превышения, %				
	50	1	0.1	0.01	
Логнормальное	2379	5864	7469	9016	-
Гумбеля	2312	6293	8463	10626	-
Пирсона III	2254	6375	8495	10487	-
Дважды лог. нормальное	2306	5113	5232	5265	5272

В числе сопоставляемых распределений, к сожалению, нет трехпараметрического распределения Крицкого-Менкеля, ближайшим «родственником» которого является распределение Пирсона третьего типа, дающее результаты, близкие к кривой Гумбеля.

Статистические методы определения параметров проектных паводков широко используются в практике КНР, где на основании сопоставления нескольких законов распределения вероятностей превышения максимального стока в качестве наилучшего было выбрано распределение Пирсона III [13].

*Критика статистических методов.* Значительная часть национальных организаций и проектных фирм ряда стран отдает предпочтение МВП, считая, что экстраполяция любых кривых распределения в зону крайне малых вероятностей превышения (0,1% и менее) — путь крайне ненадежный.

В некоторых случаях поводом для отказа от вероятностной выборочной оценки максимального расхода воды является наличие в ряду выдающегося максимума. Так при рассмотрении 27-летнего ряда максимальных расходов воды р. Зеруд а Сиди-Саад в Тунисе со средним максимальным расходом воды 840 м<sup>3</sup>/с вместо статистического анализа, признанного непригодным из-за наличия в ряду расхода в 17 тыс. м<sup>3</sup>/с, что в 15 раз больше второго по величине наблюдаемого максимума, оценен только МВП, принятый равным 32500 м<sup>3</sup>/с. Между тем применение к этому ряду трехпараметрического распределения Крицкого-Менкеля при  $C_s/C_v = 4$  дает следующие значения максимумов (табл. 4).

Таблица 4

P, %	0.01	0.1	0.5	1	5	10
Q, м <sup>3</sup> /с	35600	18400	10300	7700	3300	206

Примечательно, что в этом примере пиковый расход МВП несколько ниже максимума обеспеченностью 0,01%.

В числе недостатков вероятностных методов их противники называют следующие:

ни одно распределение вероятностей пиковых расходов паводков не имеет физического обоснования;

результаты тестовых оценок отражают свойства рядов наблюдений, являющихся ограниченными выборками из генеральной совокупности, закон распределения вероятностей и статистические параметры которой неизвестны;

отскочившие точки выборки могут сильно влиять на выбор типа распределения и на его параметры;

нет объективных приемов выбора закона распределения вероятностей, наилучшим образом отвечающего эмпирическому материалу по конкретной реке, на которой проектируется гидроузел.

Роль выбранного типа распределения вероятностей максимальных расходов воды и способа расчета статистических параметров для определения расчетных максимумов также иллюстрируют данные табл. 5 на примере р. Кейрабад в Иране — средний максимальный расход воды 697 м<sup>3</sup>/с (данные А.Н. Жиркевича).

Таблица 5

Распределение вероятностей и метод определения параметров	Статистические параметры			Максимальный расход воды при вероятности превышения		
	$\sigma, \text{м}^3/\text{с}$	$C_v$	$C_s$	1%	0,1%	0,01%
1. Двухпараметрическое логнормальное						
1.1. Метод моментов	551	-	1,17	2760	4770	7280
1.2. Метод наибольшего правдоподобия	551	-	-0,39	2760	4770	7280
2. Экстремальное Гумбеля I-го типа						
2.1. Метод моментов	551	-	1,17	2660	3770	4880
2.2. Метод наибольшего правдоподобия	551	-	-	2180	3040	3900
3. Пирсона III-го типа (метод моментов)	551	-	1,55	2550	3670	4800
4. Лог.Пирсона III-го типа (метод моментов)	0,379	-	-0,52	2750	4030	5270
5. Трехпараметрическое гамма-распределение (метод наибольшего правдоподобия)	551	0,81	2,43	2790	4520	6600
6. Биномиальное $C_s=2C_v$	551	1,0	2,0	3210	820	6420

Из приведенных в таблицах 3 и 5 примеров применения различных типов распределения вероятностей превышения максимальных расходов воды нельзя сделать однозначный вывод о преимуществах (или надежности) того или иного распределения. На наш взгляд, при наличии продолжительного (не менее 50 лет) ряда стоковых наблюдений предпочтительным является трехпараметрическое гамма-распределение при адекватном выборе<sup>6</sup> соотношения  $C_s/C_v$ . Также следует иметь в виду, что для рек с высокой изменчивостью максимального стока ( $C_v > 0,5$ ) статистические параметры распределения вероятностей надежнее вычислять методом наибольшего правдоподобия.

### 3. Выбор параметров водосбросных устройств

При определении пропускной способности водосбросных устройств помимо параметров гидрографа притока соответствующей (нормированной или выбранной с учетом каких-то специфических условий) вероятности превышения должны учитываться как технические факторы (глубинные или поверхностные сооружения, с затворами или без затворов, условия гашения энергии потока, наличие гидроузлов и водохранилищ выше по течению, трансформирующая способность водохранилища, ограничения по колебаниям уровня воды в верхнем и нижнем бьефах и т.п.), так и экономические соображения (рациональное соотношение стоимости водосбросных и подпорных сооружений, а также ущербов в нижнем бьефе при пропуске (сбросе) максимальных расходов воды).

#### *Порядок расчетов*

При двухуровневом (расчетный и поверочный) подходе к оценке условий пропуска через гидроузлы половодий и паводков простейшим первым шагом является подбор таких параметров водопропускных сооружений (размеры и число пролетов или отверстий, отметки порога), при которых максимальный приточный расход расчетного паводка (половодья) проходит через гидроузел при отметке НПУ. Это условие, являющееся одним из неписанных правил в российской проектной практике и означающее, что суммарная пропускная способность сооружений гидроузла должна быть равна максимальному приточному расходу расчетного паводка (половодья), не всегда выполнимо. Оно (условие) неосуществимо на гидроузлах с беззатворным водосливом с порогом на отметке НПУ, а также может вступать в противоречие с требованием к водопропускным устройствам обеспечивать пропуск максимального трансформированного (срезанного) расхода поверочного половодья или паводка при максимальном (форсированном) уровне верхнего бьефа. Пропускная способность сооружения, рассчитанного на транзитный (без срезки) пропуск максимального расхода расчетного паводка (половодья), может оказаться недостаточной в поверочный паводок в случаях, когда поверочный максимум существенно больше расчетного (что имеет место при больших значениях коэффициента изменчивости  $C_v$ ), а объем призмы форсировки и, соответственно, ее трансформирующие возможности относительно невелики, либо когда пропускная способность водосбросного устройства, например глубинного, незначительно изменяется при повышении уровня верхнего бьефа.

Максимальная пропускная способность водосбросных сооружений, соответствующая предельно высокой (допустимой) отметке уровня верхнего бьефа, теоретически должна подбираться путем итеративных технико-экономических расчетов. В результате этих расчетов подбирается сочетание размеров и стоимости водосбросных устройств и высоты форсировки, а значит отметки гребня плотины (и ее стоимости), дающее минимум суммарных затрат в эти сооружения и в зону затопления, естественно увеличивающихся с повышением отметки форсировки.

В случае, если гидроузел (и водохранилище) предназначен или должен, попутно с другими задачами, выполнять функции защиты от затопления населенных пунктов и/или промышленных объектов в нижнем бьефе гидроузла, водосбросные сооружения должны, с одной стороны, обеспечивать сброс ограниченного расхода воды, не приводящего к затоплениям в речной долине, с другой — гарантировать сохранность подпорных сооружений при наступлении паводка или половодья, вероятность превышения которого ниже расчетной при защите земель от затоплений (в российской проектной практике 1%).

Сигналом для полного открытия всех водосбросных пролетов, что означает отказ эксплуатационного персонала гидроузла от ответственности за безопасность земель в нижнем бьефе в пользу собственной безопасности, должно служить достижение или превышение уровнем верхнего бьефа гидроузла подпорной отметки, обеспечивающей регламентированное незатопление земель в нижнем бьефе в условиях 1%-й вероятности превышения.

При этом в расчетах по определению необходимой пропускной способности водосбросов проектируемых гидроузлов и оценке ее достаточности на существующих и, соответственно, оценке максимального уровня верхнего бьефа и максимального сбросного расхода воды следует учитывать, что к моменту наступления пика поверочного половодья (паводка) часть призмы форсировки будет заполнена в связи с ограничением сбросных расходов для предотвращения или уменьшения площади затоплений в нижнем бьефе плотины.

Примерами гидротехнических объектов с заданными противопаводковыми функциями являются Зейский гидроузел, введенный в эксплуатацию в 1978 г., и заканчивающийся строительством Юмагузинский гидроузел на р. Белой [2].

При проектировании зарубежных объектов и/или российских гидроузлов с предполагаемым участием западного капитала

может возникнуть необходимость проверки достаточности водосбросных устройств для пропуска максимального вероятного паводка (МВП)<sup>7</sup>. Выполняя такую проверку, особенно в случаях, когда максимальный расход МВП существенно больше поверочного максимума (например, обеспеченностью 0,01% с гарантийной поправкой), следует использовать все «поблажки», допускаемые пунктом 5.4.4 СНиП 33-01-2003 при пропуске поверочных половодий (паводков), а также упоминавшийся выше запас аккумулирующего объема и пропускной способности поверхностных водосбросов в диапазоне уровней от отметки ФПУ до отметки гребня плотины.

Сложной специфической задачей является определение расчетного и поверочного максимального притока к каскадно расположенным гидроузлам<sup>8</sup>. Согласно [6]: «На реках с каскадным расположением гидроузлов расчетные максимальные расходы воды для проектируемого гидроузла следует назначать с учетом его класса, но не ниже значений, равных сумме расходов пропускной способности вышерасположенного гидроузла и расчетных максимальных расходов боковой приточности на участке между гидроузлами, определяемых для основного и поверочного случаев в соответствии с классом создаваемого гидроузла».

Правила назначения расчетных приточных расходов воды к проектируемому гидроузлу, уточненные по сравнению с табл.3 указанного СНиП, приведены в табл. 6.

Методика и пример построения расчетных гидрографов боковой приточности между гидроузлами каскада приведены в [1].

#### ***Некоторые общие вопросы***

При определении максимальных расчетных приточных и сбросных расходов воды проектируемых и существующих (проверка уровня гидрологической безопасности) гидроузлов возникает вопрос о том, какие водопропускные устройства должны учитываться при пропуске расчетных и поверочных половодий и паводков.

В проектной практике некоторых европейских фирм иногда рассматривается возможность отказа (аварии) одного из (неизвестно скольких) затворов поверхностного водосброса. Рекомендуется, кроме того, учитывать возможность выхода из строя ГЭС, например, при обрыве или ином разрушении линии электропередач. Эти условия рассматриваются только применительно к расчетному (Design Flood) паводку. По-видимому, совпадение столь редких событий, как техническая авария на гидроузле или высоковольтной линии и поверочный (Safety Check Flood) паводок, считается невероятным.

Таблица 6

Расположение проектируемого гидроузла в каскаде	Класс проектируемого гидроузла выше класса существующего гидроузла	Класс проектируемого гидроузла ниже класса существующего гидроузла
Проектируемый гидроузел расположен ниже существующего.	Приточные расходы основного и поверочного случаев принимаются в соответствии с классом проектируемого гидроузла с учетом срезки максимума существующим водохранилищем. Оценивается сохранность выше расположенного гидроузла при прохождении половодья (паводка), соответствующего классу проектируемого гидроузла.	Приточные расходы основного и поверочного случаев определяются как сумма расхода, соответствующего полной пропускной способности существующего гидроузла при НПУ и расходов боковой приточности между створами гидроузлов, обеспеченностью соответствующей классу проектируемого гидроузла.
Проектируемый гидроузел расположен выше существующего	Расходы основного и поверочного случаев принимаются в соответствии с классом проектируемого гидроузла. Оценивается сохранность ниже расположенного гидроузла при прохождении половодья (паводка), соответствующего классу проектируемого гидроузла.	Расходы основного и поверочного случаев принимаются в соответствии с классом проектируемого гидроузла.

**Примечания:** 1. При одновременном проектировании нескольких гидроузлов, являющихся ступенями одного каскада, под существующим следует принимать гидроузел, ввод которого в эксплуатацию намечается раньше.

2. Для каскадов, состоящих из трех и более гидроузлов, описанная в таблице процедура должна выполняться последовательно для каждой пары гидроузлов сверху вниз по течению реки.

В СНиП [8] возможность отказа одного пролета водосброса (если их шесть и более) рекомендуется учитывать (рассматривать) в основном расчетном случае (Design Flood). Указаний об учете в полном либо неполном объеме пропускной способности турбин ГЭС в этом документе нет.

В то же время возможность выхода из строя или вывода в ремонт одного или нескольких агрегатов ГЭС в период пропуска высоких половодий (паводков) должна, на наш взгляд, учитываться при определении параметров водопропускных устройств гидроузла и оценке его гидрологической безопасности. Кроме того, как показывает опыт, иногда весьма затруднительно использовать полную пропускную способность всех турбин ГЭС, т.е. ее работу полной мощностью в течение длительного (несколько суток) времени. Это в первую очередь относится к регионам и энергосистемам с высокой долей ГЭС, суммарная установленная мощность которых (если высокое половодье охватило весь бассейн или значительную часть региона) не может быть принята потребителями. А использование пропускной способности турбин в режиме холостого хода — одна десятая номинального расхода — вряд ли эффективно.

Что касается возможности повреждения линий электропередач, то она зависит как от климатических условий территории (в зоне циклонов с ветрами со скоростью 30 м/с и более обрыв линий или падение опор более вероятны, чем в умеренных районах), так и от схемы выдачи мощности (количество цепей и линий). При выдаче мощности ГЭС в нескольких направлениях в расчетах пропуска максимального стока может учитываться (или не учитываться) пропускная способность части агрегатов (обрыв одной цепи).

Важнейшей практической задачей по повышению гидрологической безопасности эксплуатируемых гидроузлов (и, соответственно, населения и хозяйственных объектов в их нижних бьефах) являются уточнение их расчетных максимальных расходов воды и оценка достаточности пропускной способности водосбросных устройств. Методика и технические приемы определения расчетных максимумов и возможности их пропуска через существующие сооружения не отличаются от проектных.

Работа по оценке уровня гидрологической безопасности ГЭС в течение последних десятилетий ведется в США и ряде европейских стран (Швеция, Чехия и др.).

Такой пересчет, выполненный в Гидропроекте применительно к ряду крупных российских гидроузлов с ГЭС, не выявил ни заметного увеличения (по сравнению с проектами) максимальных расчетных расходов воды, ни недостаточности водопропускных сооружений.

Тем не менее, для существующих гидроузлов, с момента начала эксплуатации которых прошло 20 и более лет (а с момента составления проектов еще больше), необходим пересчет параметров и расчетных величин максимальных расходов воды и

объемов паводков и половодий (основной волны) с использованием полного ряда наблюдений, включая период эксплуатации, за который максимальные сбросные расходы воды должны ретрансформироваться в естественные приточные.

Так, удлинение гидрологического ряда наблюдений за максимальным стоком р. Да во Вьетнаме (1902 – 1975 гг.) на 21 год (1976 – 1996 гг.), последний из которых оказался самым высоким за 95-летний период (22700 м<sup>3</sup>/с при среднем максимальном расходе 9500 м<sup>3</sup>/с), привело к увеличению максимального расхода вероятностью превышения 0,01% с гарантийной поправкой с 37800 м<sup>3</sup>/с, принятого в проекте ГЭС Хоабинь, до 48400 м<sup>3</sup>/с.

<sup>1</sup> Встречающееся в иностранной литературе и разделяемое некоторыми российскими инженерами толкование максимального расхода воды вероятностью превышения, например, 1/100, 1/1000 или 1/10000, как расхода, повторяющегося один раз в сто, тысячу или в десять тысяч лет, некорректно. Та или иная величина вероятности превышения определяет эту вероятность в каждом данном году и не может служить для оценки срока, в течение которого этот расход может быть превышен.

<sup>2</sup> Иногда идет речь о вероятности превышения не только максимального расхода воды, а половодья или паводка, что подразумевает совпадение регламентируемых вероятностей превышения максимального расхода и объема половодного (паводкового) стока.

<sup>3</sup> Идеологически близкий прием применяют гидрологи КНР [16, 17].

<sup>4</sup> В рекомендациях Австралийского национального комитета по большим плотинам [14] предлагается расчетную вероятность превышения паводка принимать равной: при очевидном риске человеческих жертв при прорыве плотины — менее 0,01%; при маловероятных, но возможных жертвах — менее 0,1%.

<sup>5</sup> В настоящее время нам известен лишь один российский гидролог, имеющий опыт применения метода МВП [3,4].

<sup>6</sup> Выборочное значение коэффициента асимметрии  $C_s$ , т.е. вычисленное по ряду наблюдений на рассматриваемой реке, не всегда соответствует истинному значению. Поэтому при выборе (назначении) соотношения  $C_s/C_v$  следует учитывать региональные свойства рядов максимальных расходов воды.

<sup>7</sup> СНиП 33-01-2003 рекомендует метод МВП для российских гидроузлов, находящихся в зоне циклонической деятельности.

<sup>8</sup> В известных нам иностранных источниках этот вопрос не рассмотрен.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Асарин А.Е., Бестужева К.Н. Водноэнергетические расчеты. М.: Энергоатомиздат. 1986.
2. Асарин А.Е., Ивасенко С.П. Двухступенное управление режимом работы противопаводковых водохранилищ. Доклад на Международном

- симпозиуме «Гидравлические и гидрологические аспекты надежности и безопасности гидротехнических сооружений». Санкт-Петербург. 2002.
3. **Жиркевич А.Н.** Современные подходы к определению характеристик максимального стока. Юбилейный сборник научных трудов Гидропроекта. М.: АО «Институт Гидропроект». Вып. 159. 2000.
  4. **Жиркевич А.Н.** Особенности расчета максимальных расходов воды при проектировании гидроузлов на реках Вьетнама и Анголы. Доклад на VI Всероссийском гидрологическом съезде. Санкт-Петербург. Октябрь 2004.
  5. **Кригер и Джестин.** Гидроэлектрический справочник. т.1. 1939.
  6. **Крицкий С.Н., Менкель М.Ф.** Расчеты речного стока. М. 1932.
  7. **СП 33-101-2003** «Определение основных расчетных гидрологических характеристик». М.: Госстрой России. 2004.
  8. **СНиП 33-01-2003.** Гидротехнические сооружения. Основные положения. Госстрой России. М. 2004.
  9. **Creager, Jastin and Hinds** «Engineering for Dams». Vol.I. John Wiley and Sons. New York. 1945.
  10. **Design flood determination by the gradex method.** Bulletin du Comité Francais des Grands Barrages-FRCOLD NEWS. No.2. Novembre 1994.
  11. **Evaluation Procedures for Hydrologic Safety of Dams.** American Society of Civil Engineers. New York. 1988.
  12. **Guillot P., Dubant D.** «La methode du gradex pour le calcul de la probabilité des crues a partir des pluies. IASH, Publication No. 84. 1967.
  13. **ICOLD** «Selection of Design Flood» Bulletin 82. 1992.
  14. **ICOLD Bulletin 108/** Cost of flood control in dams. 1998.
  15. **Lombardi G.** «Analyse frequentielle des crues. Distributions bornes», ICOLD, 16<sup>th</sup> Congress, Vol.IV, Q. 63. R. 17. San Francisco. 1988.
  16. **Pan N J., Teng W.,** «Determination of design flood in China», ICOLD, 16<sup>th</sup> Congress, Vol. IV, Q. 63. R. 88. San Francisco.1988.
  17. **Zhang Jinsheng.** «Brief introduction for criteria of floods in China». International symposium on DAMS and EXTREME FLOODS, tomo 3. Granada, 16 sept. 1992.

## ПРАКТИКА ДЕКЛАРИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

*Радкевич Д.Б., инженер (ФГУ «НТЦ Гидротехбезопасность» Ростехнадзора России), Асарин А.Е., доктор техн. наук (Филиал ОАО «Инженерный центр ЕЭС — «Институт Гидропроект»), Рассказов Л.Н. доктор техн. наук (МГСУ), Филиппова Е.А., инженер (ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»), Школьников С.Я., кандидат техн. наук (ОАО «НИИЭС»), Чочия А.В., инженер (Фирма «ОРГРЭС»), Иващенко И.Н., доктор техн. наук (ОАО «НИИЭС»), Орлов А.В., кандидат техн. наук (ФГУ «НТЦ Гидротехбезопасность» ФГУ «НТЦ Гидротехбезопасность» Ростехнадзора России), Троицкий А.В., инженер (Филиал ОАО «Инженерный центр ЕЭС — «Институт Гидропроект»)*

В соответствии с Федеральным законом «О безопасности гидротехнических сооружений» Декларация безопасности «является основным документом, который содержит сведения о соответствии гидротехнического сооружения критериям безопасности». В Декларации обосновывается безопасность сооружения и определяются меры по ее обеспечению с учетом класса сооружения.

Содержание Декларации безопасности и порядок ее разработки установлен «Положением о декларировании безопасности гидротехнических сооружений», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 6 ноября 1998 года 1303 (далее — Положение).

В соответствии с «Положением» в настоящее время разработаны «Дополнительные требования к декларированию безопасности гидротехнических сооружений объектов энергетики» (разработчик — НТЦ «Гидротехбезопасность» Ростехнадзора России), учитывающие специфику объектов энергетической отрасли. Указанные «Дополнительные требования» учитывают также накопленный 8-летний опыт разработки деклараций безопасности гидротехнических сооружений в нашей стране.

Практика декларирования безопасности ГТС объектов энергетики и проект «Дополнительных требований» обсуждены на заседании секции «Проблемы правового и нормативно-технического обеспечения безопасности гидротехнических сооружений» научно-технического совета РАО «ЕЭС России». В заседании секции, которое состоялось 30 сентября 2005 г. в ОАО «Научно-исследовательский институт энергетических соору-

жений» под председательством исполнительного директора ОАО «НИИЭС» к.т.н. Бритвина С.О., приняли участие эксперты: д.т.н. Асарин А.Е. (Гидропроект), д.т.н. Рассказов Л.Н. (МГСУ) и с.н.с. Филиппова Е.А. (ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева), а также:

от «НТЦ Гидротехбезопасность» Ростехнадзора России — директор Радкевич Д.Б., вед.н.сотр., к.т.н. Борзенко И.И., зам. директора, к.т.н. Орлов А.В.;

от института «Гидропроект» — начальник отдела, к.э.н. Файн И.И., главный специалист Троицкий А.В.;

от «Фирмы ОРГРЭС» — ст. бригадный инженер Чочия А.В.;

от ОАО «НИИЭС» — вед. спец. Косырева И.М. (секретарь секции), начальник отдела, к.т.н. Юрченко А.Н., начальник отдела, д.т.н. Беликов В.В., вед.н.сотр. Комельков Л.В., директор Центра, д.т.н. Иващенко И.Н., вед.н.сотр., к.т.н. Школьников С.Я., зам. директора Центра Суриков Е.А., зав. группой Гуслинская Г.Г.

В сообщении, с которым выступил Радкевич Д.Б., отмечена положительная роль процедуры декларирования безопасности в обеспечении безопасности ГТС и дана подробная характеристика «Дополнительных требований», которые устанавливаются:

требования к содержанию и форме деклараций безопасности; методику составления деклараций безопасности;

порядок установления перечня объектов, имеющих гидротехнические сооружения, подлежащие декларированию;

порядок установления графиков представления деклараций безопасности в Ростехнадзор;

порядок формирования и регламент работы экспертных комиссий, создаваемых экспертными центрами, осуществляющими государственную экспертизу деклараций безопасности;

квалификационные требования к специалистам, включаемым в состав экспертных комиссий;

порядок утверждения деклараций безопасности и критериев безопасности гидротехнических сооружений.

Содержание «Дополнительных требований» представлено в Приложении к данной публикации.

В выступлениях членов экспертной комиссии и других участников заседания дана положительная оценка представленных «Дополнительных требований». Документ удачно обобщает опыт декларирования безопасности ГТС объектов энергетики, который накоплен за период, прошедший со времени принятия Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений» (1997 г.). Следует минимизировать объем той информации,

которая носит формальный характер, уделив основное внимание вопросам, непосредственно связанным с обеспечением безопасности (оценка опасностей, сценарии аварий, ущербы от возможной аварии, критерии безопасности, меры по обеспечению безопасной эксплуатации). Действующие нормативно-технические документы, в том числе разработанные в непосредственной связи с процедурой декларирования безопасности: «Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений» (РД 153-34.2-21.342-00, М., 2001) и «Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварий гидротехнических сооружений предприятий топливно-энергетического комплекса» (утверждена приказом МЧС России и Минэнерго России от 29 декабря 2003 г. 776/508), дают необходимую принципиальную основу для полноценного рассмотрения указанных вопросов в «Декларациях безопасности».

#### **Выступление А. Е. Асарина**

Рассматриваемый документ чрезвычайно важный и перспективный. В нем нуждается практика. Об этом говорят заинтересованные исследователи и практики и конечно сделать его надо легитимным.

При одобрении структуры и содержания документа, должен отметить, что я не знаю, какая организация или какая группа составит «Декларацию безопасности» и при этом выполнит все требования данного документа. В частности, авторами предлагается рассматривать возможные аварии. Раньше предполагалось, что аварий не будет, и никто не прогнозировал аварии на гидроузлах. Теперь мы заранее прогнозируем аварии, но не только прогнозируем, но и анализируем аналогичные аварии в международной практике. Это сложно. Я столкнулся с некоторым количеством «Деклараций безопасности», составлявшихся примерно по предлагаемой схеме. Я видел, кто их делает. Уровень групп составителей «Деклараций безопасности» очень разный. Если бы составлением декларации занимался «НИИЭС» или «ВНИИГ», то они могли бы возможно все эти требования выполнить. Поэтому общее замечание: слишком много спрашивается, слишком строго и детально регламентируется и не по силам многим составителям «Декларации безопасности». Во всяком случае, надо было бы указать, какие требования обязательны, а какие факультативны.

При большом перечне требуемых сведений мне кажется, что отсутствуют некоторые необходимые данные. Одним из глав-

нейших элементов, надо прямо записать, являются статистические характеристики максимального стока. Рассчитанные, нередко 20 и более лет назад, они должны быть обязательно пересчитаны к моменту составления «Деклараций безопасности». Должны быть также переоценены условия нижнего бьефа. Все Волжские гидроузлы рассчитаны на сброс 70 тыс. м<sup>3</sup>/с. Когда сбрасывается более 30 тыс. м<sup>3</sup>/с, начинается паника, а когда 40 тыс. м<sup>3</sup>/с — топятся целые дачные поселки и сотни садовых участков. «Самострой», конечно, но все равно собственность, которая топится. Все это должно учитываться в условиях пропуска половодий, рассматриваемых в «Декларациях безопасности».

Гидрологические условия, как правило, не сильно меняются. Вероятность того, что за прошедшие 10 — 15 лет эксплуатации прошел чрезвычайно высокий паводок, невелика. И параметры максимального стока обычно сохраняются. А вот условия, с какого момента можно закрывать все затворы, как правило, не определены. Обычно эксплуатационники все терпят «до упора». Срезают пик половодья до предела, чтобы не связываться с администрацией и местным населением. Надо проверять к чему это ведет в условиях расчетного половодья, задолго до наступления максимума которого водохранилище форсировано. Что еще не ясно? В рассматриваемом документе — это сценарий аварий. Трудно дать полный перечень сценариев. Но вот при рассмотрении сценария аварии, связанного с отказом затворов, необходима информация о наличии или отсутствии дублирующей системы электроснабжения механизма поднятия затвора. Вот этому бы всему следовало уделить дополнительное внимание. В целом это полезный документ. Я считаю, что его надо дать почитать большому количеству людей, составляющих «Декларации безопасности», включая сильных и «крутых» ГИПов крупных ГЭС.

В связи со сказанным у меня есть некоторые вопросы к докладчику:

*Сколько объектов энергетики в ближайшие 3-5 лет должны представить «Декларацию безопасности»? Примерное число.*

**Радкевич Д. Б.:** 220.

*Сколько сотрудников у Вас в Надзоре? В документе написано, что обследования должны проводиться обязательно с представителем Вашей организации. Есть ли у Вас люди на все обследования?*

**Радкевич Д. Б.** — *есть. В территориальных органах Ростехнадзора имеется достаточное количество инспекторов.*

*Чрезвычайно важная часть всего этого — это оценка вреда, которая входит в приложение. Не готовится ли какой соответствующий Федеральный документ совместно с МЧС?*

**Радкевич Д. Б.** — *В действующие нормативные правовые акты регулярно вносятся изменения и дополнения.*

### **Выступление Л.Н. Рассказова**

В рассматриваемом документе расширяются и уточняются требования к составлению «Декларации».

Глава 2 — основная глава «Декларации», которая посвящена анализу безопасности ГС. В документе говорится о несоответствии реализованных конструктивно-компоновочных решений и условий эксплуатации ГТС положениям проекта, требованиям действующих норм и правил.

Видимо речь идет о сооружениях временных или построенных очень давно. В этом случае чаще всего проект не сохраняется. В остальных случаях всякое отклонение от проекта требует согласования с проектной организацией или разрешения вышестоящей организации (к примеру, Госстроя).

Возможны также изменения в конструкциях сооружений уже в период эксплуатации гидроузла. Это наиболее сложный случай для анализа.

Ничего не сказано о случае отсутствия проекта. Как быть? Видимо, следует провести анализ конструкции и ее соответствия не проекту, а нормам и правилам, действующим в настоящее время.

Часто отсутствуют данные о физико-механических и фильтрационных характеристиках грунтов. Если это так, то необходимо провести определения заново, но даже, если они имеются, а гидроузлу более 20 — 25 лет, имеет смысл выборочно перепроверить данные.

Все это должно найти отражение в рассматриваемом документе. Указания о специальных обследованиях имеются. Лучше этот пункт развить.

*Главное — правильно сформулировать критерии безопасности ГТС в зависимости от их типа и конструкции. Необходимо поместить в Приложение документа основные критерии безопасности различных конструкций ГТС.*

Первое — бетонная гравитационная плотина на скальном основании. Основной критерий — устойчивость на сдвиг при действии статических сил. Мне известен случай плотины высотой около 70 метров (Чехия, в районе г. Брно), которая двигалась в сторону нижнего бьефа. Потребовалось анкеровать ее со стороны нижнего бьефа наклонными анкерами в скалу.

Другой критерий — сейсмическая устойчивость плотин. В особенности при изменении расчетной балльности. Вот с этим мы сталкиваемся постоянно. Уточняется сейсморайонирование нашей территории. В некоторых случаях балльность поднимается до 2-х единиц. Это значит, динамическая нагрузка в 4 раза возрастает.

Далее. Раньше фильтрационный поток в скальном основании оценивали весьма условно (да и сейчас часто также). Не было учтено движение сосредоточенной фильтрации по магистральным трещинам и по оперяющей трещину зоне с повышенной фильтрацией. К примеру, это не сделано на плотине Саяно-Шушенской ГЭС! Такой анализ требуется, по крайней мере, для плотин I-го и II-го классов.

Теперь арочные плотины. За критерий безопасности необходимо принять соответствие напряжений в теле плотины прочности бетона. Прочность бетона должна контролироваться хотя бы один раз в 10 лет, особенно в зоне насыщения бетона водой. Критерий безопасности должен рассматривать напряжения, трещины и движение фильтрационного потока в примыканиях плотины, в бортах, где возможны сколы и потери опоры в пятах.

Как и в случае гравитационной плотины, особого внимания требует анализ фильтрационного потока, его воздействие на основание. В штольнях бортовых примыканий возможно появление грифонов: иногда трещина вроде и не заметна, а вот фильтрация увеличилась в 2 раза. Это может, в конце концов, привести к аварийной ситуации. Необходимо сразу выявить причину.

Арочная плотина требует постоянного и критического анализа. Особое внимание следует уделять состоянию плотины при выборе опасного направления сейсмического воздействия. Даже если это направление не соответствует положению выявленных возможных очагов землетрясений.

Критерии безопасности контрфорсных плотин формируются аналогично гравитационным плотинам. Конечно, если перекрытия между контрфорсами не арочные, а массивные оголовки.

В случае арочных перекрытий следует рассматривать продольное сейсмическое воздействие, возможное трещинообразование в примыканиях арок к контрфорсам и т.д.

Далее. Гравитационные водосливные плотины на нескальном основании. Здесь важна устойчивость плотины на сдвиг. Фильтрационные деформации в основании. Контроль за выносом грунта основания (как на Плявинской ГЭС). Очень важна динамика изменения фильтрационного расхода во времени, а также крен плотины.

Работа затворов и подъемных механизмов. Эксплуатационные расходы и их пропуск. Уточнение расходов на основе расширения ряда наблюдений и т.д.

Особое внимание необходимо уделить совмещенным зданиям ГЭС с донными водосбросами. Работа донных водосбросов в здании ГЭС — это постоянная головная боль. Часто появляется очень сильная вибрация. На Волгоградской ГЭС один раз открыли затворы донных отверстий и с великой радостью закрыли. Теперь не открывают, а на них рассчитывался пропуск катастрофического расхода. Затворы должны быть готовы к работе. На Жигулевской плотине они работают приемлемо и даже наблюдается эффект эжекции.

Далее грунтовые плотины и дамбы. Этот вопрос может быть самым тяжелым и самым коварным. Эти сооружения требуют к себе гораздо большего внимания, чем бетонные. Прежде всего, критерий устойчивости откосов в соответствии с классом плотины. Далее необходимо оценивать динамику изменения фильтрационного расхода при различных уровнях ВБ и НБ. Следует рассматривать динамику изменения кривой депрессии. Вместе с фильтрационным расходом этот показатель говорит о противифильтрационной надежности плотины.

Сам по себе подъем кривой депрессии понизит коэффициент надежности плотины. Но, как правило, из-за подъема кривой депрессии аварии не произойдет. Неприятности наблюдать приходится — именно рост фильтрационного расхода был предвестником перехода плотины в предаварийное состояние на Курейской ГЭС. Наблюдения за осадками и смещениями, совместно с фильтрационными расходами, также дают информацию о развитии фильтрационных деформаций в теле плотины. В особенности осадки на гребне.

Если плотина с центральным или наклонным ядром и тем более с экраном, то требуется постоянный контроль за отметкой гребня противифильтрационного устройства внутри тела плотины. Эта отметка всегда должна быть выше отметки ФПУ с запасом, соответствующим классу сооружения. Это тем более важно, так как в последнее время эксплуатационники стремятся поднимать уровень воды выше НПУ. Наличие этих данных позволит более правильно оценивать причину всплесков фильтрационных расходов при подъеме уровня ВБ, особенно на плотинах с экраном (здесь опасны трещины) или наклонным ядром.

Отметка гребня не может быть ниже проектной. Если осадка оказалась больше эксплуатационного запаса, то должны быть найдены причины произошедшего и досыпан гребень на 15 – 20 см выше проектного.

Теперь по поводу третьей главы «Декларации». В этой главе рассматриваются условия предотвращения аварий.

Здесь следует иметь в виду, что строительная техника, грузовой автотранспорт, бетонный завод и т.д. на эксплуатирующемся гидроузле отсутствует. Следовательно, участвовать в ликвидации предаварийной ситуации не могут. И совершенно правильно указывается о необходимости договорных отношений с близлежащей организацией, имеющей необходимую технику для использования в предаварийной ситуации и т.д. В части состояния дорог, мостов, подъездов для использования этой техники — также должно быть все в порядке. Но ничего не сказано о заготовке различных материалов и оборудования для предотвращения аварий.

Заготовки должны быть для быстрого снятия предаварийности на бетонных и грунтовых конструкциях. В том числе мешки с песком. Готовность глинистого карьера и карьера горной массы или гравийно-галечникового грунта, ВВ и оборудование для его использования (к примеру, плотина Титон, США, разрушилась в том числе из-за отсутствия материалов, оборудования и готовности персонала к ликвидации контактной фильтрации на верхних отметках плотины). Затворы и механизмы их подъема должны быть в постоянной готовности к работе. В противном случае аварии не миновать (Тирлянская плотина, 1994 г.). Это все должно быть оговорено в Приложениях к документу.

Особое внимание следует уделять золошлакоотвалам ТЭС. Золошлакоотвалы возводятся намывом, то есть плотность укладки их достаточно мала. Поэтому сформулированные требования исключительно актуальны и своевременны.

Думаю, что документ в целом полезный и будет использоваться самыми различными предприятиями химической, металлургической, горно-обогатительной промышленности и другими ведомствами, создающими шламонакопители и хвостохранилища. Но надо внести некоторые дополнения в Приложение. В частности, рекомендации по назначению критериев безопасности для различных видов ГТС.

Считаю, что после некоторой доработки документ должен быть утвержден и издан.

### **Выступление Е.А. Филипповой**

Я выступаю как бы в двух лицах, поскольку ВНИИГ имеет многолетний опыт составления деклараций и определенный опыт участия в проведении их экспертизы. Рассматриваемый документ весьма актуален, поскольку старые правила утратили свою силу, а накопленный опыт по разработке Деклараций позволяет внести коррективы и в содержание документа. По существу доложенные Д.Б. Радкевичем новые Правила уже используются ВНИИГом более года при разработке Деклараций, поэтому можно считать, что уже апробированы практикой.

Что следует отметить нового и положительного в документе? Во-первых, исчезли повторы, за счет чего объем документа сократился примерно на 20%. Вопросы оценки соответствия текущего состояния сооружения критериям безопасности, назначения контролируемых и диагностических показателей состояния логически увязаны и сконцентрированы во второй главе, посвященной оценке уровня безопасности сооружения.

Следует также отметить появление в тексте новых Правил методических рекомендаций по изложению отдельных разделов Декларации безопасности, что позволит исключить у разработчиков возможные ошибки, связанные с неточностью трактовки вопросов и, в целом, существенно облегчит процесс работы над составлением Декларации. Впервые в структуре Правил изложен вариант содержания экспертного заключения, что даст возможность декларанту уже на стадии разработки Декларации учесть требования, предъявляемые к документу.

Появились приложения: методика определения критериев безопасности и программа многофакторных исследований состояния ГТС. И то и другое очень важно и своевременно, поскольку срок пересмотра «Методики» уже подошел, а необходимость проведения многофакторных исследований определена ПТЭ и подчеркивается где-то в 80% экспертных заключений. На предыдущем заседании Секции как раз рассматривались вопросы назначения критериев безопасности и было принято решение в целом «Методике» одобрить с учетом тех предложений в редакцию документа, которые поступили от ВНИИГа, НИИЭСа и Гидропроекта. Я не буду сейчас на них подробно останавливаться.

Что хотелось бы еще принципиально отметить по редакции новых Правил? Во второй главе, где речь идет об оценке риска аварий и предлагается проводить ее только экспертными методами, принятыми в отечественной практике, и дается ссылка на

СТП ВНИИГ, следует все-таки учитывать, что в СТП предлагается проводить оценку риска аварий с учетом статистических, графоаналитических и экспертных методов. Считаю, что эти исправления необходимо внести в редакцию новых Правил.

Считаю необходимым также заострить Ваше внимание на тот факт, что сейчас за разработку деклараций безопасности ГТС на промышленных объектах берутся неспециализированные и неквалифицированные организации, представители которых порой участвуют в разработке экспертных заключений на собственные работы, что является нарушением ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений». Эти же организации, как показывает практика, пытаются путем демпинга получить заказы на разработку Деклараций объектов энергетики.

Следует далее отметить, что необоснованные трудности иногда возникают при согласовании вероятного вреда от аварий с администрациями субъектов федераций, на чьих территориях эти аварии происходят. Может быть стоит этот порядок согласования каким-то образом изменить.

И последнее. Структура Правил ориентирована на солидные гидроэлектростанции, для которых документация, как правило, имеется в полном объеме, условия эксплуатации и контроль за безопасностью в целом отвечают требованиям действующих норм и правил, что нельзя сказать о ряде ГРЭС и ТЭС. По-видимому, будет целесообразно предусмотреть возможность в структуре новых Правил на отдельные пункты Декларации предоставлять информацию в упрощенном виде для ГТС IV класса, а также тех сооружений, последствия аварий на которых будут классифицироваться как локальная или местная чрезвычайная ситуация.

В заключение необходимо отметить хорошую готовность документа. Год назад его первая редакция направлялась на отзывы в ведущие проектные и научно-исследовательские организации, замечания и предложения которых учтены, по-моему, в полном объеме.

### **Выступление С.Я. Школьников**

1. Во «Временной методике оценки ущерба, возможного вследствие аварии гидротехнических сооружений» (РД 153-34.2-002-01, М., 2001), действие которой сейчас прекращено, были оговорены зоны, для которых следует определять ущерб от аварии ГТС (для населенных пунктов это зона, не затопливаемая паводком обеспеченностью 1%, для объектов сельского хозяйства — 5%, и т.д.).

В действующей «Методике» (М., 2004) соответствующие рекомендации отсутствуют, что совершенно недопустимо. Я встре-

чал работы, в которых учитывается ущерб по всей зоне затопления. В других работах считалось, что гидроузел отвечает только за затопление объектов, которые не могут затопляться, когда гидроузел пропускает максимальный проектный расход. А при столь разных подходах оценки ущербов могут отличаться в десятки раз.

Я сейчас говорю не как инженер, обсуждающий суть вопроса, а как математик, которому нужно знать формальные правила: как именно считать.

2. Д.Б. Радкевич в своем выступлении указал на существенный момент: при расчете ущербов от разрушения объектов теплоэнергетики основной вред может быть нанесен не волной, а прекращением теплоснабжения (а может и электроснабжения) населенных пунктов. К сожалению, в действующей «Методике» не указано, как выполнять оценку таких ущербов.

3. В «Методике» имеются некоторые противоречия. Так, возникает неопределенность с ущербом, связанным с прекращением водоснабжения населения из-за осушения верхнего бьефа. С одной стороны сказано, что эти ущербы вызваны необходимостью организации временного водоснабжения, с другой — что они рассчитываются при падении уровня воды в водохранилище со скоростью не менее 3 м/час. Но необходимость организации временного водоснабжения связана с уровнем всоса насосных станций, а скорость падения уровня при невозможности нормального водоснабжения может быть маленькой.

4. Сейчас нет реальных рекомендаций по назначению сценариев аварий. А.В. Троицкий говорил о необходимости создания специального нормативного документа по этому поводу еще во время работы над «Временной методикой».

Это не совсем те же сценарии, что перечисляются в «Декларации безопасности». Ряд ситуаций, которые с точки зрения специалистов, оценивающих прочность и устойчивость сооружений, существенно различны, с точки зрения гидравликов приводят к одинаковым параметрам волны излива.

При этом на гидрологические ситуации в водотоках, определяющие зоны затопления, в «Декларациях» часто не обращают внимания.

### **Выступление А.В. Чочия**

Документ актуальный. Представленная редакция в основном учитывает накопленный опыт декларирования безопасности ГЭС. Необходимо упростить процедуры согласования, предусмотренные «Дополнительными требованиями». В частности, следует уб-

рать из состава «Приложений» пункт 5: «Заключение Управления государственного энергетического надзора в субъекте Российской Федерации о состоянии выполнения плана мероприятий по обеспечению безопасности ГТС и выполнении предписаний Управления».

### **Выступление И.Н. Иващенко**

*Первая позиция.* Рассматриваемые «Дополнительные требования» учитывают накопленный опыт декларирования безопасности ГТС, в том числе опыт нашего института. Мы фактически работаем над декларациями в соответствии с этими требованиями. Считаю, что они вполне выполнимы.

Основная опасность при разработке «Деклараций безопасности» — это излишняя формализация документа, т.е. формально большинство «требований» вроде выполнено, а безопасность сооружения толком не оценена и не определено, что надо делать, чтобы необходимый уровень безопасности был обеспечен.

В «Декларации» должна быть четко определена связка «*основные опасности* (как внешние воздействия, так и опасности, связанные с отступлениями от требований норм и правил и допущенные при проектировании, строительстве и эксплуатации) — *сценарии возможных аварий* (составленные с учетом указанных «опасностей») — *необходимые меры по обеспечению безопасности*». При этом не следует переписывать указанные меры из актов обследования — весьма часто они не имеют прямого отношения к вопросам безопасности ГТС. Пока что в декларациях безопасности (тех, по которым мы участвовали в экспертизе) много повторов. Имеется и излишний материал. Например, нередко дублируются таблицы критериев безопасности. Видимо, целесообразно обойтись ссылками. Ведь критерии безопасности являются приложением к декларации безопасности.

Следовало бы более детально в «Дополнительных требованиях» изложить состав и требования к экспертному заключению.

*Вторая позиция.* Очень разумно то, что «Методика определения критериев безопасности» включена в качестве приложения к «Дополнительным требованиям». «Методика» определяет основные принципы назначения критериев, в том числе применение двухуровневой системы критериев. Пятилетняя практика применения «Методики» показала целесообразность применения этих принципов.

Какие вопросы надо решить?

1. Назначение К2 при наличии больших запасов в сооружениях. В этих случаях (а в сооружениях, запроектированных по «ста-

рым» нормам, такие случаи нередки) может быть принята такая схема: расчетом определяется нагрузка, вызывающая разрушение, определены достигаемые при этом значения диагностических показателей и для этих значений введен коэффициент (например, 0,9 для ГТС первого класса).

2. Назначение состава диагностических показателей. Следует стремиться к тому, чтобы их было не более нескольких десятков — ведь они предназначены для оперативных оценок состояния ГТС. Только для этих показателей утверждаются в органе надзора их критериальные значения. Причем, как состав диагностических показателей, так и их критериальные значения могут уточняться в процессе эксплуатации (по результатам натурных наблюдений, в связи с изменением состояния сооружения и др.). Конечно, состав контролируемых показателей может быть значительно шире (как известно, на крупных ГТС установлено несколько сотен или даже тысяч измерительных устройств). И для них могут быть установлены критериальные значения. Причем может быть больше чем два уровня. Но они не подлежат утверждению органом надзора.

Диагностические показатели должны быть увязаны с результатами анализа состояния ГТС в декларации безопасности, со сценариями возможных аварий и контролировать уязвимые зоны ГТС. Кроме того, эти показатели должны быть увязаны с качественными показателями — дополнять, а иногда и дублировать их.

3. Следует детализировать состав представляемой документации. В частности, не надо дублировать материал из состава деклараций — следует обойтись ссылками. В то же время в состав пояснительной записки по критериям безопасности необходимо включить раздел «Оценка работоспособности КИА».

*Третья позиция* — это оценка ущербов от возможной аварии. Главный вопрос — необходимость четкого определения зоны в нижнем бьефе, в пределах которой возможные ущербы не учитываются при определении гражданской ответственности собственника или эксплуатирующей организации за последствия аварии. Поскольку в действующей «Методике» этот вопрос не отражен, то в практике возможны оценки ущербов, отличающиеся (для одного и того же объекта) в десятки и сотни раз.

Далее — сценарии аварий при расчетах параметров волны прорыва должны, по крайней мере, входить в перечень сценариев, которые анализируются в других разделах «Декларации безопасности».

Кроме того, следует ограничить требования по представлению графического материала (например, представление карт с изолиниями равных скоростей или времени затопления излишне, так как та же информация вполне наглядно представлена в таблицах).

### **Выступление А.В. Орлова**

Надо четко определять, для какой цели предназначается методика оценки ущерба. Этот документ предназначен для оценки величины финансового обеспечения гражданской ответственности, т.е. величины, на которую эксплуатирующая организация гидроузла будет нести ответственность за нанесение вреда третьим лицам.

В этой части возникает вопрос. В проекте были определены нормальные ситуации, расходы нижнего бьефа соответственно назначенного класса гидротехнического сооружения. И этот проект прошел все виды экспертизы. Значит, администрация на местах знает эти зоны затопления, а такая процедура предусматривается правилами эксплуатации гидротехнического сооружения и действующими ПТЭ. Возникает вопрос: «Кто те люди, которые с разрешения уполномоченных органов администрации или без этого разрешения размещают свое имущество в зоне затопления при пропуске расчетного расхода, соответствующего проекту».

Несет ответственность за это эксплуатирующая организация или нет? Тем более, что входной режим водотока определяет не столько сама организация, сколько орган государственного регулирования.

Если орган регулирования задаст Иркутской ГЭС сброс 5 тыс.м<sup>3</sup> воды, то Иркутская ГЭС обязана сбросить этот расход.

Прецедент в российской практике был еще в советское время. Тогда был значительный фактически аварийный сброс на Красноярской ГЭС. Еще в период строительства были затоплены соответствующие зоны. Были соответствующие судебные иски. Красноярская ГЭС по суду не отвечала за это. В соответствии с этим, может быть, в «Методике» нужно было указывать две составляющие? Это размер причиненного вреда, за который фактически несет ответственность государство в рамках чрезвычайной ситуации, и ответственность эксплуатирующей организации.

Для Жигулевской ГЭС расчетчики провели расчет ущерба и получили оценку ущерба в 33 миллиарда рублей. Если такая величина будет согласована с губернаторами регионов, поддержана и утверждена Ростехнадзором, то имеются две возможности. Либо гидротехники должны будут дать гарантийное письмо о том, что у них есть имущество на 33 миллиарда рублей, которое

будет продано в результате аварии на Жигулевской ГЭС. Либо имеющиеся 1 – 1,5 миллиона долларов должны будут тратить, если найдут такую сумму, на покупку страхового полиса гражданской ответственности.

А в этом плане перед обслуживающим персоналом встает вопрос: отдавать ежегодно миллионы рублей на страхование или направлять деньги на первоочередные ремонтные работы по обеспечению безопасности.

### **Выступление А.В. Троицкого**

У нас в строительных нормах «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских населенных пунктов» записано, что населенные пункты обязаны иметь защиту от паводка 1%-ой обеспеченности. Это известно. Если Вы запроектировали гидроузел, который может в любой момент устроить паводок 0,01%-ой обеспеченности, то Вы это сделали с нарушением установленного государством порядка пропуска максимальных расходов. Вы за это ответите. Пропуск расходов столь малой обеспеченности — это не авария. Авария — это другое вообще явление. Полностью раскрыть водосбросные отверстия разрешается только в случае каких-то чрезвычайных ситуаций. Все гидрологические ситуации обеспеченностью 1% и меньше рассматриваются как чрезвычайные в государственном масштабе. Пропуск таких редких расходов эксплуатирующая организация не может осуществить по собственному усмотрению, а только по распоряжению вышестоящего органа управления, который и берет на себя ответственность.

В предыдущей редакции «Методики» (2001 г.) у нас было точно записано, что ущерб по населенным пунктам учитывается в том случае, если зона затопления от волны прорыва превышает отметку затопления 1%-ым паводком, и защитные сооружения становятся безопасны.

Вот эти положения в действующей редакции «Методики» отсутствуют. Их надо восстановить. Хотя на практике мы так и поступали. Ваш покорный слуга считал ущерб от аварии Цимлянского гидроузла, и мы эту норму восстановили.

### **Приложение.**

#### **Содержание «Дополнительных требований ... »**

##### **Глава 1. Общие положения**

**Глава 2. Дополнительные отраслевые требования к содержанию декларации безопасности и методические рекомендации по ее подготовке**

1. Общая информация
  - 1.1. Сведения о собственнике и эксплуатирующей организации
  - 1.2. Общие сведения об объекте и эксплуатируемых ГТС
  - 1.3. Характеристика природных условий района расположения ГТС
  - 1.4. Обоснование декларирования безопасности и краткое описание декларируемых ГТС
  - 1.5. Общие меры по обеспечению эксплуатационной надежности и безопасности ГТС
  - 1.6. Сведения о финансовом обеспечении гражданской ответственности за вред, причиненный в результате аварии ГТС
2. Анализ безопасности гидротехнических сооружений
  - 2.1. Анализ факторов, определяющих безопасность ГТС
  - 2.2. Анализ условий возникновения аварии ГТС
  - 2.3. Оценка уровня безопасности (риска аварии) ГТС
3. Обеспечение готовности объекта к локализации и ликвидации опасных повреждений и аварий ГТС и действиям в условиях возникновения чрезвычайной ситуации
  - 3.1. Противоаварийные мероприятия
  - 3.2. Подготовка к действиям в условиях возникновения чрезвычайной ситуации
  - 3.3. Профессиональная и противоаварийная подготовка персонала, регулярность проверки знаний норм и правил безопасности
  - 3.4. Информирование населения и органов исполнительной власти
4. Заключение
  - 4.1. Итоговая оценка уровня безопасности ГТС
  - 4.2. Основные мероприятия по обеспечению безопасности ГТС и планируемые сроки их выполнения
5. Список использованных источников
6. Приложения к декларации

**Глава 3.** Дополнительные требования к содержанию декларации безопасности проектируемого ГТС

**Глава 4.** Дополнительные требования к содержанию декларации безопасности строящегося ГТС

**Глава 5.** Дополнительные требования к содержанию декларации гидротехнических сооружений тепловых электростанций при наличии в составе сооружений золошлакоотвалов

**Глава 6.** Государственная экспертиза и утверждение декларации безопасности

#### **Приложения**

П 1. Форма титульного листа декларации

П 2. Сведения, включаемые в Российский регистр гидротехнических сооружений в соответствии с Инструкцией по ведению Регистра

П 2.1. Общие сведения об объекте и эксплуатируемых гидротехнических сооружениях (таблица)

П 2.2. Основные характеристики декларируемых гидротехнических сооружений (таблица)

П 3. Форма акта обследования гидротехнических сооружений объектов энергетики

П 4. Перечень основных законодательных и нормативных правовых актов, действующих в области государственного регулирования безопасности гидротехнических сооружений

П 5. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений объектов энергетики

П 6. Методические рекомендации по подготовке программы проведения многофакторных исследований гидротехнических сооружений в соответствии с требованиями Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации

### **Выводы:**

1. В перечень необходимых сведений, приводимых в «Декларации», целесообразно включить статистические характеристики максимального стока.

2. В «Дополнительные требования» целесообразно включить перечень основных сценариев возможных аварий. В дальнейшем этот перечень следует регламентировать специальным нормативно-методическим документом (пособием).

3. Недопустимо и опасно привлечение неспециализированных организаций как к составлению, так и к экспертизе декларации безопасности ГТС.

4. Процедура согласования «Декларации безопасности» в целом и отдельных ее разделов, в частности оценки ущербов, выполнения предписаний органов власти, сопоставима по трудоемкости с процедурой разработки самой декларации безопасности и должна быть существенно упрощена.

5. Методику оценки ущерба от возможной аварии ГТС следует (в дополнение к действующей «Методике») доработать по следующим вопросам:

четкого определения зоны в нижнем бьефе, в пределах которой причиненный вред не учитывается при определении гражданской ответственности за последствия аварий;

оценок вреда, связанного с прекращением тепло- и энергообеспечения из-за аварии (прорыва) гидроузла;

оценок вреда, связанного с прекращением водоснабжения населения из-за осушения верхнего бьефа.

6. Основные принципы определения двухуровневой системы критериев безопасности ГТС достаточно апробированы в течение истекшего 5-летнего периода практического применения

действующей «Методики определения критериев безопасности гидротехнических сооружений». В составе этой «Методики», включенной в приложение к «Дополнительным требованиям», необходимо учесть следующие позиции:

следует конкретизировать процедуру назначения К2 при наличии в сооружении больших «запасов» прочности и устойчивости;

следует указать на целесообразность ограничения перечня диагностических показателей состояния, предназначенных для оперативного использования;

целесообразно сформулировать перечни контролируемых показателей состояния ГТС в зависимости от их типа и конструкции.

7. В целом проект «Дополнительных требований» отвечает поставленной задаче и соответствует действующему законодательству в области безопасности гидротехнических сооружений. С учетом приведенных предложений и замечаний документ может быть рекомендован для утверждения в установленном порядке.

## **ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ «МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЕВ БЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ» РД 153-34.2-21.342-00**

*Блинов И. Ф., инженер (ОАО «НИИЭС»)*

В соответствии с действующими нормативными документами для контроля состояния гидротехнических сооружений I, II и III классов предусмотрено оснащение их необходимой контрольно-измерительной аппаратурой. На крупных ГЭС количество контрольно-измерительной аппаратуры, установленной на сооружениях одного гидроузла, достигает 5 тыс. единиц. При большом количестве КИА, устанавливаемой на сооружениях I и II класса, и особенно на высоконапорных плотинах, сбор (измерения), обработка и анализ данных измерений требуют больших затрат труда и времени.

Контрольно-измерительная аппаратура устанавливается с целью выполнения длительных контрольных наблюдений за состоянием сооружений и специальных исследований для получения информации для расчетов будущих сооружений, а также накопления фактических данных наблюдений по отдельным проблемам работы сооружений. При этом возникают вопросы о правильном использовании данных натуральных наблюдений в слу-

чаях, когда на сооружениях установлено достаточно большое количество КИА для измерений различного рода показателей состояния сооружений.

Многолетний опыт натурных наблюдений показал, что для оперативной оценки состояния гидросооружений необходимо иметь критериальные значения показателей его состояния. По важности и представительности показатели состояния гидросооружений условно разделяются на диагностические и контролируемые. Под диагностическими показателями понимаются наиболее значимые для оценки безопасности ГТС и «чувствительные» к внешним воздействиям контролируемые показатели, позволяющие дать оценку безопасности и состояния системы «сооружение-основание-водохранилище». В соответствии со статьей 3 Федерального закона критерии безопасности гидротехнических сооружений — это предельные значения количественных и качественных показателей состояния гидротехнического сооружения и условий его эксплуатации, соответствующие допустимому уровню риска аварии гидротехнического сооружения и утвержденные в установленном порядке федеральными органами исполнительной власти, осуществляющими надзор за безопасностью гидротехнических сооружений.

Сопоставление значений контролируемых показателей, полученных измерениями по КИА, с их критериальными значениями позволяет оперативно определить состояние сооружения и отклонения в работе сооружения от проектных требований. До выхода в свет Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений» и сопутствующих ему нормативных документов критериальные значения показателей состояния сооружений определялись в соответствии с «Рекомендациями по определению предельно допустимых значений показателей состояния и работы гидротехнических сооружений» (П-836-85. М.: Гидропроект. 1985).

В соответствии с Федеральным законом в 2001 г. ОАО «НИИЭС», ОАО «Институт Гидропроект» и ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» была разработана «Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений» РД-153-34.2-21.342-00, а в 2004 г. — «Пособие к Методике определения критериев безопасности гидротехнических сооружений». Пятилетний опыт практического применения РД 153-34.2-21.342-00 «Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений» (далее — «Методика») в процессе эксплуатации и в ходе декларирования безопасности гидросооруже-

ний объектов энергетики позволяет сделать некоторые выводы и сформулировать некоторые рекомендации.

Как известно, отличительной особенностью данного документа является введение двух уровней критериальных значений диагностических показателей состояния сооружений. При этом первый уровень К1 вводится в соответствии с требованиями ст. 9 Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений» (п. 2.3 «Методики») и является предупреждающим. Превышение первого уровня сигнализирует о наступлении потенциально опасного состояния и требует от собственника (эксплуатирующей организации) оповещения об этом органа надзора и принятия оперативных мер по переводу сооружения в состояние, отвечающее нормативным требованиям. В отличие от первого, превышение второго уровня критериальных значений К2 влечет за собой также и ввод ограничений на режим эксплуатации гидротехнического сооружения вплоть до понижения уровня верхнего бьефа. Практика применения «Методики» показывает, что такой подход вполне оправдан. Действительно, даже при наличии некоторых отклонений состояния сооружений от требований норм или положений проекта (т.е. при невыполнении критерия К1) обычно нет непосредственной угрозы прорыва напорного фронта. При этом имеется время разобраться в причинах указанных отклонений и привести сооружения в состояние, отвечающее нормативным требованиям.

На стадии проекта критериальные значения показателей состояния гидротехнических сооружений определяются расчетом сооружений по предельным состояниям в соответствии с действующими СНиП на проектирование бетонных плотин, плотин из грунтовых материалов и их оснований и назначаются равными расчетным значениям, соответствующим нагрузкам основного сочетания для К1 и особого сочетания для К2. В период эксплуатации состояние сооружения считается отвечающим нормативным требованиям, если значения ни одного из диагностических показателей не превышают критериального значения К1. Проектная оценка прочности и устойчивости гидротехнических сооружений выполняется для условий недопущения предельных состояний

$$\gamma_{lc} \cdot \gamma_n \cdot F \leq \gamma_c \cdot R,$$

где:  $F$  — расчетное значение обобщенного силового воздействия на сооружение;  $R$  — расчетное значение обобщенной несущей

способности сооружения;  $\gamma_c, \gamma_n, \gamma_c$  — соответственно коэффициенты сочетаний нагрузок, надежности по ответственности сооружения и условий работы, учитывающие тип сооружения, конструкции или основания, вид материала, приближенность расчетных схем, вид предельного состояния.

При превышении значений одного и более диагностических показателей критериального значения  $K_1$  состояние сооружения оценивается как потенциально «опасное», а в случае превышения значений одного и более диагностических показателей критериального значения  $K_2$  — как предаварийное (по действующим нормам сооружение работает с пониженным коэффициентом запаса). В отличие от первого превышение второго уровня критериальных значений ( $K_2$ ) сигнализирует о наступлении предаварийного состояния и влечет за собой ввод ограничений на режим эксплуатации гидротехнического сооружения (вплоть до понижения уровня верхнего бьефа).

Отличительной особенностью рассматриваемой «Методики» является введение двух уровней так называемых качественных показателей состояния сооружений  $\tilde{K}_1$  и  $\tilde{K}_2$ , что в ранее опубликованных документах не рассматривалось. Введение в систему критериев безопасности качественных значений показателей совместно с количественными значениями показателей позволяет оценить состояние и обеспечить безопасную эксплуатацию сооружений, оснащенных необходимым составом и количеством контрольно-измерительной аппаратуры.

Определение критериальных значений диагностических показателей состояния гидросооружений на стадии проекта выполняется по «Методике» в следующей последовательности:

на основе анализа результатов расчетов и исследований определяются потенциально опасные зоны сооружения, подлежащие контролю;

назначается состав диагностических показателей;

полученные в результате расчетов и исследований значения выбранных показателей состояний с учетом коэффициентов, обеспечивающих недопущения предельных состояний, принимаются в качестве  $K_1$ ;

определяются критериальные значения  $K_2$ .

Назначенные в проекте значения  $K_1$  и  $K_2$  показателей состояния уточняются при сдаче сооружения в эксплуатацию и в период эксплуатации на основе анализа результатов визуальных и

инструментальных наблюдений, поверочных расчетов по откалиброванным на основе результатов наблюдений детерминистическим и статистическим математическим моделям.

В соответствии с новой «Методикой» специалистами ЦБНН ОАО «НИИЭС», начиная с 2001 г., разработаны критерии безопасности для многих гидросооружений крупных отечественных ГЭС, ГАЭС, ГРЭС, ТЭС и зарубежных ГЭС. Среди них гидросооружения Волжской, Саратовской, Воткинской, Нижнекамской ГЭС, каскада Кубанских ГЭС, в том числе ГЭС-1, ГЭС-2, ГЭС-3, ГЭС-4, Свистухинской, Сенгилевской, Егорлыкской, Новотроицкой ГЭС, гидросооружений Загорской ГАЭС, Кармановской, Шатурской, Заинской ГРЭС; ГЭС Табка, Аль-Баас (Сирия) и многих других сооружений.

Необходимо отметить, что указанные выше сооружения были запроектированы с использованием разных нормативных документов и методов расчета. Гидросооружения, построенные в 30 – 60 гг, были запроектированы с использованием расчетов по допускаемым напряжениям и по стадии разрушения, а сооружения, построенные в 60 – 90-х гг., с использованием метода предельных состояний. Сооружения были запроектированы и возведены по нормативным документам, допускающим различную степень нагружения конструктивных элементов с различными коэффициентами запаса. Для сооружений, рассчитанных по нормам 50-х годов, проектная оценка прочности и устойчивости гидротехнических сооружений определялась условием недопущения стадии разрушения при соблюдении нормируемых коэффициентов запаса.

Следует отметить, что «Методика» ориентирована на сооружения, рассчитанные по предельным состояниям, не имеющие излишних запасов, однако на ряде сооружений (как, например, для многих Волжских ГЭС) указанные запасы имеются (по сравнению с требованиями современных норм). В этих случаях при назначении критериальных значений в соответствии с «Методикой» может быть получена весьма значительная разница между измеренными или вычисленными по данным измерений значениями показателей состояния гидросооружений и их критериальными значениями. Пятилетний опыт разработки критериев безопасности для многих ГЭС показал, что в «Методику» определения критериев безопасности должны быть внесены уточнения. Эти уточнения в первую очередь касаются методик определения критериальных значений запроектированных сооружений с запасом по прочности и отличающихся от действующих

норм проектирования ГЭС по предельным состояниям напряжений, перемещений, фильтрационной устойчивости. Действительно, в период эксплуатации критериальные значения показателей состояния, таких как, например, напряжений в арматуре, в бетоне, перемещений конструктивных элементов, параметров фильтрационного режима, определяемые с использованием статистической модели по данным натурных наблюдений, не могут быть приняты за К1, т.к. значения показателей состояния сооружений в большинстве случаев далеки от расчетных и нормативных значений показателей физико-механических свойств материалов. В этом случае выход значений показателей из стабильного состояния не означает, что у сооружения снижается коэффициент надежности, а означает лишь то, что появились какие-то внешние или внутренние воздействия, с причинами возникновения которых необходимо разобраться. Потому для такого сооружения превышение критериального значения показателя, определенного по данным натурных наблюдений с помощью статистической модели, не означает наступления потенциально опасного состояния.

Для сооружений, запроектированных и возведенных по старым нормативным документам, должны быть разработаны критерии безопасности с учетом этих обстоятельств. В этом случае для правильной оценки состояния сооружений должны быть выполнены комплексные поверочные расчеты сооружений с учетом изменившихся за период эксплуатации (30 – 40 лет и более) нагрузок, физико-механических характеристик материала сооружений и их оснований. Полученные в результате расчетов значения показателей состояния сооружений должны быть сопоставлены с их измеренными значениями. При оценке состояния сооружений в этом случае следует иметь в виду следующее. Если на основе результатов наблюдений и построении прогнозной модели окажется, что состояние сооружения стабильное, то за К1 значений показателей рекомендуется принимать наименьшее из расчетных значений показателей, полученное в результате поверочных расчетов (по предельным состояниям) с учетом коэффициентов надежности, сочетаний нагрузок и условий работы гидросооружения при основном и особом сочетании нагрузок.

В случае увеличения во времени измеренных показателей состояния сооружений (при соблюдении условия, что их значения далеки от значений, полученных в результате поверочных расчетов, или не превышает их) строится прогнозная статистическая модель, определяется интенсивность увеличения зна-

чений показателей, назначается период, в течение которого должны быть определены причины увеличения значений показателей состояния сооружений.

И, наконец, в случае уменьшения значений измеренных отдельных показателей во времени (при условии, что их значения далеки от значений, полученных в результате поверочных расчетов) строится прогнозная статистическая модель, определяется интенсивность снижения отдельных показателей состояния сооружений, назначается период, в течение которого должны быть определены причины, по которым происходит снижение значений отдельных показателей состояния сооружений.

Требует уточнения и методика определения критериальных значений второго уровня К2 диагностических показателей состояния гидросооружений. Смысл его уточнения заключается в том, что при достижении этого уровня значений диагностическими показателями сооружение переходит в предельное состояние и не поддается контролю. Этого ни при каких обстоятельствах допустить нельзя. Поэтому ряд ведущих специалистов ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», ОАО «НИИЭС», АО «Институт Гидропроект» считают, что значения диагностических показателей (напряжений в бетоне, арматуре, деформации, перемещений, пьезометрических уровней, фильтрационных расходов и др.) необходимо назначать при коэффициентах надежности, равных 1.1 и не менее. Такой подход позволит эксплуатационному персоналу принять меры по предотвращению аварии.

Такой подход нашел отражение в «Пособии к Методике определения критериев безопасности гидротехнических сооружений» М., 2004 г. Так, для максимально нагруженных зон бетонных плотин, прочность сечений которых определяется сопротивлением бетона сжатию, за критериальное значение К1 принимается расчетное сопротивление бетона сжатию для предельных состояний первой группы с учетом коэффициента надежности и условий работы, а за критериальное значение К2 — напряжение бетона в этих зонах плотины, равное  $0,9R_u$ , где  $R_u$  — расчетное сопротивление бетона сжатию для предельных состояний первой группы.

Для железобетонных конструкций ГТС, прочность сечения которых определяется по растянутой арматуре, а ширина раскрытия трещин ограничена, за критериальное значение К1 напряжений в арматуре принимается напряжение в арматуре, вычисленное по СНиП 2.06.08-87 исходя из предельно допусти-

мой ширины раскрытия трещин. За критериальное значение  $K_2$  напряжений в арматуре принимается значение, равное  $0,9 R_s$ , где  $R_s$  — расчетное сопротивление арматуры.

За критериальные значения  $K_1$  и  $K_2$  положения пьезометрических уровней в основании бетонных плотин на стадии проекта принимаются значения пьезометрических уровней, полученные расчетом или методом ЭГДА на основное ( $K_1$ ) или особое ( $K_2$ ). Для периода нормальной эксплуатации изменения положения пьезометрических уровней во времени определяются по прогнозным регрессионным моделям, основанным на статистической обработке данных натуральных наблюдений. Критериальные значения положения пьезометрических уровней  $K_1$  принимаются равными прогнозным моделям при доверительном интервале, равным ( $2\sigma$ ), а критериальные значения положения пьезометрических уровней  $K_2$  — равным прогнозируемым по модели при доверительном интервале ( $3\sigma$ ).

Фильтрационная прочность плотины из грунтовых материалов и их оснований оценивается по действующим градиентам напора в контролируемых областях фильтрации. За критериальное значение  $K_1$  фильтрационной прочности плотин из грунтовых материалов и оснований принимаются значения допусти-

мых для этих грунтов градиентов напора  $K_1 = \frac{I_{cm}}{\gamma_n}$ , а в качестве критерия  $K_2$ , с некоторыми допущениями, рекомендуется принимать значения, равные  $0,9 I_{cm}$ , где  $I_{cm}$  — критическое значение градиента напора.

В Пособии изложена методика определения значений и других диагностических показателей состояния гидросооружений (горизонтальных перемещений гребня высоких бетонных плотин, осадок плотин из грунтовых материалов, положения поверхности депрессии, фильтрационных расходов, мутности профильтровавшей воды через плотину и ее основание и др. показателей).

Представляется допустимым, в случае весьма значительной разницы между  $K_1$  и  $K_2$  (хотя такой подход не предусмотрен «Методикой»), вводить еще один — промежуточный — уровень критериальных значений диагностических показателей состояния сооружений. В качестве такого уровня может быть принята трехсигмовая граница прогнозной статистической модели, т.е. практически максимально наблюдаемое достоверное значение контролируемого показателя.

Следует отметить еще один, довольно часто встречаемый случай назначения К2, когда К2 назначается исходя (как, например, при контроле раскрытия межсекционных швов сооружений) из конструктивных особенностей противофильтрационных устройств или условий эксплуатации сооружения. Что же касается назначения К1, то в этом случае он определяется, как правило, на основании статистической обработки данных наблюдений.

При превышении одним или несколькими диагностическими показателями второго (предельного) уровня критерияльных значений К2 дальнейшая эксплуатация ГТС в проектном режиме является нарушением Федерального закона. Эксплуатационная организация (собственник) обязана известить об этом орган надзора и незамедлительно приступить к проведению мероприятий по восстановлению требуемого уровня безопасности. При этом должны быть введены ограничения на режим эксплуатации ГТС (вплоть до понижения уровня верхнего бьефа).

Как известно, большинство (до 70%) повреждений и отклонений состояния сооружения от требований норм и проектных предположений фиксируется на основе результатов визуальных наблюдений и качественных оценок. Практика применения «Методики» показывает, что во многих случаях качественные критерии безопасности назначаются формально, что совершенно недопустимо. При этом по-прежнему актуальна задача формализации качественных показателей состояния и получения интегрированных с количественными показателями оценок состояния сооружений.

Следует отметить, что в некоторых случаях назначается неоправданно большое количество диагностических показателей и, соответственно, значений К1 и К2. Кроме излишних затрат времени, это обстоятельство затрудняет анализ результатов наблюдений. В частности, совершенно необходимо ограничить перечень диагностических показателей только теми, которые служат для осуществления оперативной оценки состояния декларируемых сооружений, так как другие сооружения не представляют опасности с точки зрения возникновения чрезвычайных ситуаций.

Оперативная оценка состояния гидротехнических сооружений с использованием количественных и качественных критерияльных значений диагностических показателей не исключает необходимости проведения не реже одного раза в пять лет анализа данных наблюдений по всем контролируемым показателям и оценки состояния ГТС.

Осуществление оперативного контроля состояния сооружений с использованием критериев безопасности возможно только при условии работоспособной контрольно-измерительной аппаратуры и регулярных наблюдений. Многие отечественные сооружения эксплуатируются 30 лет и более. В то же время нормативный срок эксплуатации струнной аппаратуры (ПСАС, ПТС, ПЛДС, ПУЖС, ПДС и др.) не превышает 20 лет. Безусловно, эта аппаратура еще работоспособна, но погрешности измерения ее не всегда можно определить. Тот же вопрос касается пьезометрической аппаратуры. Пьезометры, установленные в песчано-гравелистых грунтах и даже в скальных, можно достаточно точно проверить. Что касается пьезометров, установленных в суглинках и глинистых грунтах, то определить их работоспособность (чувствительность) порой бывает затруднительно. Тем не менее, для оперативной оценки состояния ГТС необходимо, чтобы работоспособность пьезометрической аппаратуры регулярно проверялась в соответствии с инструкциями. Лучше обстоят дела с геодезической и накладной КИА. Эта аппаратура всегда может быть проверена, причем с определением погрешностей измерения в случае изменения условий ее эксплуатации.

В целом, пятилетняя практика применения «Методики определения критериев безопасности гидротехнических сооружений» подтвердила целесообразность использования основных принципов двухуровневой системы критериев безопасности ГТС. Высказанные в данной статье замечания и предложения следует учесть при переиздании «Методики».

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ УКРУПНЕННОЙ ОЦЕНКИ УЩЕРБОВ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ АВАРИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

*Школьников С.Я., кандидат техн. наук (ОАО «НИИЭС»),  
Троицкий А.В., инженер (Филиал ОАО «Инженерный центр  
ЕЭС» — «Институт Гидропроект»)*

Предусмотренная Федеральным законом Российской Федерации «О безопасности гидротехнических сооружений» процедура декларирования безопасности ГТС требует разрешения ряда проблем. Одной из них является определение возможных ущербов от гидродинамической аварии на сооружениях конкретных гидроузлов, эксплуатируемых в реальных гидрологических, природных и хозяйственных условиях. Для решения этой задачи была разработана и утверждена в 2001 г. «Методика» [2], которая регламентировала метод расчета параметров гидродинамической аварии и зон возможных затоплений [1], а также предлагала разработчикам методы оценки возможных ущербов. В «Методике» были предложены два метода оценки ущербов:

методика укрупненной оценки ущербов, использующая для стоимостных оценок среднестатистические значения стоимости основных фондов по региону и выделяющая в зоне затопления подзоны, различающиеся по хозяйственному использованию: городскую застройку, сельские населенные пункты, сельхозугодья, лесные массивы и т. д.;

методика детальной оценки ущербов, включающая подробный анализ экономической ситуации на территории, подвергшейся затоплению, на основе экспедиционных исследований или с помощью информации, содержащейся в базе данных геоинформационной системы региона и включающей в себя данные об объектах, в том числе их стоимость.

В 2003 г. выпущена новая редакция «Методики» [3], которая действует и в настоящее время. Следует отметить, что принципиальных различий в прекратившей в настоящее время действие «Методике» и действующей «Методике» нет. Основными различиями между ними являются: требование [3] представлять результаты гидравлических расчетов параметров гидродинамической аварии в виде карт; распространение «Методики» [3] на золошлакоотвалы ГРЭС, в то время как [2] распространялась только на подпорные сооружения водохранилищ; ряд дополнительных требований к этим результатам.

В прошедшие годы в ОАО «НИИЭС» и ОАО «ИЦЕЭС» - филиал «Институт Гидропроект» нашел применение, главным образом, метод укрупненной оценки ущербов, с применением которого были проведены расчеты по отечественным гидроузлам 1; 2; 3 и 4 классов, расположенным на водотоках различных регионов страны, а также по гидроузлам Сирии, расположенным на реках Евфрате и Оронте.

Авторы статьи не ставят своей целью подробно описывать действующую методику, а лишь затрагивают наиболее существенные ее стороны, влияющие, в конечном счете, на оценку ущербов. На подготовительном этапе проведения расчетов наиболее значимым является выбор сценария развития гидродинамической аварии. Недостатком существующей методики является отсутствие практических рекомендаций по выбору сценария аварии.

Если основываться на данных мировой статистики, то примерно 34% всех зафиксированных в мире разрушений плотин произошло из-за перелива через гребень, 31% — из-за нарушения прочности (устойчивости) и из-за чрезмерных деформаций и почти 35% — из-за нарушения фильтрационной прочности плотины или ее основания. Таким образом, существует, пусть и весьма малая, вероятность аварии по одной из указанных причин, которая может быть использована при назначении сценария возможной аварии.

На практике эти причины, однако, не всегда являются однозначными. Рассмотрим в качестве примера выбор сценария при разрушении Евфратского гидроузла (г/у Табка).

Обследование сооружений Евфратского гидроузла, проведенное российскими специалистами, показало:

за время работы после реконструкции Евфратского гидроузла и подъема подпорного уровня до отметки 304,0 м процессов, угрожающих безопасности гидротехнических сооружений, не выявлено;

данные визуального наблюдения и натурных наблюдений с использованием контрольно-измерительной аппаратуры, установленной на гидроузле, свидетельствуют о нормальной работе гидросооружений;

эксплуатация сооружений гидроузлов ведется квалифицированно и не вызывает существенных замечаний.

Это свидетельствует о том, что для указанного гидроузла в настоящее время отсутствуют конструктивные или эксплуатационные факторы, способные вызвать разрушение сооружений напорного фронта.

При анализе группы сценариев с возможным переливом через гребень отмечено следующее:

наличие и эксплуатация созданных на территории Турции крупных гидроузлов (Ататюрк, Кебан, Каракайя) практически полностью исключают приток к створу Евфратского гидроузла объемов воды, способных его разрушить. Это возможно только после нанесения крупных ущербов турецким гидроузлам;

изолированное полное разрушение находящегося выше гидроузла Тишрин способно только поднять уровень в Евфратском водохранилище до отметки 306,5 м, при этом до гребня остается еще 1,5 м;

боковая приточность на участке Тишрин – Евфратский г/у практически отсутствует.

Следует отметить, что на крупных отечественных гидроузлах 1-го и 2-го классов (Волжские гидроузлы, Цимлянский гидроузел, Ангарские гидроузлы), как правило, существует значительный запас объема водохранилищ между отметками ФПУ и гребня плотины. Заполнение такого объема даже в паводок редкой повторяемости может потребовать несколько дней. Этого времени обычно бывает достаточно, чтобы предпринять превентивные меры. Например, если в период паводка откажет крановое оборудование, обеспечивающее подъем затворов на водосливе (водосбросе), всегда останется время для принятия дополнительных мер для открытия затворов и недопущения таким образом перелива. Это обстоятельство также необходимо учитывать при определении сценария аварии.

Вместе с тем для гидроузлов 3-го и 4-го классов, имеющих, как правило, небольшие водохранилища и сравнительно малое количество водосливных отверстий, сценарии с переливом имеют существенно большую вероятность реализации. Для таких гидроузлов время переполнения водохранилища может исчисляться часами и его может не хватить для предотвращения перелива.

Сценарии с нарушением проточности, устойчивости или с нарушением фильтрационной прочности должны рассматриваться с привлечением материалов обследования гидроузлов и с учетом факторов, приводящих к таким нарушениям.

Практика применения «Методик» [2, 3] показала, что их отдельные положения нуждаются в уточнении. Так после проведения необходимых упрощений формула для расчета ущербов основным производственным фондам должна иметь вид:

$$И_1 = \frac{C_{\text{суб}} 1,015^n}{M} (m_1 k_1 + m_2 k_2 + m_3 k_3) \quad (1)$$

где:  $C_{\text{суб}}$  — общая балансовая стоимость основных производственных фондов субъекта Российской Федерации, на территории которого нанесен ущерб;  $n$  — число лет с года, для которого определена балансовая стоимость, до года выполнения расчетов;  $k_{1,2,3}$  — степень разрушения в зоне сильных, средних и слабых разрушений;  $m_{1,2,3}$  — население этих зон,  $M$  — население субъекта Федерации.

Аналогично для расчета ущербов готовой продукции предприятий, которую не успели реализовать и хранят в складах на территории, затрагиваемой аварией, целесообразно использовать формулу:

$$H_3 = \frac{P_{\text{суб}} 1,025^n t}{N_p M} (m_1 k_1 + m_2 k_2 + m_3 k_3) \quad (2)$$

где:  $P_{\text{суб}}$  — валовой национальный продукт, произведенный в субъекте Российской Федерации;  $t$  — срок хранения готовой продукции на предприятиях (принимается  $t = 7$  сут.);  $N_p = 250$  — число рабочих дней в году; остальные обозначения — те же, что и выше.

По непонятным причинам из [3] исчезло следующее, имеющееся в [2], положение:

«Поскольку все элементы хозяйственной инфраструктуры должны быть защищены от паводков определенной повторяемости, натуральные показатели ущербов должны определяться с учетом этого обстоятельства. По промышленным объектам и населенным пунктам ущербы определяются, если параметры гидродинамической аварии превышают показатели воздействия паводка 1%-й обеспеченности, по мостовым переходам — 0,3%-й, по сельхозугодиям — 5%-й».

Отказ от применения этого положения приводит к завышению величины ущербов, поскольку не учитывает безусловное требование строительных норм (СНиП 2.07.01-89\*. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений) о защите от затоплений территорий поселений, расположенных на прибрежных участках.

При составлении «Методик» в разделе, посвященном определению ущербов водоохранным сооружениям, допущена неточность. Там рекомендуется этот вид ущерба определять как «затраты на восстановление водоснабжения, прерванного из-за отказа или выхода из строя водозабора». При этом в «Методи-

не прописано как определять величину  $C_i$  — суточные затраты на одного жителя, пользующегося услугами водозаборов из верхнего бьефа, что делает предложенный способ невыполнимым.

Опыт проведения расчетов ущербов от гидродинамической аварии показывает, что величина ущербов сельскому хозяйству для ряда объектов достигает значительных величин. Объясняется это на наш взгляд несколько упрощенным способом определения величины ущерба (см. формулу для определения  $I_6$  в «Методике» [3]), когда не учитывается время и глубина затопления угодий, а также скорость движения потока при аварии. При очередном пересмотре «Методики» необходимо внести соответствующие коррективы.

Для оценки числа погибших и пострадавших от гидродинамической аварии в «Методиках» использованы различные коэффициенты для аварии, возникшей днем или ночью. При этом не учитывается время добегания волны до населенного пункта. По-видимому, такими рекомендациями можно пользоваться лишь для оценки числа погибших и пострадавших для ближних населенных пунктов, в которых затопление происходит внезапно. Для населенных пунктов, время добегания до которых достаточно велико (более 0,5 суток), население будет предупреждено о начале аварии и успеет эвакуироваться. Заметим, что в «Методиках» в оценке числа погибших и пострадавших не учитывается сезон аварии. ГОСТ Российской Федерации, регламентирующий прогноз последствий гидродинамических аварий [4], называет в числе параметров гидродинамической аварии температуру воды, так как она существенно повлияет на последствия аварии. По-видимому, желательно доработать раздел «Методики», посвященный оценке числа погибших и пострадавших с учетом времени добегания волны и температуры воды (или, для более грубых оценок, времени года).

В [3] включен ряд новых по сравнению с предыдущей редакцией требований к гидравлическому расчету. Некоторые из этих требований представляют научные задачи, решение которых крайне желательно для реальной оценки ущерба, но в настоящее время общепринятые способы такого решения отсутствуют. До разработки соответствующих «Методик», их обсуждения и принятия научно-техническим сообществом выполнение таких исследований нереализуемо в практических расчетах или не может считаться достоверным. Так, «Методика» [3] требует проведение расчетов воздействия плавающего льда на объекты в нижнем

бьефе, определения деформаций русла при гидродинамических авариях (соответствующие методы решения этой задачи для определенных гидродинамических ситуаций разработаны и используются в инженерной практике, но в общем случае они недостаточно достоверны), расчета размеров конуса выноса золошлакового материала из золошлакоотвалов ТЭС. Заметим, что в разделе по определению ущерба нет рекомендаций о том, как именно можно использовать такую информацию.

**Выводы:**

1. Принципиальные положения «Методик» [2, 3] достаточно апробированы в практике декларирования безопасности.
2. Необходимо уточнение «Методик» с учетом высказанных замечаний и предложений.
3. Задача дальнейшего совершенствования «Методики» упрощенной оценки ущерба представляется достаточно актуальной, поскольку в таких оценках есть потребность не только для гидротехнических объектов России, стран СНГ, но и для зарубежных объектов. Кроме того, указанная «Методика» после некоторой модификации может быть применена и для оценки ущербов от воздействия паводков (половодий).

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Историк Б.Л. Прудовский А.М. Школьников С.Я. Гидравлические аспекты прогноза условий прорыва напорного фронта гидроузлов. //Безопасность энергетических сооружений (БЭС). Вып. 1. М.: ОАО «НИИЭС». 1998.
2. РД 153-34.2-002-01 Временная методика оценки ущерба, возможного вследствие аварии гидротехнического сооружения. М.: ОАО «НИИЭС». 2001.
3. Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварий гидротехнических сооружений предприятий топливно-энергетического комплекса. Утверждена приказом МЧС России и Минэнерго России от 29 декабря 2003 г 776/508. М.: ОАО «НИИЭС». 2004.
4. ГОСТ Р 22.1.11-2002. Мониторинг состояния водоподпорных гидротехнических сооружений (плотин) и прогнозирование возможных последствий гидродинамических аварий на них. Общие требования. Госстандарт России. М. 2002.

## ЭКСПЕРТНО-ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА D2 ДЛЯ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

*Чернилов А.Г., кандидат техн. наук, Лавров Б.А., инженер,  
Иващенко И.Н., доктор техн. наук (ОАО «НИИЭС»),  
Фисенко В.Ф., инженер (Воткинская ГЭС)*

Экспертно-диагностическая Система D2, разработанная в ОАО «НИИЭС», предназначена для оперативного контроля и оценки состояния сооружений с целью предотвращения возможных аварийных ситуаций. Система разработана с учетом положений и требований Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений» [1], «Методики определения критериев безопасности гидротехнических сооружений» [2] и СНиП 33-01-2003 «Гидротехнические сооружения. Основные положения. Приложение Ж» [3]. Система представляет собой самостоятельный программный продукт, написанный на языке высокого уровня в системе Builder C++ версии 6 фирмы Borland «Paradox».

### *Основные отличия Системы D2 от существующих систем:*

возможность оперативной и автоматической диагностики эксплуатационного состояния гидросооружения (ГТС), а также его объектов и подобъектов с получением обобщенной количественной оценки уровня безопасности сооружения;

формализованный учет как количественных, так и качественных диагностических показателей (данных визуальных наблюдений и экспертных оценок) состояния ГТС;

возможность оперативной корректировки любой информации (на уровне пользователя и, как правило, без привлечения разработчика системы) в базе данных и в базе знаний, которая автоматически отражается во всех опциях Системы, редактирования состава и значений как контролируемых, так и диагностических показателей состояния ГТС, и, соответственно, рекомендаций и правил по обеспечению безопасной эксплуатации ГТС.

Система D2 включает прикладную программу управления базами данных и знаний. Система может функционировать и без обращения к внешним программам.

### *Возможности Системы*

Система позволяет:

выполнять диагностику состояния и оценку риска аварии эксплуатируемых гидросооружений в форме обобщенного показателя — уровня безопасности ГТС, объединяющего влияния

количественных и качественных факторов безопасности, в том числе определенных Декларацией безопасности ГТС (уровень безопасности ГТС характеризует отклонение состояния ГТС от требований проекта, требований современных норм и правил);

проводить экспертную оценку безопасной эксплуатации сооружения на основе специально разработанных и редактируемых пользователем правил оценки для конкретного сооружения, а также моделирование в Системе любых сценариев возможных аварий сооружения;

представлять информацию о причинах получения той или иной оценки;

представлять пользователю оперативную информацию о соответствии показаний измерительных устройств и визуальных наблюдений критериям безопасности;

проводить ввод, редактирование, корректировку данных наблюдений в базе данных, получать информацию об установленной на сооружениях контрольно-измерительной аппаратуре и представлять ее в текстовой, графической или табличной формах, проводить обработку данных наблюдений, создавать отчетные материалы о результатах наблюдений, диагностики состояния и результатах анализа уровня безопасности ГТС.

### ***Состав Системы***

Основными блоками Системы являются (рис. 1): База данных и База знаний, включающая блок адаптации к условиям эксплуатации и особенностям конкретного ГТС (в этом блоке формируются, вводятся и корректируются правила оценки состояния и безопасности ГТС, формируются перечни диагностических показателей и условий эксплуатации, строятся и редактируются деревья факторов и сценарии).

Кроме того, Система содержит ряд сервисных программ: блок ввода необходимой информации об объекте в базу данных при установке Системы на объекте и ее адаптации к условиям объекта; графический редактор; редактор построения таблиц; блок математической обработки данных; блок создания многостраничных отчетов; блок ввода данных наблюдений в базу данных; блок импорта-экспорта данных; блок архивирования данных и конфигураций Системы.

### ***База данных Системы***

База данных Системы содержит систематизированные сведения о контрольно-измерительных приборах (паспортные и установочные данные, показания за весь период наблюдений, результаты ви-

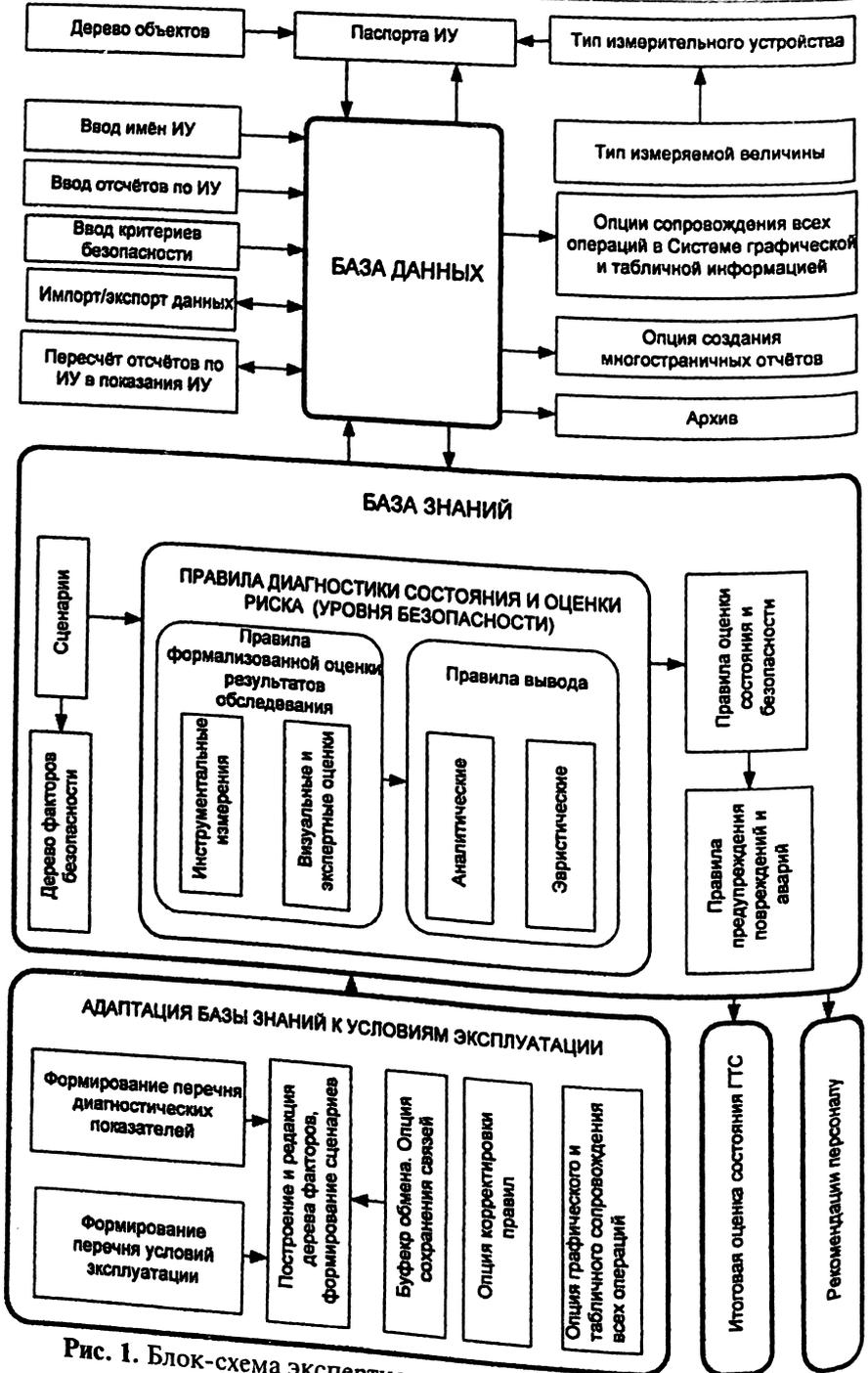


Рис. 1. Блок-схема экспертно-диагностической Системы D2

зуальных наблюдений, осмотров и инструментальных обследований, критерии безопасности для измерительных устройств, а также всю справочную информацию - схемы размещения приборов, технические характеристики сооружений и оборудования, отчеты, акты, фото-, аудио- и видеоматериалы). База данных оснащена собственным математическим блоком, позволяющим проводить обработку показаний многоотсчетных приборов, таких как трехмарочные щелемеры, создавать «виртуальные» приборы путем обработки по заданной программе показаний нескольких приборов (кустов приборов).

Структура базы данных позволяет формализовать результаты визуальных наблюдений на основе непрерывной шкалы, значения которой могут изменяться от 0 до 6. Каждый вид наблюдений на конкретном посту может рассматриваться как визуальное измерительное устройство, для которого, как и для инструментального измерительного устройства, определяются критерияльные значения  $\tilde{K}_1$  и  $\tilde{K}_2$ , (формализация оценки результатов визуальных наблюдений проводится на экспертной основе).

Для ввода данных в базу в Системе реализован специализированный предметно-ориентированный блок ручного ввода и редактирования введенных данных, предусмотрена опция импорта-экспорта данных из других баз данных и электронных таблиц.

### ***База знаний Системы***

База знаний Системы включает в себя правила вывода, необходимые для проведения диагностики состояния сооружения и оценки уровня безопасности, а также знания о диагностических показателях состояния и сценариях развития возможных аварийных ситуаций. Кроме того, в базу знаний Системы включены факторы безопасной эксплуатации, содержащиеся, в том числе, в Декларации безопасности ГЭС сооружения, и правила предупреждения аварий. Информационное наполнение базы знаний производится на основе сценария, учитывающего специфику ГЭС. Это делается на этапе адаптации Системы к условиям эксплуатации гидроузла и основывается на Декларации безопасности ГЭС, инструкциях по эксплуатации сооружений и мероприятиях по ее обеспечению, актах и заключениях комиссий различных уровней, а также на экспертных оценках специалистов. Информационное наполнение базы знаний может корректироваться в процессе всей эксплуатации сооружения.

### ***Интерфейс блока проведения диагностики и оценки уровня безопасности.***

Для проведения диагностики и оценки уровня безопасности сооружения в Системе предусмотрен блок формирования дере-

вев факторов безопасности. Дерево факторов безопасности — инвертированная иерархическая структура факторов безопасности. Корневой узел дерева факторов, всегда вычисляемый, дает общую оценку уровня безопасности эксплуатации сооружения по рассматриваемому сценарию. Узлы низшего уровня иерархии представляют собой факторы безопасности: качественные (основанные на экспертных оценках факторов) и количественные (вычисляемые с применением критериев безопасности К1 и К2). Между корневым узлом и узлами низшего уровня может быть расположено неограниченное количество вычисляемых узлов различной иерархии, дающих частные оценки уровня безопасности объектов, подобъектов сооружения, измерительных створов и узлов. Каждый узел дерева факторов связан с необходимым объемом информации в зависимости от конкретного содержания этого узла. Информация для узлов, связанных с качественными факторами, содержит критерии количественной оценки этих факторов. Приведение качественных значений факторов к единому масштабу осуществляется на основе единой непрерывной шкалы, значения которой изменяются от 0 до 6.

Информация для узлов, связанных с измерительными устройствами, содержит показание измерительного устройства, критерии безопасности и оценку уровня безопасности на дату проведения экспертизы. На таком узле предусмотрено построение графика изменения показаний измерительного устройства во времени с критериями безопасности (с выдачей соответствующей ему таблицы показаний и схемы расположения измерительного устройства на сооружении).

Информация для вычисляемых узлов, содержащих оценку уровня безопасности сооружения или его объектов и подобъектов, содержит, в зависимости от полученной оценки, рекомендации по предотвращению возможных аварийных ситуаций и приведению сооружения в нормальное эксплуатационное состояние.

Оценки, показывающие соответствие показаний измерительных устройств критериям безопасности К1 и К2, вводятся в дерево факторов автоматически, для чего каждый узел, соответствующий количественному фактору, связывается с конкретным измерительным устройством. Оценки качественных факторов, определяемые на экспертной основе, вводятся в дерево факторов непосредственно с клавиатуры.

Количественная оценка уровня безопасности ГТС с учетом взаимовлияния различных (приведенных к единому масштабу

по шкале от 0 до 6) факторов безопасности осуществляется Системой по зависимости [4]:

$$I = (I_{\max} + q) - \prod_i^n [(I_{\max} + q) - I_i] / [(I_{\max} + q) - I_{\min}]^{n-1},$$

где:  $I_i$  — значения факторов безопасности;  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  — максимальное и минимальное значения факторов для того интервала указанной количественной шкалы, которому соответствуют качественные значения факторов, учитываемых при вычислениях [4]. Итоговая оценка уровня безопасности представляется в том же масштабе.

Ранжирование качественных значений отдельных факторов, как и уровня безопасности  $I$  для сооружения в целом, осуществляется на основе специальных таблиц [4].

Ранжирование количественных показателей осуществляется Системой на основе разработанных критериев безопасности для измерительных устройств, установленных на ГТС. При этом критериальному значению показания измерительного устройства, соответствующему критерию  $K_1$ , присваивается оценка 3, а критерию  $K_2$  — оценка 5.

При неудовлетворительной оценке состояния сооружения или его конструктивных элементов Система выдает предварительно разработанные экспертами детальные правила (рекомендации по необходимым мероприятиям) предотвращения возможных аварий и приведению сооружения в нормальное эксплуатационное состояние.

#### *Диагностика состояния ГТС сооружения*

Для проведения диагностики состояния ГТС сооружения на этапе адаптации Системы создается дерево диагностических показателей, содержащее иерархию диагностических факторов. Факторы высших уровней составляют дерево объектов, которое по иерархии может отличаться от дерева объектов Базы данных. Факторы низшего уровня в процессе адаптации Системы связываются с измерительными устройствами (ИУ) Базы данных и, соответственно, с аналитическим блоком оценки состояния сооружения и опциями графической и табличной информации. После активизации дерева диагностических показателей в режиме расчета определяется формализованная оценка состояния сооружения для факторов всех уровней. В зависимости от полученных оценок определяются необходимые мероприятия по восстановлению нормального состояния сооружения.

После активизации Системы на рабочем столе компьютера в течении нескольких секунд можно получить оценку уровня безопасности ГТС и его подобъектов и, соответственно, информацию по необходимым мероприятиям. Оценка уровня безопасности вычисляется с учетом факторов безопасности, действующих на дату вычисления. Факторы безопасности, не определенные на дату вычисления, Системой игнорируются. Диагностику можно проводить на любую дату с начала проведения наблюдений.

Дерево диагностических показателей может редактироваться прямой вставкой или удалением узлов или блоков дерева, или через внутренний буфер обмена. Редакционная правка автоматически обновляет все связи дерева с Базой данных.

#### *Анализ сценариев развития возможных аварийных ситуаций*

Дерево факторов для сценариев возможных аварий формируется из дерева факторов диагностических показателей и дерева факторов, характеризующих условия эксплуатации, которые создаются на этапе адаптации Системы, в том числе на основе Декларации безопасности сооружения. Дерево факторов для сценариев создается с помощью внутреннего буфера обмена перемещением блоков из соответствующих деревьев в дерево конкретного сценария. Буфер обмена при перемещении блоков сохраняет все связи и экспертные оценки факторов перемещаемых блоков. После активизации дерева факторов сценария в режиме расчета определяются формализованные оценки состояния сооружения по этому сценарию развития аварии для факторов всех уровней. В зависимости от полученных оценок определяются последствия от аварии и необходимые мероприятия.

Система позволяет создавать и сохранять неограниченное количество сценариев. Сценарии легко редактируются пользователем.

#### *Сервисные опции Системы*

Система позволяет просмотр результатов натуральных наблюдений в табличном и графическом виде на любом этапе работы с Системой.

В Системе предусмотрен собственный редактор создания многостраничных отчетов (ежемесячных, квартальных, годовых, оперативных) в полностью сформатированном и готовом для печати виде. В отчет могут быть включены графики, таблицы и текстовые материалы, как непосредственно создаваемые в редакторе, так и импортируемые из текстовых редакторов с помо-

щью буфера обмена. Графики и таблицы формируются, форматируются и редактируются непосредственно на страницах отчета.

Отдельной опцией вызываются таблицы с перечнем измерительных устройств, показания которых превысили критерильные значения К1 и К2 на последнюю дату взятия отсчетов, за весь период наблюдений или за любой выбранный период.

Опции «Импорт» и «Экспорт» позволяют проводить обмен данными с базами данных других систем в текстовом формате.

Опция «Архив» позволяет проводить оперативный поиск любой, связанной с Системой и содержащейся в компьютере информации.

### *Интерфейс Системы*

Система предназначена для использования на персональных компьютерах четвертого поколения с программным обеспечением Window 2000/XP совместно с цветным принтером (струйным или лазерным), обладает современным дружественным интерфейсом и предоставляет удобный прямой доступ из главного меню ко всем рабочим и сервисным программам. Главное меню организовано в виде выпадающих списков подпрограмм Системы. Программы и подпрограммы Системы открываются полноэкранными окнами, в большинстве своем, для удобства работы пользователей, разделенными на отдельные панели изменяемой площади. Такая организация окон обеспечивает комфортную работу пользователей с большим объемом информации, содержащимся в окне, практически всегда в полноэкранный режим. При вызове любого очередного необходимого окна, действующее окно закрывается автоматически. В Системе предусмотрена защита от возможных ошибок операторов. Она заключается в отказе Системы в выполнении неправомерных действий, для чего все кнопки, иконки, опции в диалоговых окнах активизируются только для разрешенных для выполнения операций. В необходимых случаях Система запрашивает подтверждение на выполнение операций, которые могут привести к потере данных.

Экспертно-диагностическая Система D2 может быть адаптирована к инженерно-геологическим и конструктивным особенностям, а также условиям эксплуатации любых гидроузлов, в том числе с неполной или частично вышедшей из строя системой инструментальных наблюдений. При этом исходная информация может быть введена как в автоматическом (при наличии дистанционной измерительной системы), так и в ручном режиме. В на-

стоящее время Система D2 адаптирована и введена в эксплуатацию в России на Воткинской ГЭС и Юмагузинском гидроузле.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений».** Собрание законодательства РФ. 30.1997.
2. **«Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений».** РД 153-34.2-21.342-00. РАО «ЕЭС России». М.: 2001.
3. **СНиП 33-01-2003.** Гидротехнические сооружения. Основные положения. (Взамен СНиП 2.06.01-86\* с 01.01.04). Приложение Ж. М.: 2004.
4. **Методика оценки уровня безопасности гидротехнических сооружений.** ОАО «НИИЭС». М.: 2004.

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛН ИЗЛИВА ИЗ ЗОЛОТВАЛОВ С УЧЕТОМ СУХОГО ТРЕНИЯ**

*Школьников С.Я., кандидат техн. наук,  
Секисова И.А., инженер (ОАО «НИИЭС»)*

Одной из сравнительно часто встречающихся аварий гидротехнических сооружений являются аварии гидрозолотоотвалов. В большинстве случаев основной ущерб от таких аварий бывает связан со значительными загрязнениями окружающей среды. Так, в феврале 1995 г. произошел прорыв дамбы золотоотвала Владимирской ТЭЦ, приведший к значительному загрязнению р. Клязьмы и нарушению в течение нескольких дней водоснабжения пос. Лесной.

По-видимому, промходы, накопленные в гидроотвалах, обладают сходными физическими свойствами и для них должны быть характерны однотипные аварии.

Известны аварии гидроотвалов еще гораздо более крупного масштаба, при которых ожигенные производственные отходы, прорвав дамбы обвалования, изливались в нижний бьеф подобно естественному селевому потоку, переносясь на много километров от места складирования, вызывая большие человеческие жертвы и материальный ущерб. Из наиболее известных аварий, развивавшихся по такому сценарию, приведем аварии хвостохранилищ [1] медных рудников Эль-Кобре №1 в Чили (1965 г, около 300 человек погибших), угольной шахты Буффало-Крик в США (1972 г, более 100 человек погибших), шахты Преставель в Италии (1985 г., более 250 человек погибших) [2]. Исключительно тяжелая авария произошла 13 марта 1961 г. в Киеве в результате

прорыва дамбы, ограждающей овраг Бабий Яр, в который в течение 11 лет гидравлическим способом сбрасывались отходы производства кирпичного завода. Авария привела к большому количеству жертв (около 1500 человек) [3].

В сентябре 1964 г. произошел прорыв хвостохранилища №2 полиметаллического рудника Ак-Тюз в Киргизии [4]. Общий объем хвостохранилища 500 тыс. м<sup>3</sup>; но объем его заполнения в момент аварии неизвестен (в [4] указан объем сброшенных хвостов, превышающий 500 тыс. м<sup>3</sup>). Особенностью аварии является то, что излив ожигенных хвостов прошел в виде двух волн, первая из которых была связана с прорывом напорного фронта дамбы обвалования, а вторая, существенно превышающая первую по объему и приведшая к гибели человека, прошла несколько часов спустя.

При часто применяемой транспортировке твердых промышленных отходов к месту захоронения гидравлическими методами их значительная часть находится в неконсолидированном состоянии. При прорыве напорного фронта гидроотвала отходы могут выноситься за пределы накопителя. Основными механизмами выноса является вымыв отходов водой из прудка и излив обводненных неконсолидированных отходов. Емкость прудка невелика, и в случае наиболее тяжелых аварий основной объем выноса, по-видимому, связан с течением неконсолидированного материала гидроотвала.

В ряде публикаций предлагается использовать для математического моделирования гидродинамических аварий золошлакоотвалов математическую модель, состоящую из уравнений Сен-Венана, дополненных уравнениями баланса наносов и деформации дна [5]. Такие модели сравнительно хорошо описывают вымыв материала водой из прудка, но не описывают массовое течение ожигенных отходов. В этих моделях существенно используются формулы концентрации наносов в потоке, пригодные лишь для малых концентраций взвеси и при большом линейном размере рассмотрения, характерном для русловых потоков. При сравнительно небольшом объеме воды в прудке гидроотвала такая модель не может описать вышеперечисленные крупные аварии, сопровождающиеся практически полным выносом из гидроотвала накопленного материала, многократно превышающего по объему объем прудка.

Неконсолидированная пульпа может рассматриваться как вязко-пластичная жидкость, которая может находиться в состоянии покоя при ненулевых напряжениях сдвига. В воде и других вязких жидкостях эти напряжения возникают лишь при течении. В осредненных по глубине слоя движущейся среды математичес-

ких моделях напряжения сдвига учитываются как трение на дне. В трудах специалистов МГУ, работающих под руководством ак. С.С. Григоряна, такие процессы моделировались с использованием уравнений Сен-Венана с дополнительным членом, учитывающим сухое трение. Для простейшего случая широкого прямоугольного русла эти уравнения имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial qv + gh^2/2}{\partial x} + ghI + \frac{\lambda}{2} |v| + \theta g k_f h = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где:  $t$  — время;  $x$  — пространственная переменная;  $h$  — глубина;  $v$  — скорость;  $q = vh$  — погонный расход;  $I$  — уклон дна;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $k_f$  — коэффициент сухого трения

$$k_f = \begin{cases} k_1 & \text{при } v \neq 0 \text{ или } \left| \frac{\partial Z_{\text{СП}}}{\partial x} \right| > \text{tg}(\varphi) \\ k_0 & \text{при } v = 0 \text{ и } \left| \frac{\partial Z_{\text{СП}}}{\partial x} \right| \leq \text{tg}(\varphi) \end{cases}, \quad (2)$$

$\varphi$  — угол внутреннего трения ожизненных золошлаков,

$$\theta = \begin{cases} -\frac{q}{|q|} & \text{при } v \neq 0 \text{ (при } k_f = k_1), \\ 0 & \text{при } v = 0 \text{ и } \frac{\partial Z_{\text{СП}}}{\partial x} = 0, \\ -\frac{\partial Z_{\text{СП}}}{\partial x} / \left| \frac{\partial Z_{\text{СП}}}{\partial x} \right| & \text{при } v = 0 \text{ и } \frac{\partial Z_{\text{СП}}}{\partial x} \neq 0 \text{ (при } k_f = k_2), \end{cases} \quad (3)$$

$Z_{\text{сн}} = Z_{\text{д}} + h$  — отметка свободной поверхности среды;  $Z_{\text{д}}$  — отметка дна;  $\lambda$  — коэффициент гидравлического трения Дарси-Вейсбаха, принимаемый в данной работе соответствующим формуле Маннинга:

$$\lambda = \frac{2gn^2}{\sqrt[3]{h}} \quad (4)$$

При выводе уравнений (1) предполагалось, что течение возникает во всей толще неконсолидированного грунтового материала, форма эпюры скорости в вертикальной плоскости не учитывается (корректив количества движения принимается равным 1).

Важным свойством уравнений (1) является то, что описываемая ими среда может находиться в покое, имея негоризонтальную свободную поверхность. В самом деле, нетрудно видеть, что система (1) удовлетворяется при:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} = 0, & v = 0, \\ \frac{\partial z}{\partial x} f_s + k_f = 0. \end{cases} \quad (5)$$

В средах без сухого трения состояние покоя возможно лишь при горизонтальной свободной поверхности. Наличие члена сухого трения позволяет прогнозировать такие существенные явления, как конусы выноса и воронки вблизи прорана. Вообще, эти эффекты возникают и при использовании уравнений Сен-Венана, дополненных уравнениями донных деформаций [5], но без учета излива из ЗШО неконсолидированных золошлаков объем выноса может быть сильно преуменьшен.

Для покоящейся среды коэффициент сухого трения меняется от 0 до некоторого предельного значения, которое будем в данной работе принимать равным тангенсу угла внутреннего трения неконсолидированного золошлакового материала. При течении среды он, по-видимому, также может несколько убывать.

Уравнения (1 - 4) — нелинейные, имеющие сложные правые части. Построить аналитические решения таких уравнений удастся в исключительных случаях. Для их решения использовалась оригинальная программа для ЭВМ, основанная на явной конечно-разностной схеме А.Н. Милитеева [6]. Расчеты проводились на неподвижном шаблоне. Программа была адаптирована к условиям расчета волны посуху.

Проиллюстрируем особенности решения таких уравнений на типовой модельной задаче о мгновенном разрушении расположенной в широком прямоугольном канале с горизонтальным дном дамбы, по одну сторону от которой расположено ЗШО. Для решения этой задачи была проведена серия численных экспериментов. Шероховатость дна канала  $n$  по обе стороны от дамбы считалась постоянной; слой золошлакового материала имел до аварии постоянную толщину и угол внутреннего трения.

Широко известно аналитическое решение такой задачи (называемой задачей о разрушении плотины) для уравнений Сен-Венана в руслах без уклона и трения [7, 8]. Эта задача использовалась нами для тестирования работы программы (рис.1). Удер-

жание в уравнениях Сен-Венана членов, учитывающих уклон, гидравлическое и сухое трение, делают невозможным аналитическое решение задачи. Подробные исследования задачи о разрушении плотины с учетом рельефа дна и гидравлического трения проводились численными методами [9, 10].

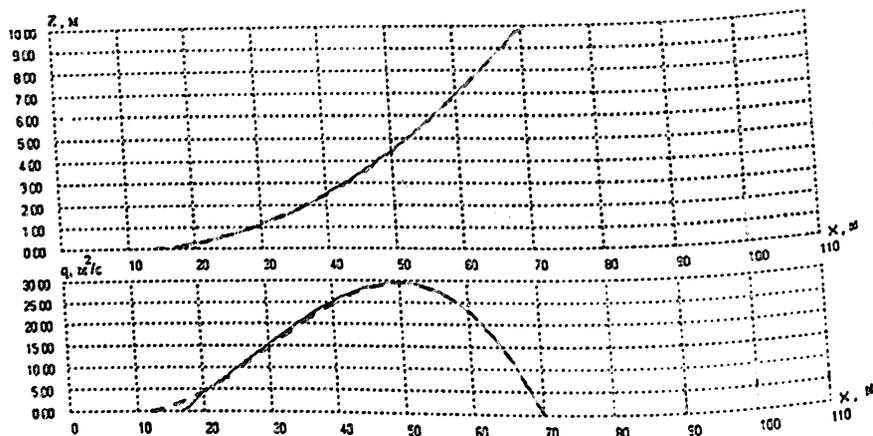


Рис. 1. Сравнение численного и аналитического решений задачи о разрушении плотины в широком прямоугольном канале без уклона и трения

Для решения вышесформулированной задачи была проведена серия численных экспериментов, в которых моделировался излив золошлаков. Рассмотрим растекание неконсолидированного золошлакового материала, расположенного в начале процесса в бесконечно длинном канале без уклона по одну сторону от дамбы и имевшего постоянную по длине канала толщину слоя.

$$h_{t=0} = \begin{cases} h_0 & \text{при } x > 0, \\ 0 & \text{при } x < 0, \end{cases} \quad v = 0. \quad (6)$$

Расчеты проводились для условной ситуации, при которой толщина слоя ожигенных золошлаков составляла 10 м. Результаты численных экспериментов легко могут быть пересчитаны для произвольной толщины слоя золошлаков по формулам подобия:

$$h_1 = \frac{H_1}{H_0} h_0, \quad x_1 = \frac{H_1}{H_0} x_0, \quad t_1 = \sqrt{\frac{H_1}{H_0}} t_0, \quad (7)$$

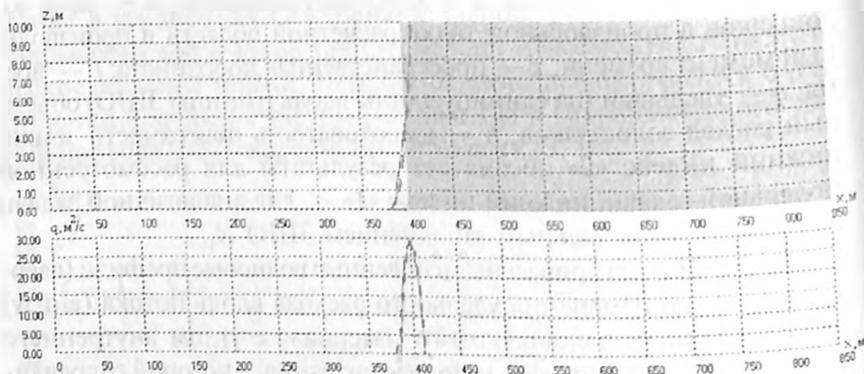
$$q_1 = \left(\frac{H_1}{H_0}\right)^{3/2} q_0, \quad n_1 = \left(\frac{H_1}{H_0}\right)^{1/6} n_0,$$

где:  $H_0$  — слой золошлаков в ЗШО перед аварией;  $h$  — слой золошлаков в произвольной точке расчетной области в произвольный момент времени;  $x$  — пространственная координата;  $t$  — время;  $q$  — удельный (на единицу длины вдоль границы ЗШО) объемный расход золошлаков;  $n$  — шероховатость поверхности земли; нижний индекс «0» обозначает результаты для рассмотренной модельной задачи, нижний индекс «1» — для аналогичной задачи с другим первоначальным заполнением ЗШО  $H_1$ .

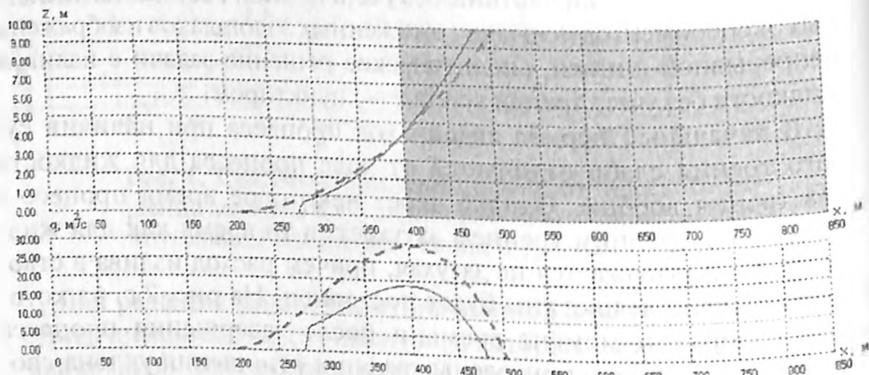
На рис. 2 (а — г) приведены мгновенные волновые профили (вверху) и графики изменения удельного расхода вдоль потока (внизу) для ожигенного золошлакового материала с углом внутреннего трения  $3^\circ$ . Рассматривалась условная ситуация, в которой гидравлическое трение не оказывает влияния на развитие аварии ( $n = 0$ ). Для сравнения на этих же чертежах изображено аналитическое решение задачи о разрушении плотины без учета трения. Результаты численных экспериментов по изливу ожигенных золошлаков изображены непрерывной линией, аналитическое решение задачи с изливом жидкости без учета трения вообще — пунктиром.

В начальный период аварии ход процесса при наличии сухого трения слабо отличается от хода процесса для жидкости без трения вообще. Однако через некоторое время процесс в среде с внутренним трением затухает, в то время как для жидкости он продолжается не затухая, причем расход излива в створе разрушенной плотины будет постоянен. На рис. 2.г, на котором изображен момент времени после завершения процесса излива золошлаков, приведены графики отношения уклона свободной поверхности золошлакового материала к углу внутреннего трения. Видно, что этот параметр близок к 1 вблизи фронта волны понижения и значительно убывает в направлении потока. Видимо, всплеск этого параметра у фронта волны повышения связан не с физическими явлениями, а с дефектом примененного численного метода (некоторый дефект методики в этой зоне виден и по результатам тестирования на рис. 1).

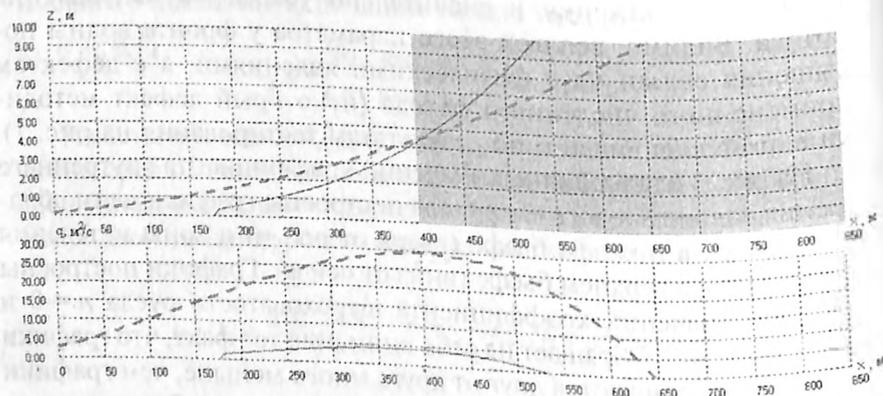
На рис. 3 для различных значений коэффициента внутреннего трения золошлакового материала построены графики длин области выноса в нижнем бьефе (вверх от оси  $\varphi$ ) и зоны истечения золошлаков в верхнем бьефе (вниз от оси  $\varphi$ ). Графики построены для двух значений коэффициента шероховатости русла  $n = 0$  и  $n = 0,1 \text{ сек/м}^{1/3}$ . Обращает на себя внимание тот факт, что графики ниже оси  $\varphi$  отличаются друг от друга много меньше, чем графики выше оси  $\varphi$ . Видимо, ход процесса при больших глубинах в верх-



а)  $t = 1,1$  сек



б)  $t = 10$  сек



в)  $t = 25$  сек

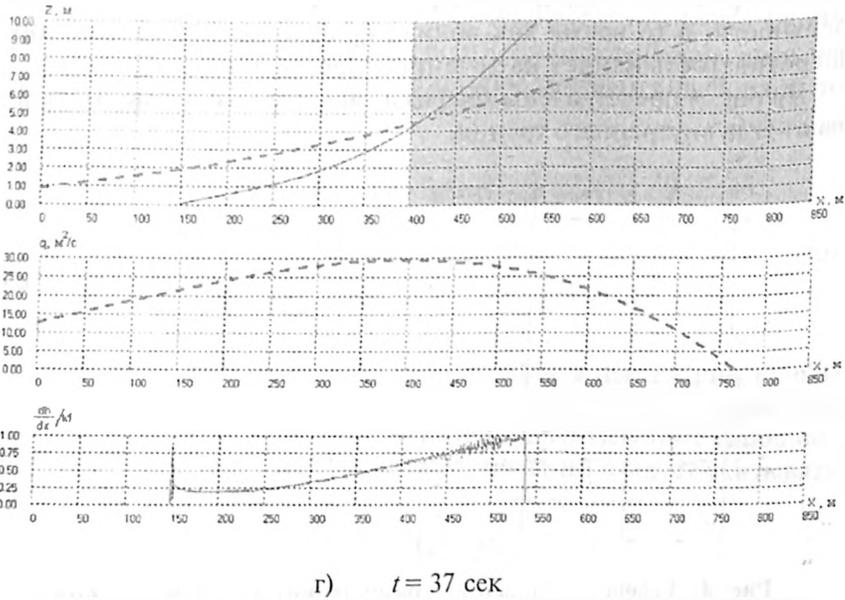


Рис. 2. Решение задачи о мгновенном разрушении плотины для обычной жидкости ( $n = 0$ ,  $k_f = 0$ , пунктирная линия) и жидкости с сухим трением ( $n = 0$ ,  $k_f = \text{tg}3^\circ$ , сплошная линия). Закрашена первоначально заполненная жидкостью область.

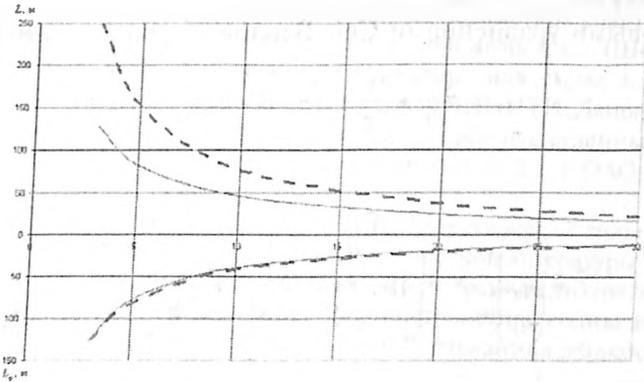


Рис. 3. Задача о мгновенном разрушении плотины для жидкости с сухим трением. Длина зоны затопления в нижнем бьефе  $L$  и области излива  $L_0$  в верхнем бьефе при различных значениях угла внутреннего трения. Пунктирная линия —  $n = 0$ , сплошная —  $n = 0,01$  сек/м<sup>1/3</sup>.

нем бьефе слабо зависит от шероховатости подстилающей поверхности, в то время как вблизи фронта волны повышения шероховатость влияет на течение существенным образом.

На рис. 4 представлены графики зависимости времени излива от угла внутреннего трения.

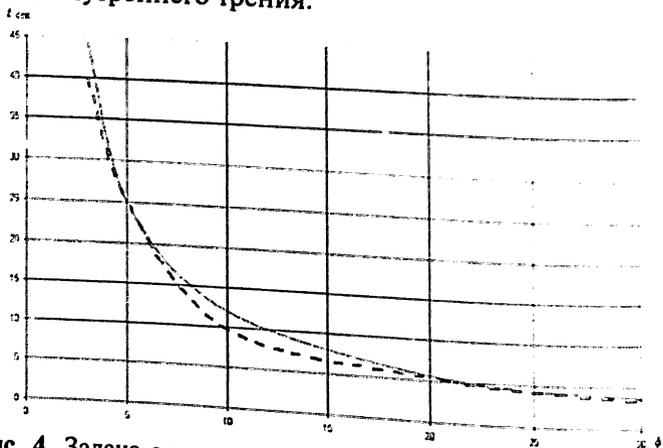


Рис. 4. Задача о мгновенном разрушении плотины для жидкости с сухим трением. Продолжительность истечения при различных значениях угла внутреннего трения. Пунктирная линия —  $n = 0$ , сплошная —  $n = 0,01$  сек/м<sup>1/3</sup>.

При аварии ЗШО и распространении волны прорыва, состоящей из ожигенных золошлаков, за пределами зоны складирования возникает существенно неоднородное течение, описываемое плановыми уравнениями Сен-Венана с сухим трением:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{X}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{Y}}{\partial y} + \bar{R} = 0, \quad (8)$$

где:

$$\bar{T} = \begin{pmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{pmatrix}, \quad \bar{X} = \begin{pmatrix} q_x \\ q_x v_x + gh^2/2 \\ q_y v_x \end{pmatrix}, \quad \bar{Y} = \begin{pmatrix} q_y \\ q_x v_y \\ q_y v_y + gh^2/2 \end{pmatrix},$$

$$\bar{R} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\lambda}{2} |v| v_x + gh \frac{\partial Z}{\partial x} + \theta_x g k_f h \\ \frac{\lambda}{2} |v| v_x + gh \frac{\partial Z}{\partial x} + \theta_y g k_f h \end{pmatrix} \quad (9)$$

$\bar{\theta}$  — вектор, направленный в случае движущейся среды в сторону, противоположенную скорости, а в случае покоящейся среды — в сторону, противоположенную градиенту свободной поверхности

$$\bar{\theta} = \begin{cases} -\frac{\bar{q}}{|\bar{q}|} & \text{при } \bar{v} \neq 0 \text{ или } |\text{grad}Z_{\text{СП}}| > \text{tg}(\varphi) , \\ 0 & \text{при } \bar{v} = 0 \text{ и } |\text{grad}Z_{\text{СП}}| = 0, \\ -\frac{\text{grad}Z_{\text{СП}}}{|\text{grad}Z_{\text{СП}}|} & \text{при } v = 0 \text{ и } \frac{\partial Z_{\text{СП}}}{\partial x} \neq 0, \end{cases} \quad (10)$$

По-видимому, наиболее тяжелые возможные аварии золошлакоотвалов могут быть связаны с течением ожиженных золошлаков. При построении осредненных по глубине упрощенных математических моделей таких явлений следует учитывать сухое трение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мелентьев В.А, Павич М.П. Катастрофические аварии хвостохранилищ //Гидротехническое строительство. № 11. 1986.
2. Михайлов Л.П., Самарин В.Г., Церапиер Л.С. Авария плотин хвостохранилища шахты "Преставель". //Гидротехническое строительство. 12, 1986.
3. Газета «Киевский телеграф». 35 (128), Киев, сентябрь 2002.
4. Ак-Тюз. Интернет-сайт [http://agat.host.netkg/arc\\_3/ak\\_tus/aktus.htm](http://agat.host.netkg/arc_3/ak_tus/aktus.htm).
5. Климович В.И., Прокофьев В.А. Расчет параметров волны прорыва и определение границы зоны затопления при аварии на ЗШО.
6. Милитеев А.Н., Сладкевич М.С. Разностная схема для решений плановых уравнений мелкой воды. //Деп. в ВИНТИ. Депонированные рукописи. 1983. Научно-технический и производственный сборник «Безопасность энергетических сооружений». Вып. 2 – 3. ОАО «НИИЭС». М.: Изд. «Глобус». 1998.
7. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч.1. Гос. Издательство физико – математической литературы. М. 1963.
8. Стокер Дж. Дж. Волны на воде. М.: «Иностранная литература». 1959.
9. Историк Б.Л., Лятхер В.М. Распространение волны прорыва в призматическом русле. //Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1975 № 1.
10. Динамика сплошных сред в расчетах гидротехнических сооружений. Под ред. Лятхера В. М. и Яковлева Ю. С. М.: «Энергия». 1976.

## **II. ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ «СООРУЖЕНИЕ – ОСНОВАНИЕ» С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ**

*Белостоцкий А.М., доктор техн. наук (НИЦ СтаДиО)*

*Рассказов Л.Н., доктор техн. наук (МГСУ)*

Математические модели состояния грунтовых сооружений и оснований разрабатываются и анализируются на основе современных численных методов механики. Они реализуют феноменологические пространственные (в общем случае — трехмерные) нелинейные модели поведения грунтов, анализируются в составе развитых программных комплексов и содержат набор параметров, позволяющих увязать результаты расчетных исследований с данными натурных наблюдений в период строительства и эксплуатации в представительном множестве точек измерений. Эти общие положения тем более применимы к сложным пространственным системам «сооружение — основание» с проявлением опасных оползневых процессов (например, в грунтовых склонах гидротехнических сооружений), для которых достоверный вывод об их устойчивости возможен лишь на основе подробного математического моделирования с привлечением всех достижений современной вычислительной механики.

1. В общем случае исследуемая механическая система состоит из связанных пространственных массивных, одно- и многослойных оболочечных и пластинчатых, мембранных и стержневых фрагментов (подсистем) и содержит «абсолютно» жесткие инерционные тела и полости с жидкостью произвольной формы. Учи-

тываются последовательность (поэтапность) возведения и влияние предварительного напряжения на жесткость сооружения. Материалы изотропного или ортотропного деформируемого твердого тела (бетон, железобетон, металлы, грунтовые массивы и другие) произвольно распределены по системе. Система может содержать геометрически предопределенные дискретные швы и макротрещины. Податливое основание конструкции или сооружения либо включается в рассматриваемую систему, либо моделируется заданными (предварительно определенными) жесткостными, инерционными и диссипативными связями, в частности по гипотезе Винклера. Учитываются распределенные и сосредоточенные массы и моменты инерции, упругие, инерционные и диссипативные связи точек системы.

Нагрузки и воздействия на систему включают квазистатические (вес, неравномерные произвольно ориентированные поля объемных, поверхностных и линейных нагрузок, сосредоточенные силы и моменты, температура) и динамические (кинематические и силовые) составляющие. Температурные, фильтрационные и гидродинамические нагрузки могут определяться из решения несвязанных стационарных, нестационарных и динамических задач теории поля. Допускается задание произвольных однородных и неоднородных кинематических граничных условий, в том числе условий осевой и циклической симметрии и антисимметрии, а также внутренних связей (включая шарнирные и скользящие) точек системы.

Нелинейность системы может быть обусловлена как конечными перемещениями и деформациями ее тонкостенных элементов и геометрически зависимыми характеристиками связей («геометрическая» нелинейность), так и физически нелинейными эффектами пластичности и ползучести материалов.

2. Математические модели систем «сооружение — грунтовое основание» реализуют, в общем случае, трехмерные нелинейные схемы метода конечных элементов в перемещениях для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) упомянутых систем. Возможны альтернативные модели учета грунтового основания: перемещения на подошве сооружений, задаваемые по данным натурных измерений и из модели склона, и непосредственно включаемый в расчетную модель представительный блок основания. В значимых выявленных одиночных макротрещинах в бетоне и на контакте «сооружение-основание» учитываются существенно нелинейные эффекты отрыва

и трения (модель Кулона). Для решения указанных нелинейных задач используется развитый суперэлементный алгоритм, сочетающий на последнем контактном уровне решение задачи квадратичного программирования (анализ отрыва) и эвристические итерационные схемы (учет трения) [3].

3. Для исследований НДС грунтовых сооружений вообще и оползневых склонов в частности и в особенности вновь разработан алгоритм нелинейного трехмерного расчета на базе «энергетической» реологической модели грунта, предложенной д.т.н. проф. Рассказовым Л.Н. [4].

*Определение расчетных характеристик грунтов в рамках энергетической модели.* Для определения характеристик грунтов должны быть проанализированы материалы инженерно-геологических изысканий, натурных наблюдений, научно-технических отчетов и публикаций, касающихся вопросов оценки состояния склонов исследуемого сооружения. В результате отбираются подходящие для моделирования материалы трехосных испытаний основных грунтов, слагающих склон и техногенные образования в расчетной области. Для оценки НДС используются также аналогичные для характерных условий и данных видов грунтов по обобщению опытных данных при реализации данной модели. В результате анализа экспериментальных и аналоговых данных выделяются несколько уровней расчетных характеристик грунтов, слагающих склон, которые определяют возможный диапазон изменения данных характеристик, необходимый для дальнейшей калибровки модели.

В рамках энергетической реологической модели связь между объемными деформациями  $e$  и средним напряжением  $\sigma$  описывается степенной зависимостью с экспоненциальной «добавкой» на ползучесть:

$$d\sigma = \frac{E_0 \sigma^{1-n}}{n(1 - e^{-\beta(t-\tau)^{-1/n}})} de \quad (1)$$

Для определения величины начального модуля объемной деформации  $E_0$  и показателя степени  $n$  используется график зависимости «объемная деформация — среднее напряжение».

Для определения значения  $U_0$  — энергии предварительного уплотнения, аналогичной сцеплению — рассматривается разность энергии формоизменения и объемного деформирования в точке, когда грунт достигает предельного состояния:

$$U_0 = \int_L S_{ij} d\epsilon_{ij} - \int_L \sigma \cdot de \quad (2)$$

Энергия начальной прочности грунта  $U_0$  вместе с энергией объемного сжатия  $\int \sigma de$  ( $\sigma$  — шаровая компонента тензора напряжений,  $e$  — объемная деформация), накопленной или расходуемой на всем пути нагружения  $L$ , представляют собой запас прочности материала, который при нагружении расходуется на реализацию девиаторных компонент деформаций, доводящих материал до разрушения. Здесь  $\int S_{ij} d\epsilon_{ij}$  — энергия деформации формоизменения, снижающая прочность грунта в процессе нагружения,  $S_{ij}$ ,  $\epsilon_{ij}$  — девиаторные компоненты тензоров напряжений и деформаций.

Соотношение девиаторных составляющих тензора напряжений и деформаций в энергетической модели грунта записывается в виде:

$$dS_{ij} = 2\sigma^{1-n} \left( \frac{E_0 f(v) e^{B(\bar{K}-1)}}{n} + G_0 \bar{K} \left( 1 - e^{B(\bar{K}-1)(t-\tau)^q} \right) \right) d\epsilon_{ij} \quad (3)$$

где  $G_0$  — начальный модуль сдвига;  $B$  — показатель упругих связей;  $f(v)$  — функция коэффициента Пуассона;  $\bar{K}$  — коэффициент относительной прочности (изменяется в пределах от 0 до 1).

В результате обработки экспериментальных данных получают значения начального модуля сдвига  $G_0$ , который определялся в точках, соответствующих перелому графика зависимости  $G = f(\bar{K})$ , а также параметра  $B$ , характеризующего упругие связи при развитии девиаторного нагружения. Константы  $\beta$ ,  $\xi$  и  $\eta$ , характеризующие ползучие свойства грунтов, определяются либо на основе специальных реологических экспериментов, либо (при отсутствии таковых) по грунтам-аналогам со сходными физико-механическими характеристиками, для которых были проведены эксперименты по полной программе.

В песках проявляется ярко выраженный эффект дилатансии — изменение объема при деформациях формоизменения. В энергетической модели грунта этот эффект описывается следующей зависимостью:

$$de = \text{sign}(\Gamma_0 - \Gamma) \frac{Md\Gamma}{\sigma} \quad (4)$$

где:  $de$  — приращение объемных деформаций за счет дилатансии;  $M$  — эмпирический коэффициент — «модуль дилатансии».

В качестве знака дилатансии в (4) введена разность текущего ( $\Gamma$ ) и критического ( $\Gamma_0$ ) значений второго инварианта девиатора деформаций. Это обусловлено тем, что первоначальная дилатансия является деформацией сжатия. Когда же интенсивность деформаций (второй инвариант девиатора деформаций) достигает некоторого критического значения  $\Gamma_0$ , определенного из эксперимента, знак дилатансии меняется, и начинаются деформации расширения.

*Алгоритм нелинейного расчета* сочетает:

пошаговое (инкрементальное) нагружение в пределах каждого этапа возведения (нагружения) объекта, позволяющее адекватно проследить процесс возможной сложной перестройки тензоров деформаций и напряжений;

«внешний» итерационный процесс для каждого инкремента — вариант метода переменных параметров упругости, — на каждом шаге которого формируется и решается квазилинейная система уравнений равновесия с перестраиваемой матрицей жесткости; коэффициенты матрицы жесткости (матрицы упругости) зависят от текущих компонент шарового и девиаторного тензоров напряжений и соответствуют состояниям нагружения или разгрузки реологической модели

$$[K(\sigma)] = [K]^e + \sum_e [k(\sigma)]^e, \quad [k(\sigma)]^e = \int \int \int [B]^T [D'(\sigma)] [B] dV,$$

$$D'_{ii}(\sigma) = \lambda(\sigma) + 2\mu(\sigma); D'_{ij}(\sigma) = \lambda(\sigma); D'_{kk}(\sigma) = \mu(\sigma), i, j = 1, 2, 3, k = 4, 5, 6$$

$$\text{Нагрузка: } dU = \int S_{ij} d\varepsilon_{ij} + \int \sigma de \geq 0 \quad \text{Разгрузка: } dU < 0$$

$$\mu(\sigma) = \sigma^{1-n} \left( \frac{E_0 f(v) e^{B(\bar{K}-1)}}{n} + G_0 \bar{K} \left( 1 - e^{B(\bar{K}-1)(t-\tau)^n} \right) \right); \quad \mu(\sigma) \equiv \mu_p = G_{0p};$$

$$\lambda(\sigma) = \frac{E_0 \sigma^{1-n}}{n(1 - e^{-\beta(t-\tau)^{-\xi}})^n} - \frac{2}{3} \mu(\sigma) \quad \lambda(\sigma) \equiv \lambda_p = E_{0p} - \frac{2}{3} \mu_p; \quad (5)$$

«внутренний» итерационный процесс для каждой точки оп-ределения напряжений в трехмерных изопараметрических КЭ до достижения точного выполнения уравнения состояния реологического материала.

Для решения на каждом шаге «внешних» итераций системы линейных уравнений равновесия МКЭ «супер»больших порядков (200000 – 1000000), характерных для реальных трехмерных моделей, используется эффективный вариант метода неполной факторизации — предобусловленная схема сопряженных градиентов (PCG) [2].

Многоэтапность возведения и/или нагружения обеспечивается не только хранением накопленных компонент напряжений и деформаций, но и организацией ускоренного алгоритма вычисления «ползучих» приращений перемещений от нагружения данного этапа во все интересующие моменты времени, приуроченные к последующим расчетным этапам. По завершении полного цикла расчетов формируется база данных и результатов, позволяющая повторно выполнить расчет по любому этапу (или группе этапов) с видоизмененными характеристиками материалов и/или нагрузок. Тем самым созданы программно-алгоритмические предпосылки для построения и калибровки комплексных трехмерных математических моделей НДС сооружений, содержащих грунтовые массивы.

4. В качестве основного программного средства, реализующего указанные алгоритмы, используется верифицированный многоцелевой суперэлементный программный комплекс СТАДИО для решения задач теории поля, статики и динамики произвольных пространственных систем [1, 2]. Специально для задач расчета грунтовых сооружений разработан генератор дву- и трехмерных конечноэлементных моделей (*Spider-паук*, автор — к.т.н. Пичугин Д.В.), автоматизированно строящий качественную сетку треугольных в плане КЭ со сгущениями в требуемых зонах.

5. Выполнена представительная серия тестовых задач (прямоугольный блок грунтового массива под весовой и поверхностной нагрузками; цилиндрический образец в условиях, соответствующих трехосным испытаниям; трехмерная система «жесткий штамп — грунтовое основание» при поэтапном приложении к штампу вертикальных и сдвиговых нагрузок и другие), численные решения которых качественно и количественно соответствуют физическим представлениям, данным по альтернативной численной методике (метод локальных вариаций) и результатам экспериментов. Установлен диапазон параметров численных схем, обеспечивающий устойчивую и быструю сходимость решения.

В частности, для показательной трехмерной задачи «жесткий штамп — грунтовое основание» на топологически регуляр-

ной сетке, образованной 2000 изопараметрическими КЭ («кирпичиками») грунта и 32-мя КЭ штампа, получена картина потери устойчивости системы (рис.1 на цветной вкладке) при характерных соотношениях касательных и нормальных напряжений под штампом:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c.$$

Соответствующие характеристики реологической энергетической модели грунта (песка) принимались на основании данных эксперимента.

6. Базовая параметризованная конечноэлементная модель характерного «оползневого» поперечника 9 – 9 (IX) Загорской ГАЭС, автоматизированно сгенерированная препроцессорными средствами комплекса СТАДИО-2003 (*Spider*) с требуемыми сгущениями сетки в зонах ожидаемых значимых градиентов перемещений и напряжений (рис. 2 на цветной вкладке, рис. 1), содержит 30 зон (материалов), 5414 объемных изопараметрических КЭ первого порядка точности (в форме треугольных призм) и 5538 узлов с двумя значимыми степенями свободы (горизонтальные и вертикальные перемещения) в каждом. На левой ( $x = -250$  м) и правой ( $x = 830$  м) граничной плоскостях, достаточно удаленных от зоны возможного развития основных оползневых явлений, ставятся условия отсутствия горизонтальных перемещений, на нижней ( $y = 100$  м) — отсутствие всех перемещений. Реальная задача о плоском деформированном состоянии намеренно решалась как вырожденная трехмерная с целью апробации разработанного алгоритма на реальной задаче значительной вычислительной размерности.

Каждый из 10-и расчетных этапов возведения (нагрузки) моделируется соответствующим «наполнением» физико-механических свойств 30-и зон: либо реальными характеристиками парамоновской и зеленоцветной глин, сеноманских песков, нарушенной и ненарушенной морены, техногенных материалов (грунтов и бетона подпорных стенок) — табл.1, либо фиктивными «нулевыми» для реально отсутствующих зон (техногенные зоны — для первых этапов, материалы в котловане — при его выборке). Такой подход позволяет сформировать топологически и геометрически единую базовую конечноэлементную модель и не перестраивать ее в процессе многоэтапного расчета.

Учет веса грунта и фильтрационных нагрузок выполнялся по следующей схеме:

для всех этапов до заполнения верхнего бассейна плотность (удельный вес) сеноманских песков и морены принимается для

Безопасность энергетических сооружений

Таблица 1

Характеристики энергетической модели грунтов склона ЗГАЭС

Характеристики грунта	Наименование грунтов							
	Глины парамоновские (1)	Пески сеноманские (2)	Глины зеленоцветные (наруш.) (3)	Глины зеленоцветные (перстиране) (4)	Мореца (разуплотненная) (5)	Морена (коренная) (6)	Техногенные насыпи (подсыпка, упорная призма, банкет) (7)	Моренный суглинок дамбы (8)
Уд. вес скелета грунта, ( $\gamma_{ск}$ )	1,47	1,57	1,29	1,50	1,97	2,04	1,80	2,01
Уд. вес влажного грунта, ( $\gamma_{об}$ )	1,90	1,62	1,80	1,95	2,23	2,27	2,00	2,23
Уд. вес насыщ. грунта, ( $\gamma_{нас}$ )	1,93	1,98	1,82	1,95	2,24	2,28	2,02	2,26
Уд. вес взвеш. грунта, ( $\gamma_{взв.}$ )	0,93	0,98	0,82	0,95	1,24	1,28	1,02	1,26
Модуль объемной деформации начальный, $E_0$	1220	$\frac{1060}{1300}$	350	480	$\frac{200}{450}$	$\frac{300}{600}$	$\frac{190}{250}$	$\frac{180}{300}$
Степень, $n$	1,0 - 0,67*	$\frac{0,63}{0,65}$	0,68	0,68	$\frac{0,52}{0,60}$	$\frac{0,60}{0,55}$	0,64	0,55
Предельные деформации, $\Gamma_0$	-	0,02	-	-	-	-	-	-
Модуль дилатансии, $M$	0	10	0	0	0	0	0	0
Прочность частиц, $[\sigma]$	-	200	-	-	-	-	-	-
Модуль сдвига начальный, $G_0$	788	$\frac{120}{250}$	$\frac{25}{35}$	$\frac{15}{20}$	$\frac{35}{80}$	$\frac{110}{200}$	$\frac{116,6}{150}$	$\frac{103}{180}$
Энергия начальной уплотнения, $U_0$	3,0	$\frac{3,0}{4,0}$	$\frac{0,9}{5,0}$	$\frac{1,0}{8,0}$	$\frac{1,4}{1,8}$	$\frac{1,8}{3,3}$	$\frac{2,5}{3,0}$	$\frac{4,0}{4,5}$
Показатель упругих связей, $B$	30	20	20	30	30	20	20	30
Показатели свойств ползучести: $-\beta$	1,314	1,45	0,956	0,956	1,16	1,078	1,16	1,078
Показатели свойств ползучести: $-\xi$	0,942	0,946	0,945	0,945	0,960	0,962	0,960	0,962

Продолжение таблицы 1

	1	2	3	4	5	6	7	8
Показатели свойств								
ползучести: $-\eta$	-0,252	-0,200	-0,171	-0,171	-0,203	-0,210	-0,201	-0,209
Функция коэффициента Пуассона, $f(v)$	1,5	1,5	0,8	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5
Модуль объемной деформации при разгрузке, $E^p_0$	12200	<u>10600</u> 13000	3500	4800	<u>2000</u> 4500	<u>5000</u> 6000	<u>1900</u> 2500	<u>1800</u> 3000
Модуль сдвига при разгрузке, $G^p_0$	7880	<u>1200</u> 2500	<u>250</u> 350	<u>150</u> 200	<u>500</u> 800	<u>1200</u> 2000	<u>1166</u> 1500	<u>1030</u> 1800

**Примечания:** в числителе — характеристики, соответствующие минимальным прочностным и максимальным деформативным свойствам грунтов (для разменных величин — тс, м) — модель 1; в знаменателе — характеристики, соответствующие максимальным прочностным и минимальным деформативным свойствам грунта, модель 2. Степень  $n$  для парамоновских глин меняется скачкообразно в процессе нагружения: от 1,0 для средних напряжений сжатия менее 70 т/м<sup>2</sup> до 0,67 при большем сжатии.

взвешенного состояния, зеленоцветных глин и парамоновских глин — для водонасыщенного состояния, техногенных материалов — для естественной влажности. При этом на кровлю зеленоцветных глин (на соответствующие грани КЭ) прикладываются неравномерная вертикальная поверхностная нагрузка, пропорциональная мощности морены, а на кровлю парамоновских глин — пропорциональная мощности сеноманских песков. Кроме того, по всей расчетной области задаются горизонтальные объемные фильтрационные нагрузки, пропорциональные градиентам поля фильтрации;

для эксплуатационных этапов (с заполненным ВБ) применяется аналогичная схема приложения нагрузок с точностью до учета положения кривой депрессии, которая является границей ряда зон (рис. 2 на цветной вкладке, рис. 1).

Приведенные нагрузки для этапа 5 (выемка котлована под упорную призму) программно формировались как узловые силы по контуру котлована от накопленных напряжений в приграничных конечных элементах.

**Результаты расчетных исследований.** Для этапа 1 — формирования естественного склона — отчетливо прослеживается существенно нелинейный неконсервативный характер полученного решения: качественная перестройка горизонтальных перемещений

Этап 1 — естественное состояние



Этапы 3 и 4 — возведение дамбы и подпорных стенок ВБ



Этап 5 — выемка котлована



Этапы 7, 8, 9, 10 — отсыпка контрбанкета, подъемы уровня ВБ, эксплуатация.



Рис. 1. Конечноэлементные модели этапов формирования и эксплуатации склона Загорской ГАЭС (поперечник IX)

и существенное количественное нарастание вертикальных перемещений для итогового состояния по сравнению с начальным уровнем, соответствующим квазиупругому состоянию для малых нагрузок. Поля итоговых расчетных горизонтальных и вертикальных перемещений указывают на формирование протяженного массива (около 300 м, начиная от подпорной стены 2) со значимыми горизонтальными перемещениями (до 3,4 м в зоне сеноманских песков и зеленоцветных глин, до 2,6 м на поверхности), вызывающее дополнительную осадку грунтов в верхней части склона (под подпорной стенкой — до 5 м) и препятствующее осадкам в зоне упорной призмы и правее (явление выпора).

Распределения расчетных горизонтальных и вертикальных напряжений согласуются с полем перемещений и удовлетворяют необходимым критериям равновесия, гладкости и соответствия физическим представлениям. Расчетный коэффициент надежности  $1/K_3$  (величина, обратная коэффициенту запаса прочности  $K_3$ ) свидетельствует о наличии значимой зоны с тревожащим уровнем этого фактора ( $K_3 = 1,5$ ), которая может развиваться на последующих этапах нагружения (возведения).

Этап 2. (отсыпка техногенного слоя). Характеризуется весьма незначительным нарастанием расчетных перемещений и напряжений.

Этап 3. (возведение дамбы верхнего бассейна). Максимальные горизонтальные перемещения достигают 1,1 м в зоне сеноманских песков под “правым” краем дамбы, а на поверхности естественного склона не превосходят 0,56 м, расчетные осадки — до 2 м в зоне дамбы. «Ползучие» приращения горизонтальных и вертикальных перемещений свидетельствуют об их временном затухании в первые 40 лет и качественно согласуются с имеющимися натурными данными (рис. 3 на цветной вкладке).

Этап 4. (возведение подпорной стены). Качественно картина формирования и итогового НДС повторяет предыдущий этап 3 при меньших значениях определяющих параметров.

Этап 5. Выемка котлована под упорную призму вызывает знакопеременное распределение горизонтальных перемещений (сближение берегов котлована) и значимые явления выпора в зоне выемки. При этом сближение берегов достигает 0,6 м, а подъем дна котлована — 0,7 м.

Этап 6. Засыпка упорной призмы частично компенсирует поле НДС, возникшее в результате выемки.

Этап 7. Отсыпка контрбанкета порождает знакопеременное поле горизонтальных перемещений (до 0,7 м в зоне сеноманских песков, до 0,1 м на поверхности) и значимые осадки в зоне контрбанкета (до 1,05 м).

Этап 8. Подъем уровня воды ВБ до отм. 257,5 м характеризуется значимыми осадками в зоне ВБ (до 0,8 м) и смещениями в зоне сеноманских песков под подпорной стеной 2 (до 0,6 м). Смещения на поверхности не превосходят 0,12 м (рис. 4 на цветной вкладке). Приращения горизонтальных и вертикальных перемещений за 5, 10 и 15 лет свидетельствуют об их временном затухании и качественно согласуются с имеющимися натурными данными.

Этап 9. Подъем уровня воды ВБ до отм. 266,5 м незначительно (не более 15% по экстремумам) повышает расчетные параметры этапа 8.

**Этап 10** (эксплуатация). Представляет собой суперпозицию «ползучих» частей решений от значимых этапов формирования склона, определяется, в основном, вкладом этапов возведения дамбы и подпорных стенок и имеет сложный пространственно-временной характер (таблицы 2 – 4).

*Таблица 2*

**Расчетные приращения смещений в характерных точках склона, мм**

Координата по X, м	Узел (точка) по глубине*	<i>Δt, лет</i>			
		10	20	40	60
0 (ВБ)	1	5,3	24,1	41,2	40,0
	2	-19,7	-18,9	-6,8	-2,3
	3	13,4	31,8	4,30	55,8
	4	11,0	25,1	35,6	53,8
50 (под ПС)	1	49,3	78,2	113,0	140,0
	2	39,6	57,4	72,3	88,1
	3	38,9	68,8	85,3	110,
	4	19,8	43,1	56,9	79,5
100	1	129,0	175,0	246,0	309,0
	2	69,2	124,0	157,0	187,0
	3	34,9	61,6	82,3	99,7
	4	62,7	99,4	127,0	150,0
200	1	96,9	186,0	269,0	346,0
	2	84,6	166,0	250,0	322,0
	3	15,3	37,9	51,0	64,8
	4	4,4	24,3	39,9	50,3
500	1	20,0	29,8	15,2	26,7
	2	20,3	30,0	14,9	26,2
	3	20,6	30,0	14,5	25,6
	4	20,9	30,4	15,3	26,4

Результаты расчетов по данной модели качественно согласуются с данными натурных наблюдений, подтверждают работоспособность разработанного программно-алгоритмического обеспечения и позволят, на следующей стадии расчетных исследований, обоснованно проводить калибровку трехмерной модели склона.

7. Многопараметрические вычислительные эксперименты позволили установить диапазон рациональных параметров шагово-итерационного алгоритма для модели НДС характерного склона. При увеличении числа шагов нагружения (более 20) решения практически не изменяются, а при малом их числе (менее 4 для этапов со значительной перестройкой поля напряжений и деформаций) вообще не удается получить сходящееся нелиней-

Расчетные приращения вертикальных перемещений  
в характерных точках склона, мм

Координата по X, м	Узел (точка) по глубине*	Δt, лет			
		10	20	40	60
0	1	29,5	18,5	-1,1	-10,3
	2	-0,8	-5,8	-17,9	-29,7
	3	3,0	2,1	-8,5	-16,1
	4	4,0	7,0	-1,2	-6,1
50	1	-74,6	-99,5	-	-187,0
	2	-21,3	-49,0	149,0	-88,4
	3	-15,6	-34,5	-74,9	-61,4
	4	-11,4	-31,8	-53,3	-59,0
200	1	37,9	53,9	66,8	68,7
	2	27,9	40,4	53,7	53,7
	3	19,4	27,1	36,9	36,2
	4	15,3	22,1	31,8	29,7
500	1	1,6	2,3	-11,0	-10,0
	2	1,8	2,5	-10,6	-9,6
	3	2,0	2,7	-10,0	-9,0
	4	1,9	2,7	-10,1	-9,1

\*Узел (точка) по глубине: 1 — на естественной поверхности склона; 2 — на границе «морена — зеленые глины»; 3 — на границе «зеленые глины — сеноманские пески»; 4 — на границе «сеноманские пески — парамоновские глины» (к табл.2, 3).

ное решение. Увеличение относительной точности определения перемещений во внешнем итерационном цикле на порядок (с 0,001 до 0,0001) приводит к примерно двукратному увеличению числа итераций, но уже практически не изменяет результат. В соответствии с теоретическими представлениями идентичные решения получаются при использовании метода Холецкого (вариант разложения Гаусса) и предобусловленной схемы сопряженных градиентов для рассмотренной «однослойной» и дву-, трех- и четырехслойной трехмерных моделей.

Одна внешняя итерация для решенной двумерной задачи с избыточной трехмерной сеткой требует на ПЭВМ Pentium II, 400MHz около 17 сек. при использовании прямого метода и от 5 до 30 сек. (в зависимости от точности начального приближения) при использовании предобусловленной схемы сопряженных градиентов. Эти показатели, достигнутые многоуровневой оптимизацией используемых численных схем, позволяют обосновать

Таблица 4

Расчетные скорости и ускорения смещений и осадок

Координата по X, м	Точка по глубине	$\frac{u_{(10-0)}}{u_{(10-10)}}$	$\frac{u_{(20-10)}}{u_{(20-10)}}$	$\frac{u_{(40-20)}}{u_{(40-20)}}$	$\frac{u_{(60-40)}}{u_{(60-40)}}$	$\frac{\ddot{u}_{(15-5)}}{\ddot{u}_{(15-5)}}$	$\frac{\ddot{u}_{(30-15)}}{\ddot{u}_{(30-15)}}$	$\frac{\ddot{u}_{(50-30)}}{\ddot{u}_{(50-30)}}$
		ММ/ГОД	ММ/ГОД	ММ/ГОД	ММ/ГОД	ММ/ГОД <sup>2</sup>	ММ/ГОД <sup>2</sup>	ММ/ГОД <sup>2</sup>
0	1	<u>0,53</u> 2,95	<u>1,88</u> -1,1	<u>0,855</u> -0,98	<u>-0,06</u> -0,46	<u>0,135</u> -0,405	<u>-0,0683</u> 0,008	<u>-0,04675</u> 0,026
	2	<u>-1,97</u> 0,08	<u>0,08</u> -0,5	<u>0,605</u> -0,605	<u>0,225</u> -0,59	<u>0,196</u> -0,058	<u>0,035</u> -0,007	<u>-0,019</u> 0,00075
	3	<u>1,34</u> -0,30	<u>1,84</u> -0,09	<u>-1,375</u> -0,53	<u>2,575</u> -0,38	<u>0,05</u> 0,021	<u>-0,2143</u> -0,0293	<u>0,1975</u> 0,0075
	4	<u>1,1</u> 0,4	<u>1,41</u> 0,3	<u>0,525</u> -0,41	<u>0,91</u> -0,245	<u>0,031</u> -0,01	<u>-0,059</u> -0,0473	<u>0,01925</u> 0,0082
50	1	<u>4,93</u> -7,46	<u>2,89</u> 2,49	<u>1,74</u> 4,98	<u>1,35</u> -1,9	<u>-0,204</u> 0,995	<u>-0,766</u> 0,166	<u>-0,0195</u> -0,344
	2	<u>3,96</u> -2,13	<u>1,78</u> -2,77	<u>0,745</u> -1,295	<u>0,79</u> -0,675	<u>-0,218</u> -0,064	<u>-0,069</u> 0,09	<u>0,00225</u> 0,031
	3	<u>3,89</u> -1,56	<u>2,99</u> -1,89	<u>0,825</u> -0,94	<u>1,235</u> -0,405	<u>-0,09</u> -0,033	<u>-0,1443</u> 0,0633	<u>0,0205</u> 0,02675
	4	<u>1,98</u> -1,14	<u>2,33</u> 2,04	<u>0,69</u> -0,97	<u>1,13</u> -0,39	<u>0,035</u> -0,09	<u>-0,109</u> 0,0713	<u>0,022</u> 0,029
200	1	<u>9,69</u> 3,79	<u>8,91</u> 1,6	<u>4,15</u> 0,645	<u>3,85</u> 0,095	<u>-0,78</u> -0,219	<u>-0,317</u> -0,0636	<u>-0,015</u> -0,0275
	2	<u>8,46</u> 2,79	<u>8,14</u> 1,25	<u>4,2</u> 0,665	<u>3,6</u> 0,00	<u>-0,032</u> -0,4542	<u>-0,2626</u> -0,039	<u>-0,04</u> -0,03325
	3	<u>1,53</u> 1,94	<u>2,26</u> 0,77	<u>0,655</u> 0,49	<u>0,69</u> -0,035	<u>0,073</u> -0,117	<u>-0,107</u> -0,0186	<u>0,0023</u> -0,2625
	4	<u>0,44</u> 1,53	<u>1,99</u> 0,68	<u>0,78</u> 0,485	<u>0,52</u> -0,105	<u>0,155</u> -0,085	<u>-0,0806</u> -0,013	<u>-0,0173</u> -0,0295
500	1	<u>2,0</u> 0,16	<u>0,98</u> 0,07	<u>-0,73</u> -0,665	<u>0,575</u> 0,05	<u>-0,102</u> -0,009	<u>-0,114</u> 0,049	<u>0,06525</u> 0,03575
	2	<u>2,03</u> 0,18	<u>0,97</u> 0,07	<u>-0,755</u> -0,655	<u>0,565</u> 0,05	<u>-0,106</u> -0,011	<u>-0,115</u> -0,0903	<u>0,066</u> 0,05775
	3	<u>2,06</u> 0,20	<u>0,94</u> 0,07	<u>-0,775</u> -0,635	<u>0,555</u> 0,05	<u>-0,112</u> -0,013	<u>-0,1143</u> -0,047	<u>0,08866</u> -0,09425
	4	<u>2,09</u> 0,19	<u>0,95</u> 0,08	<u>-0,755</u> 0,64	<u>0,555</u> 0,05	<u>-0,114</u> -0,011	<u>-0,013</u> -0,048	<u>0,0655</u> -0,0295

ванно утверждать о достижимости результатов расчета реальных комплексных трехмерных систем «склон — основные сооружения» сложных объектов энергетики.

8. Расчетные исследования НДС склона водоводов Загорской ГАЭС, выполненные методами конечных элементов для характерного поперечника IX, выявили возможность возникновения опасных оползневых процессов при определенных «ослабленных» характеристиках материалов (прежде всего, зеленоцветных глин и моренного суглинка) в рамках «энергетической» наследственной модели грунтов (табл.2 — 4). Та же модель при усиленных характеристиках грунтов показывает устойчивую работу склона на всех этапах его формирования и эксплуатации.

Численно установленный факт затухания, а затем и возможного нарастания смещений склона имеет принципиальное значение. Только энергетический подход позволил выявить эту особенность поведения склона: приращение энергии формоизменения медленно снижалось, что приводило к затухающему характеру перемещений. Но когда суммарная величина энергии формоизменений стала увеличиваться быстрее нарастания энергии всестороннего сжатия шарового тензора напряжений, величина ползучих деформаций девиатора деформации начала нарастать, что может привести, в конечном счете, к оползанию, если не будут приняты соответствующие меры.

Эффект «самопроизвольного» развития оползней возможен без участия внешних факторов на участках «благополучных» склонов, где ползучие подвижки, казалось бы, уже шли к своему завершению и «вдруг ...». Сразу начинают искать в качестве причин внешние силовые воздействия, но оказывается их может и не быть.

Полученные результаты обосновывают необходимость разработки трехмерных нелинейных реологических моделей НДС системы «склон — сооружения», учитывающих реальную историю возведения и нагружения и дополнительные резервы несущей способности за счет пространственной неоднородности и работы системы. Именно эти трехмерные модели, принципиальная возможность построения которых информационно-алгоритмически обеспечена и подтверждена в ходе выполненных исследований, и предлагается калибровать по данным натурных наблюдений и интегрировать в действующую компьютерную систему мониторинга СиМонЭкс-ЗГАЭС.

9. В настоящее время результаты наблюдений за смещениями оползневого склона, прежде всего участка «Южный», не могут

быть использованы для строгой калибровки математической модели как из-за недостаточного количества обратных отвесов, так и вследствие малой достоверности показаний их основной части. Поэтому представляется необходимым провести модернизацию имеющихся отвесов и, возможно, установить новые отвесы в «неохваченных» зонах проявления оползневых явлений.

Вдоль каждого выбранного склона строго по оси должны быть установлены поверхностные марки и обратные отвесы, причем поверхностная марка и обратный отвес должны быть расположены в непосредственной близости друг от друга (5 + 10 м). Эти пары лучше устанавливаются на расстоянии 100 м друг от друга, а непосредственно при подходе к реке и на крутых участках склона через 50 м. Такое попарное расположение марок и обратных отвесов позволит лучше контролировать: тенденции смещений, с одной стороны, и результаты замеров по обратному отвесу и марке на поверхности склона, с другой стороны.

Наблюдения за смещениями марок и отвесов должны вестись постоянно. Частота наблюдений должна устанавливаться в зависимости от результатов наблюдений:

при снижении горизонтальных или вертикальных перемещений (ускорение движения точек на поверхности устойчиво отрицательно) наблюдения можно проводить один раз в месяц, если же абсолютная величина отрицательного ускорения снижается, то частота наблюдений должна возрастать;

если скорость перемещений (горизонтальных или вертикальных) нарастает, т.е. ускорение положительно, то наблюдения необходимо вести в зависимости от абсолютной величины ускорения еженедельно, ежедневно и даже возможно несколько раз в день за отдельными реперами и отвесами.

10. Выполненные разработки и исследования выявили специфические уязвимые звенья в построении калиброванных моделей многих грунтовых массивов, оснований и сооружений:

сильное влияние «естественного» состояния, формируемого при весьма неопределенных условиях, на поведение сооружений в наблюдаемые периоды строительства и эксплуатации,

трудности обоснованного задания параметров для неоднородных нелинейных реологических моделей,

возможность достижения натуральных показателей при неединственном их наборе (имея в виду ограниченность натуральных данных) и, следовательно, с различными количественными оценками устойчивости.

Указанные проблемы требуют дальнейшего изучения и разработки методик калибровки, согласующих результаты математического моделирования с натурными данными.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белостоцкий А.М. Численное моделирование комплексного напряженно-деформированного состояния конструкций и сооружений энергетических объектов. // Гидротехническое строительство. 8. 1999.
2. Белостоцкий А.М. Программный комплекс СТАДИО для линейных и нелинейных статических и динамических расчетов пространственных комбинированных систем. // Сб. научных трудов МГСУ и НИЦ СтаДиО «Численные и аналитические методы решения прикладных задач» М.: МГСУ, 1998.
3. Белый М.В., Белостоцкий А.М. Численное решение трехмерных задач об одностороннем контакте с трением для упругих систем. // Сб. научных трудов МГСУ и НИЦ СтаДиО «Численные и аналитические методы решения прикладных задач». 1998.
4. Белостоцкий А.М., Белый М.В., Рассказов Л.Н., Желанкин В.Г. Разработка калиброванных математических моделей напряженно-деформированного состояния гидротехнических сооружений (на примере склона Загорской ГАЭС). // Сб. «Безопасность энергетических сооружений». М.: ОАО «НИИЭС». Вып. 7. 2000.

### ОРГАНИЗАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАГОРСКОЙ ГАЭС

*Блинов И.Ф., инженер (ОАО «НИИЭС»), Магрук В.И., инженер,  
Черненко В.Н., кандидат техн. наук (Загорская ГАЭС)*

Загорская ГАЭС (ЗГАЭС) расположена в Московской области в долине р. Куньи. Эта станция используется в качестве основного быстровводимого резерва активной мощности в энергосистеме. Строительство ГАЭС началось в 1976 г. после утверждения технического проекта. Первый агрегат был введен в эксплуатацию в 1987 г. Установленная мощность ГАЭС – 1200 МВт. Количество обратимых агрегатов – 6 штук, расчетный напор – 100 м. В состав сооружений ЗГАЭС входят:

дамба верхнего бассейна из суглинков максимальной высотой до 35 м, длиной 9 км с заложением верхового откоса 1 : 3,25, низового 1 : 2,5 (дамба первой очереди) и верхового откоса 1 : 7, низового 1 : 3 (дамба второй очереди);

водоприемник реверсивного типа с верховыми левобережными и правобережными подпорными стенами 1-го и 2-го ярусов и низовыми подпорными стенами. Высота водоприемника 48 м, ширина по основанию вдоль потока 69,3 м, длина 103,7 м. Фундаментная плита водоприемника выполнена из железобетона без разрезки температурно-осадочными швами. Общий объем воды верхнего бассейна 30 млн. м<sup>3</sup>. Конструктивно водоприемник запроектирован неразрезным и, с целью снижения температурных напряжений, стены его с напорной стороны выше отметки машзала разрезаны вилочными швами;

шесть ниток напорных трубопроводов из 18 секций каждая, длиной 40 м, двух компенсаторных секций. Секция трубопроводов состоит из сборных сталежелезобетонных элементов диаметром 7,5 м, толщиной стен 0,4 м. Каждая секция опирается на 12 свай диаметром до 1,0 м и глубиной 16-20 м (8 свай) и 10 м (4 сваи). Секции трубопроводов отделены друг от друга гибкими компенсаторами. Компенсаторные секции (по две на каждый трубопровод) служат для перевода вертикальных перемещений в горизонтальные у здания водоприемника и здания станции;

здание ГАЭС высотой 50,0 м, шириной по основанию вдоль потока 72,6 м и длиной 145,6 м. Фундаментная плита выполнена из единого железобетонного блока без разрезки ее температурно-осадочными швами;

низовая плотина намывная, с донным водовыпуском, максимальной высотой 23,0 м, длиной по гребню 1 км с заложением верхового откоса 1 : 3,5 и 1 : 12 и низового 1 : 2,5 и 1 : 7;

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

Сооружения ГАЭС возведены в сложных геологических и топографических условиях. В основании ограждающего аккумулирующего бассейна дамбы залегают делювиальные покровные и моренные грунты. Окружающая верхний бассейн местность изрезана оврагами с оползневыми участками. В основании водоприемника и верхней части трубопроводов залегают сверху вниз моренные суглинки (мощность около 15 м) с включениями песчаных и гравийно-песчаных линз. Под ними залегают зеленоцветные породы с преобладанием зеленых глин (мощность 10-15 м). Ниже расположен десятиметровый слой средне- и мелкозернистых сеноманских песков, подстилаемых «парамоновскими» глинами мощностью около 30 м. Под «парамоновскими» глинами залегают нижнемеловые пески. В толщу меловых отложений врезана глубокая (до 100 м) погребенная

ложбина Пра-Куны. Водоносными горизонталями являются подморенный и парамоновский. Характерной особенностью геологического строения створа является широкое развитие оползней. В период строительства ЗГАЭС имели место четыре оползневых проявления, по два на каждом берегу долины, инициированных нарушениями проекта и правилами производства земляных работ. Три из них, два оползневых правобережных оползня и левобережный оползень «Северный», были ликвидированы путем разборки оползающих грунтов, уположения нависающих откосов с пригрузкой удерживающих участков склона и создания дренирующих и водоотводящих систем. Причинами активизации ранее стабилизированного древнего оползня «Южный» явились нарушения баланса грунтовых масс, подрезки нижней части склона и пригрузки его верхней части непроектными отвалами грунтов и плохая организация отвода поверхностных вод. Для предотвращения развития оползневых смещений и стабилизации склона были разработаны и осуществлены противооползневые мероприятия. Мероприятия включали:

изменение компоновки и конструкции правобережного примыкания дамбы верхнего бассейна к водоприемнику, позволившее сместить дамбу вверх по склону в зону с повышенными показателями прочности;

возведение в средней части склона упорной призмы с тремя линейными призмами-коллекторами;

отсыпку над упорной призмой вверх по склону контрбанкета высотой 10 м;

дренирование мореных суглинков с помощью 69 скважин вертикального дренажа, оборудованных эжекторными установками с фильтровой обсыпкой;

планировка склона, посев трав и устройство поверхностного водоотлива.

Класс сооружений (I – II), сложные гидрогеологические условия оснований сооружений ГАЭС и новизна проектных решений потребовали разработки программы наблюдений за их состоянием в период строительства и эксплуатации [1, 2]<sup>1</sup>. Натурные наблюдения на ЗГАЭС имеют некоторые особенности по сравнению с наблюдениями на ГЭС. В задачи наблюдений, кроме обеспечения безопасности гидросооружений, входит проверка эффективности принятых решений по новым вопросам проектирования и их возведения. Плотины и дамбы из грунтовых материалов находятся под действием часто и быстро меняющегося в значительных пределах напоре воды. Естественно крепления верховых откосов, противо-

фильтрационные и дренажные устройства работают в более тяжелых условиях, чем на плотинах ГАЭС. Кроме того, в основании сооружений ЗГАЭС залегают слабые грунты. Положение усугубляется большим (более 100 м) перепадом высот оснований сооружений. Для обеспечения безопасной эксплуатации сооружений ГАЭС по принципу мониторинга сооружения и их основания были оснащены дистанционной и геодезической контрольно-измерительной аппаратурой, а также аппаратурой для фильтрационных наблюдений [3]. Всего в сооружении установлено около 2100 единиц КИА. Программой было предусмотрено осуществление контроля за:

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

горизонтальными смещениями водоприемника, здания станции, склона напорных трубопроводов с помощью визирных марок, сдвигомеров (СГС);

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

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

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

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

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

Состав наблюдений на гидросооружениях ГАЭС представлен в табл. 1.

На ГАЭС была создана информационно-диагностическая система оперативного контроля за состоянием сооружений (1-ая очередь), предусматривающая проведение взаимосвязанных регулярных наблюдений, обработку и анализ полученных данных, оценку состояния сооружений, выдачу рекомендаций и принятие мер по обеспечению надежности сооружений<sup>2</sup>.

Сложные инженерно-геологические условия района ГАЭС, оползневые проявления на склонах в период строительства не могли не оказать влияния на состояние сооружений и их основания, на стабилизацию реакции сооружений на внешние воздействия.

Таблица 1

Состав наблюдений	Дамба верхнего бассейна	Водоприсосник с подпорными стенками	Трубопроводы	Здание ГАЭС	Низовая плотина	Верховая плотина
Осадки	+	+	+	+	+	+
Горизонтальные перемещения	-	+	+	+	-	-
Наклоны, изгибные перемещения	-	+	+	+	-	-
Давление грунтов обратных засыпок	-	+	-	-	-	-
Контактные напряжения под подошвой	-	+	-	+	-	-
Фильтрационный режим	+	+	+	+	+	+
Раскрытие швов	-	+	+	+	+	-
Напряженное состояние	-	+	+	+	-	-
Температурный режим	+	+	+	+	-	-
Фильтрационные расходы	+	+	-	+	+	+
Уровни В.Б. и Н.Б.	+	+	+	+	+	+

Первоначальная программа и проект размещения КИА в процессе строительства неоднократно корректировался из-за возникновения новых задач по контрольным наблюдениям за состоянием сооружений. Так, оползневые проявления на склоне «Южный» потребовали дополнительного оснащения контрольно-измерительной аппаратурой склона и примыкающих сооружений с целью получения данных об эффективности мероприятий, направленных на стабилизацию оползневых процессов (вертикальный дренаж, упорная призма на склоне, контрбанкет, планировка откоса и др.). В период возведения сооружений на строительстве была организована полевая группа НИСа «Гидропроекта» (в настоящее время — ОАО «НИИЭС»), под авторским надзором которой выпол-

нялась установка КИА в сооружения, проведение наблюдений, первичная обработка данных измерений, сбор исходных данных и первичная оценка состояния контролируемых сооружений<sup>3</sup>.

Опрос измерительных преобразователей (I-ая очередь), обработка данных измерений, сопоставление значений измеренных показателей с критериальными значениями выполняются с единого центрального пульта в автоматическом режиме с использованием многопроцессорного терминала и линий связи с преобразователями и центральным пультом. Анализ данных измерений и диагностика состояния гидросооружений выполняются с помощью компьютерной информационно-диагностической системы.

Ниже приводятся основные результаты мониторинга гидросооружений ЗГАЭС за восемнадцатилетний период эксплуатации. Анализ данных натуральных наблюдений на сооружениях ЗГАЭС позволил оценить их состояние и выявить отклонения в их работе от проектных предположений [4, 6, 7, 8].

#### *По дамбе верхнего бассейна*

В связи с разрывом во времени возведения дамбы верхнего бассейна I-ой и II-ой очередей величины измеренных осадок неравномерны по длине дамбы. Различные по величине и характеру изменения их во времени по длине дамбы свидетельствуют о неравномерном уплотнении дамбы и различии деформативных свойств грунтов основания. Максимальная величина осадки основания дамбы верхнего бассейна I-ой очереди в примыкании к водоприемнику с 1984 г. по 10.06.2005 г. составляет 284,4 мм, т.е. практически равна осадке водоприемника.

Фильтрационный режим в дамбе I-ой очереди верхнего бассейна в целом стабилизировался и в основном зависит от режима работы ГАЭС. Исключение составляет участок дамбы между ПК 77+00 + ПК 80+00, где отмечено намокание откоса. Для выявления причин намокания откоса дамбы в указанных границах на низовом откосе и гребне установлены дополнительные пьезометры, по которым проводятся учащенные наблюдения. При бурении скважин под пьезометры с отбором проб грунта установлено, что одной из причин намокания низового откоса является наличие на отм. 263,5 – 264,0 м прослойки грунта с повышенными коэффициентами фильтрации. Пьезометры, установленные в горизонтальном дренаже (ПК 1+00 + ПК 2+00), фиксируют напорный режим фильтрации в дренаже.

О реальном фильтрационном режиме в створах дамбы II-ой очереди информации недостаточно из-за небольшого периода наблюдений по установленным пьезометрам.

### ***По водоприемнику и подпорным стенам***

Повышенные (выше проектных) значения измеренных пьезометрических уровней при сработках верхнего бассейна не обеспечивают по данным расчетов устойчивость подпорных стен I-го яруса при аварийной сработке верхнего бассейна [9].

Высокие напряжения (выше нормативных) в продольной арматуре в последнем по потоку поперечном межблочном шве фундаментной плиты водоприемника свидетельствуют о раскрытии шва выше нормативных значений (рис. на цветной вкладке).

Наклонные трещины на напорной стене левобережного устоя водоприемника с раскрытием больше допустимой величины.

Незатухающие осадки левобережных подпорных стен II-го яруса. Интенсивность осадок стен ЛС достигает 14,4 мм/год (рис. 1).

### ***По трубопроводам и компенсаторным секциям***

Тенденция смыкания межсекционных швов трубопроводов со средней интенсивностью их закрытия 0,18 мм/год.

Значительно превышающие проектные значения (30 мм) осадки секции 5 – 6 трубопровода №1 (150 мм) (рис. 2). По рекомендации ОАО «НИИЭС», ОАО «Института Гидропроект» разработано и осуществлено на ЗГАЭС усиление основания путем устройства дополнительного свайного основания в зоне межсекционного шва 5 – 6.

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

Крепление склона под трубопроводами постоянно требует ремонта из-за недостаточно надежного отвода поверхностных вод и отсутствия дренажей.

Недопустимое (более 1 мм) раскрытие наклонных трещин, значение напряжений в крайних от торцов секции стержнях наклонной арматуры консолей компенсаторных секций КС-18 достигло предела текучести [5]. Необходимо усилить опорные консоли указанных компенсаторных секций путем, например, устройства дополнительных опор по низу компенсаторных секций.

Превышение критериальных значений отклонений от вертикали положения подвижных опор компенсаторных секций КС-03, КС-04. Необходимо восстановить их проектное положение, как это выполнено в секциях КС-01 и КС-02. [7]

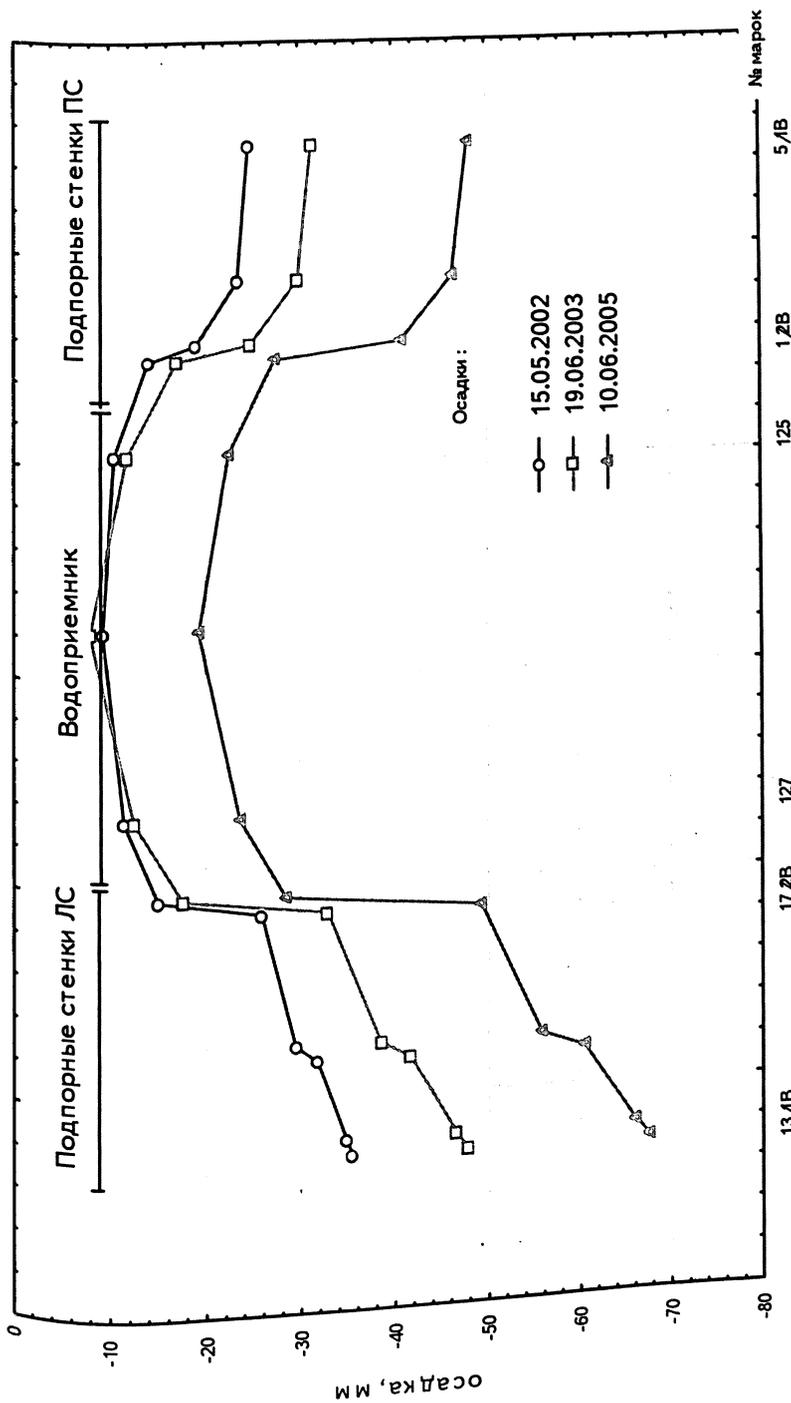
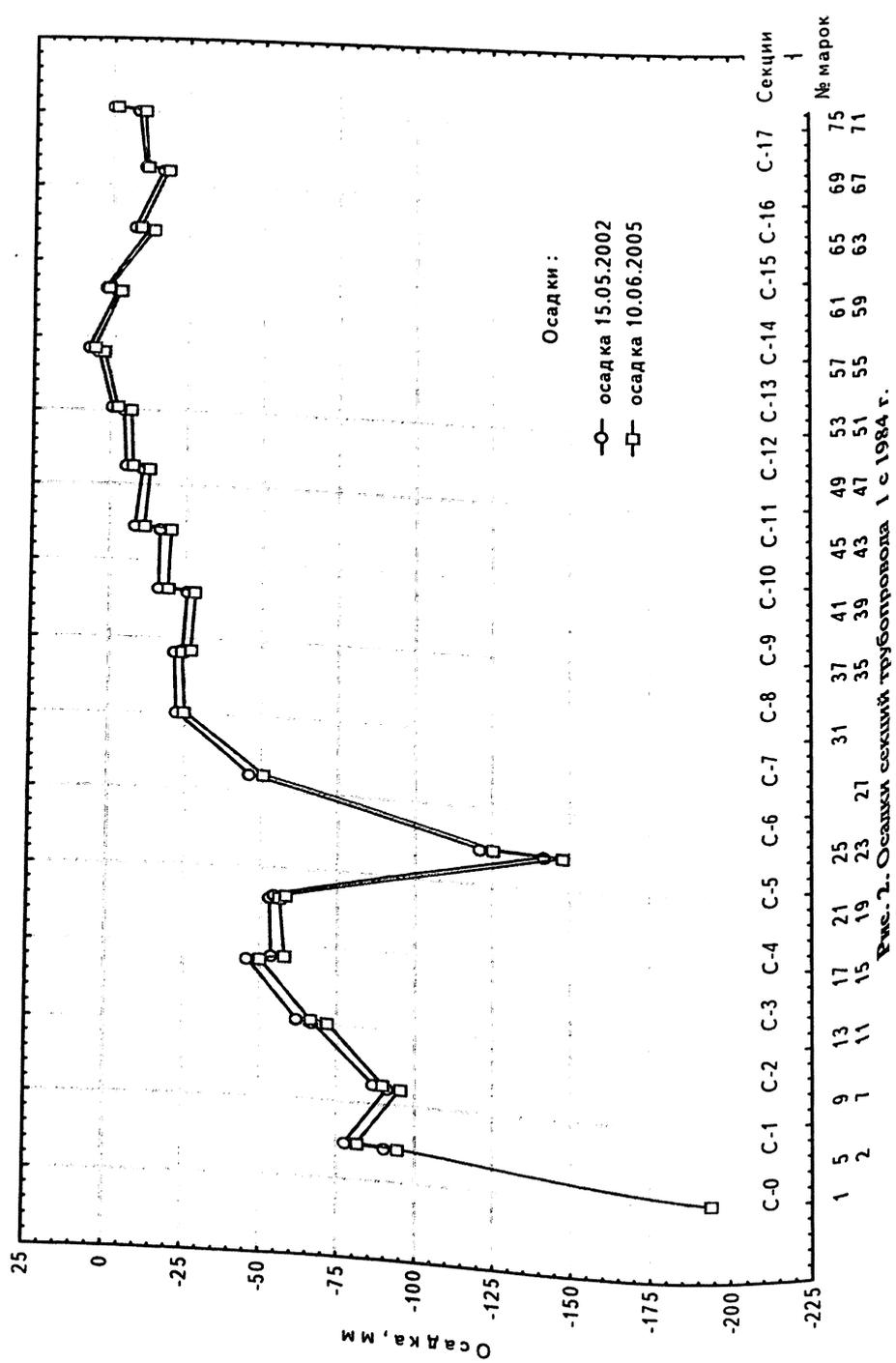


Рис. 1. Осадки водоприемника и подпорных стенок ВБ с 17.05.1999 г. (створ со стороны ВБ)



**По низовой плотине**

Из-за нарушений в технологии возведения низовой плотины с ядром положение депрессионной кривой в низовой призме плотины оказалось выше глубины промерзания, что не соответствовало проекту и требованиям СНиП. На отдельных участках низового откоса было отмечено выклинивание кривой депрессии на низовой откос. По предложению ОАО «НИИЭС» и ОАО «Института Гидропроект» было разработано решение и выполнено дренирование выходов воды с устройством обратных фильтров на низовом откосе плотины.

**По склону «Южный»**

Наблюдаются слабозатухающие горизонтальные смещения склона. За период эксплуатации максимальные значения горизонтальных смещений склона достигли 19,0 мм в районе трубопровода вдоль оси сооружения в направлении нижнего бьефа (рис. 3).

Изменение конструкции способа водоотбора из скважин вертикального дренажа (демонтаж эжекторной установки, осуществлявшей принудительную откачку воды из скважин вертикального дренажа, углубление скважин до сеноманского водоносного горизонта для самотечного слива воды из моренной толщи) значительно не повлияло на дренирование морены. По данным измерений фильтрационные расходы составляют для правой ветви завесы 0,05 – 0,06 л/с, левой ветви – 0,15 – 0,16 л/с.

**Выводы**

1. Особенности эксплуатации гидросооружений Загорской ГАЭС (сложные инженерно-геологические условия, меняющиеся в течение суток нагрузки, большие перепады высот в расположении сооружений, новизна конструктивных решений) определили схему размещения контрольно-измерительной аппаратуры с учетом этих особенностей.

2. Восемнадцатилетний опыт эксплуатации гидросооружений Загорской ГАЭС показал, что установленная по проекту контрольно-измерительная аппаратура позволяет осуществлять требуемый нормативными документами контроль за состоянием сооружений. Накопленный опыт выполнения мониторинга и использование новой контрольно-измерительной аппаратуры на сооружениях первой в Российской Федерации ГАЭС может быть использован при проектировании Загорской ГАЭС-II и других гидроаккумулирующих электростанций.

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

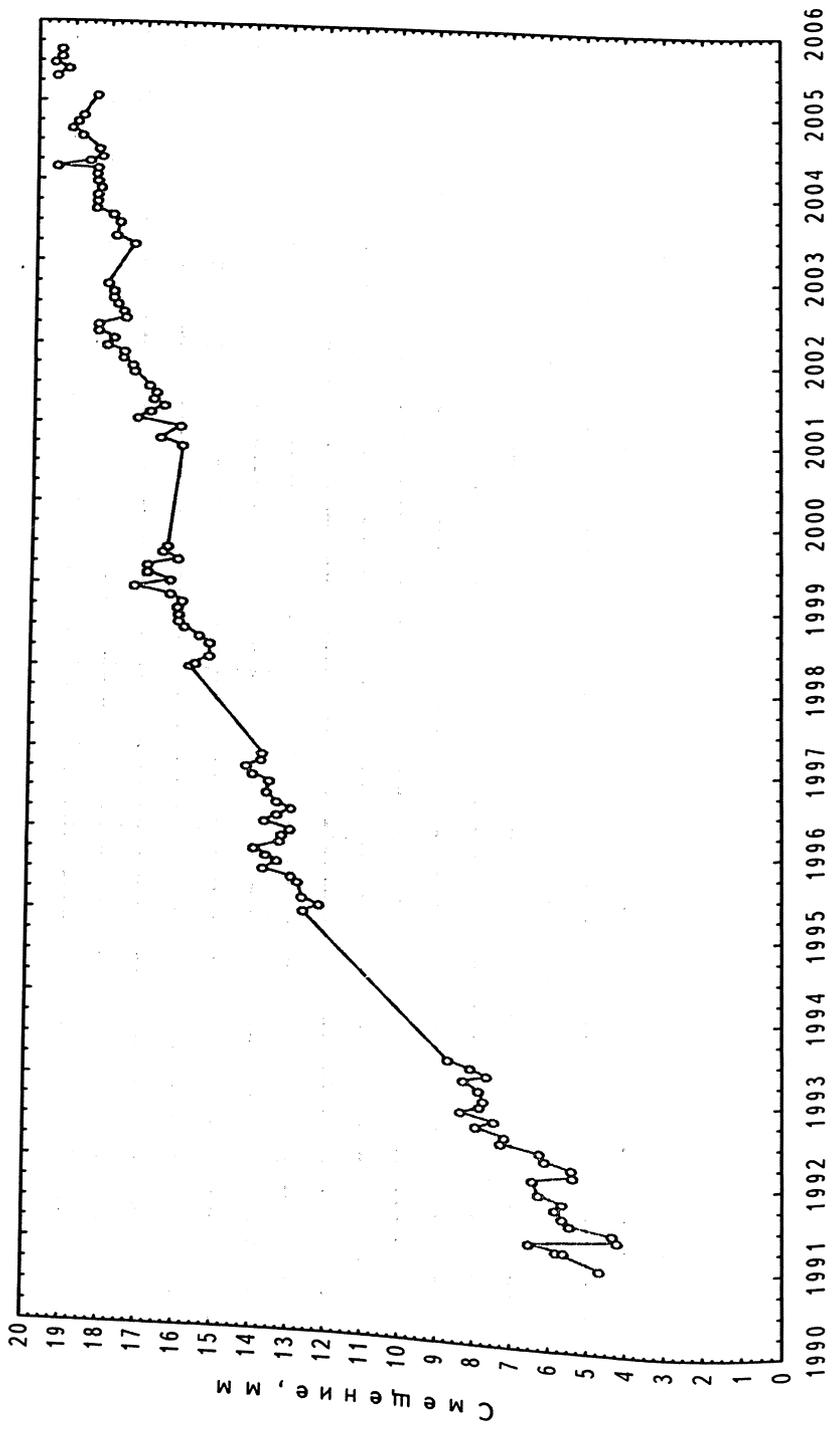


Рис. 3. Горизонтальные смещения склона «Южный» вдоль оси напорных трубопроводов по показаниям обратного отвеса 007А

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

<sup>1</sup> В разработке программ наблюдений и исследований кроме авторов принимали участие к.т.н. Царев А.И., к.т.н. Ронжин И.С., Каныгин Л.Е., Шехтер Е.М., Гальперина Л.П.

<sup>2</sup> В осуществлении мониторинга гидросооружений ГАЭС кроме авторов принимали участие от ОАО «НИИЭС» к.т.н. Ронжин И.С., к.т.н. Царев А.И., Каныгин Л.Е., д.т.н. Ивашенко И.Н., Гальперина Л.П., к.т.н. Лобач А.А., к.т.н. Дидович М.Я., Суриков Е.А., Мирзак Ю.Е., Мирзак Е.М., д.т.н. Белостоцкий А.М.

<sup>3</sup> В состав полевой группы входили инж. Галактионов В.Г., Черненко В.Н., Калагова Т.Е. и др.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Царев А.И., Шехтер Е.М. Натурные наблюдения на сооружениях ГАЭС. Сборник научных трудов Гидропроекта. Выпуск 109. 1986.
2. Ронжин И.С., Каныгин Л.Е., Черненко В.Н. Программа и состав натурных наблюдений за фильтрацией на Загорской ГАЭС. Сборник научных трудов Гидропроекта. Выпуск 135. 1990.
3. Ронжин И.С., Блинов И.Ф., Каныгин Л.Е. Оснащенность сооружений Загорской ГАЭС измерительной аппаратурой. //Гидротехническое строительство 8. 1992.
4. Блинов И.Ф., Гальперина Л.П. Напряженное состояние и деформации сооружений Загорской ГАЭС. //Гидротехническое строительство 8. 1992.
5. Блинов И.Ф. Результаты контрольных наблюдений за напряженно-деформированным состоянием компенсаторных секций трубопроводов Загорской ГАЭС. Сборник научных трудов Гидропроекта. Выпуск 152. 1993.
6. Блинов И.Ф., Гальперина Л.П. Исследование влияния сработки верхнего бассейна на напряженно-деформированное состояние сооружений ЗГАЭС. Безопасность энергетических сооружений. М.: ОАО «НИИЭС». Выпуск 6. 2000.
7. Блинов И.Ф., Черненко В.Н., Яновский А.П. Оценка состояния сталежелезобетонных трубопроводов Загорской ГАЭС по данным натурных наблюдений. Безопасность энергетических сооружений. М.: ОАО «НИИЭС». Выпуск 2-3. 1998.
8. S.O. Britvin, I.F. Blinov, I.N. Ivashenko, V.I. Magruk, V.N. Chernenko. Safety of the Zagorskaya PSP. Structures on soft foundation in Moscow Region, Russia. Hydro 2001: Opportunities and changes. Riva del Garda, Italy. September 2001. Conference Proceedings.
9. Суриков Е.А., Блинов И.Ф., Быковский Д.В., Ивашенко И.Н. Обеспечение устойчивости подпорных стенок верхнего бассейна Загорской ГАЭС с использованием технологии горизонтального направленного бурения (статья в настоящем сборнике).

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДПОРНЫХ СТЕН  
ВЕРХНЕГО БАССЕЙНА ЗАГОРСКОЙ ГАЭС  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ  
ГОРИЗОНТАЛЬНОГО НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ**

*Суриков Е.А., инженер, Быковский Д.В. кандидат техн. наук,  
Иващенко И.Н., доктор техн. наук, Блинов И.Ф., инженер,  
(ОАО «НИИЭС»)*

В состав подпорных гидротехнических сооружений, образующих верхний бассейн Загорской ГАЭС, входят: грунтовая дамба, здание водоприемника и сопрягающие подпорные стены 1-го яруса (углового типа) и 2-го яруса (ячеистого и углового типа).

Верховые подпорные стены первого яруса (ЛВ 1 + 5 и ПВ 1 + 5) являются сооружениями II класса и представляют собой железобетонные подпорные стены углового типа. Обратная засыпка стен и дамба верхнего бассейна выполнены из уплотненного суглинистого грунта. В обратной засыпке стен имеются два яруса застенных дренажей. Первый ярус представляет собой ленточный дренаж, отсыпанный из ПГС на отм. 236,00 + 233,00 м, шириной 30 м, мощностью от 0,5 до 1,0 м с уклоном в сторону водоприемника. Второй ярус выполнен отсыпкой из ПГС на отм. 240,50 м, переходящий в горизонтальный дренаж дамбы, с уклоном в сторону низового откоса, мощностью до 1,0 м. В районе обратной засыпки правых подпорных стен (ПВ-1, ПВ-2) для отвода воды из застенного дренажа второго яруса выполнены вертикальные скважины с шагом 6,0 м и диаметром 0,6 м с отводом в дренаж первого яруса.

Дренаж основания подпорных стен (ЛВ-1 + 3 и ПВ-1 + 3) выполнен из пористого бетона с отводом фильтрационных вод в мокрую потерну здания водоприемника.

Конструкция подпорной стены ЛВ-1 и дамбы на ПК – 88 + 50 представлена на рис. 1.

Физико-механические характеристики грунтов основания и обратной засыпки подпорных стен 1-го яруса представлены в табл. 1.

Важным фактором, влияющим на устойчивость подпорных стенок 1-го яруса против сдвига, является функционирование дренажных систем в основании и обратной засыпке. По данным наблюдений за фильтрационным режимом подпорных стенок отмечается превышение пьезометрических уровней в основании и обратной засыпке подпорных стен над проектными значения-

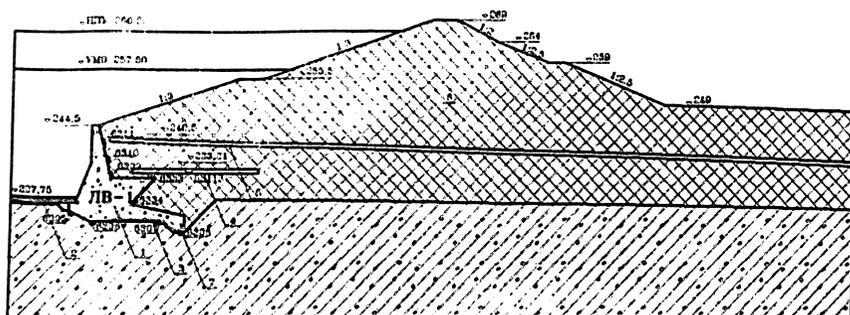


Рис. 1. Конструкция подпорной стенки ЛВ-1 и дамбы на ПК – 88+50 (вид с нижнего бьефа): 1 — подпорная стенка ЛВ-1; 2 — пунур; 3 — дренаж фундаментной плиты; 4 — застенный дренаж 1-го яруса; 5 — застенный дренаж 2-го яруса; 6 — тело дамбы; 7 — преобразователь давления струнный.

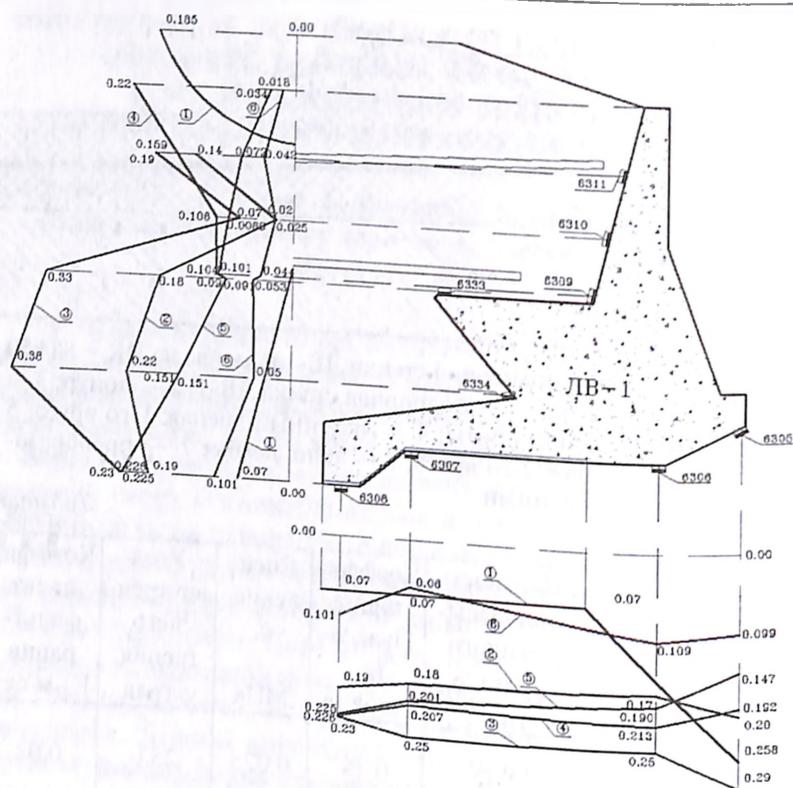
Таблица 1

Наименование грунта	Плотность грунта, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность водонасыщенного грунта, $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	Коэффициент Пуассона, $\nu$	Сцепление, с, МПа	Угол внутреннего трения, $\phi$ град.	Коэффициент фильтрации $K_f$ м/сут
Суглинки основания	2,18	2,22	0,35	0,025	25,0	0,02
Суглинки обратной засыпки	2,22	2,23	0,35	0,015	23,0	0,00216/ 0,00864*
ПГС	1,8	2,0	0,30	-	40,0	1-10

\* числитель — коэффициент фильтрации в вертикальном направлении, знаменатель — коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении;

ми. Фактические и проектные эпюры фильтрационного давления на фундаментную плиту и тыльную грань подпорной стены ЛВ-1 представлены на рис. 2. Показания пьезометров свидетельствуют о низкой транспортирующей способности застенных дренажей и о том, что дренаж в основании стен не функционирует, вследствие чего они не выполняют полностью свою задачу по отводу фильтрационной воды. Фактические значения коэффициента фильтрации дренажей обратной засыпки в зонах максимальных градиентов составляют 1 м/сут и меньше [9].

По данным визуальных наблюдений за состоянием отводящих трубок дренажа основания подпорных стен первого яруса,

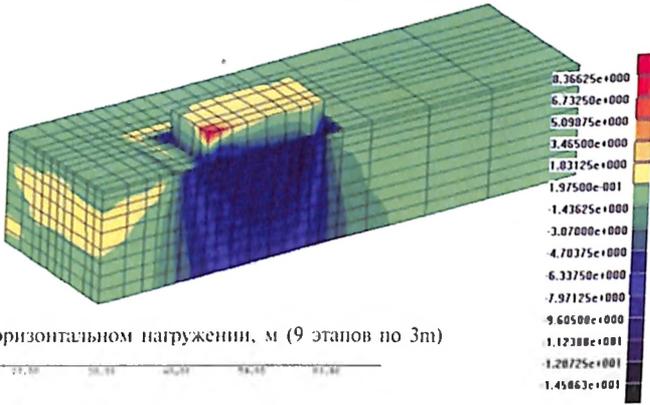


**Рис.2.** Эпюры фильтрационного давления (МПа): 1 — проектная эпюра фильтрационного давления [3]; 2 — эпюра по данным наблюдений (минимальная); 3 — эпюра по данным наблюдений (максимальная); 4 — расчетная эпюра (схема 1а); 5 — расчетная эпюра (схема 1б); 6 — расчетная эпюра (схема 4б).

выведенных в мокрую потерну водоприемника, с начала эксплуатации наблюдалось постепенное засорение этих трубок продуктами выщелачивания пористого бетона. По состоянию на октябрь 2005 г. все трубки полностью забиты, что исключает разгрузку из дренажа оснований подпорных стен.

По данным поверочных расчетов [1], в результате неэффективной разгрузки фильтрационного потока в основании фундаментных плит и в обратной засыпке верхних подпорных стен 1-го яруса при необходимости сработки верхнего бассейна ниже отметки УМО (отм. 257,5 м) в ремонтном и аварийно-ремонтном случае, при наблюдаемых пьезометрических уровнях, статическая устойчивость верхних стен 1-го яруса не обеспечена (табл. 2).

Деформированное состояние, распределение вертикальных напряжений (т/м<sup>2</sup>)



Смещение штампа при горизонтальном нагружении, м (9 этапов по 3л)

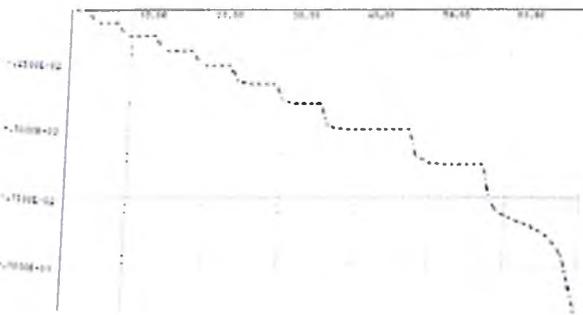


Рис. 1. Трехмерная система «штамп-основание». Расчетные перемещения, м

Без искажений



Масштаб 4:1 по вертикальной оси

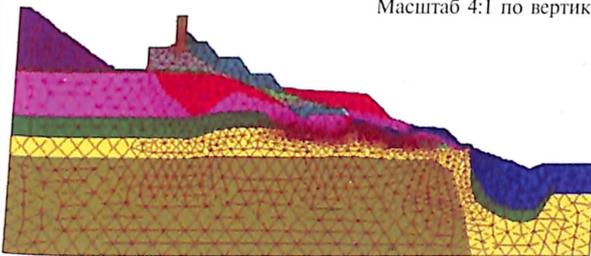
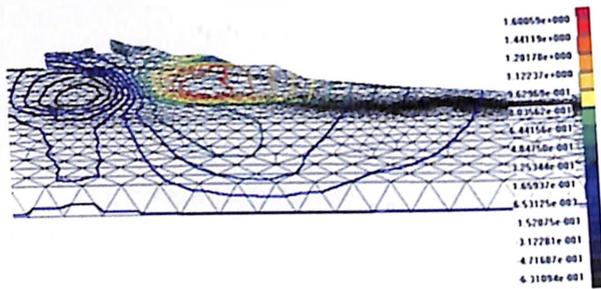
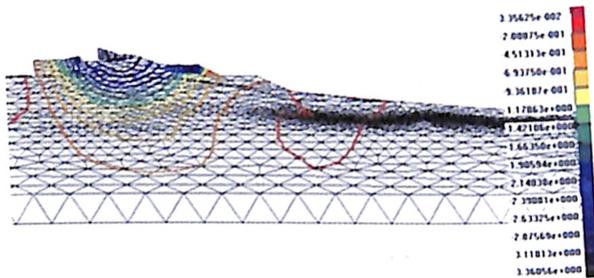


Рис. 2. Параметризованная конечноэлементная модель поперечника IX склона Загорской ГАЭС (к статье Белостоцкого А.М., Рассказова Л.Н.)

а) смещения  $u$ , м



б) осадки  $v$ , м



в) коэффициент  $1/K_3$ ,  $K_3^{\min} = 1.26$

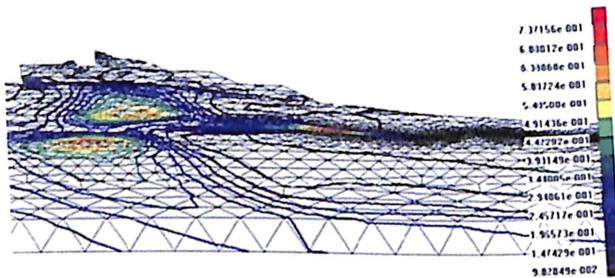
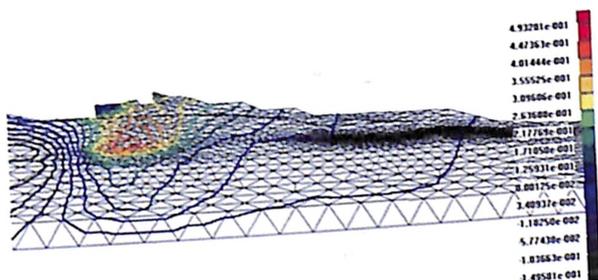


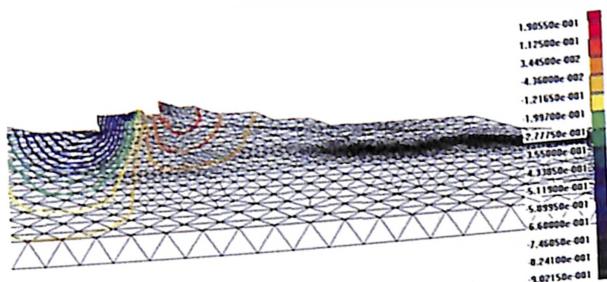
Рис. 3. Этап 3 — возведение дамбы ВВ и подпорной стенки №1 (2 года).  
Распределение расчетных перемещений ( $u$ ,  $v$ ) и коэффициента запаса  $K_3$

(к статье Белостоцкого А.М., Рассказова Л.Н.)

а) смещения  $u$ , м



б) осадки  $v$ , м



в) коэффициент  $1/K_3$ ,  $K_3^{\min}=0,89$

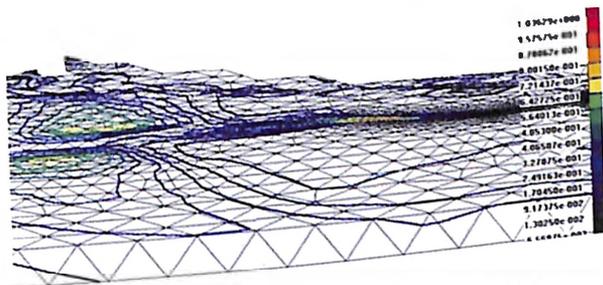
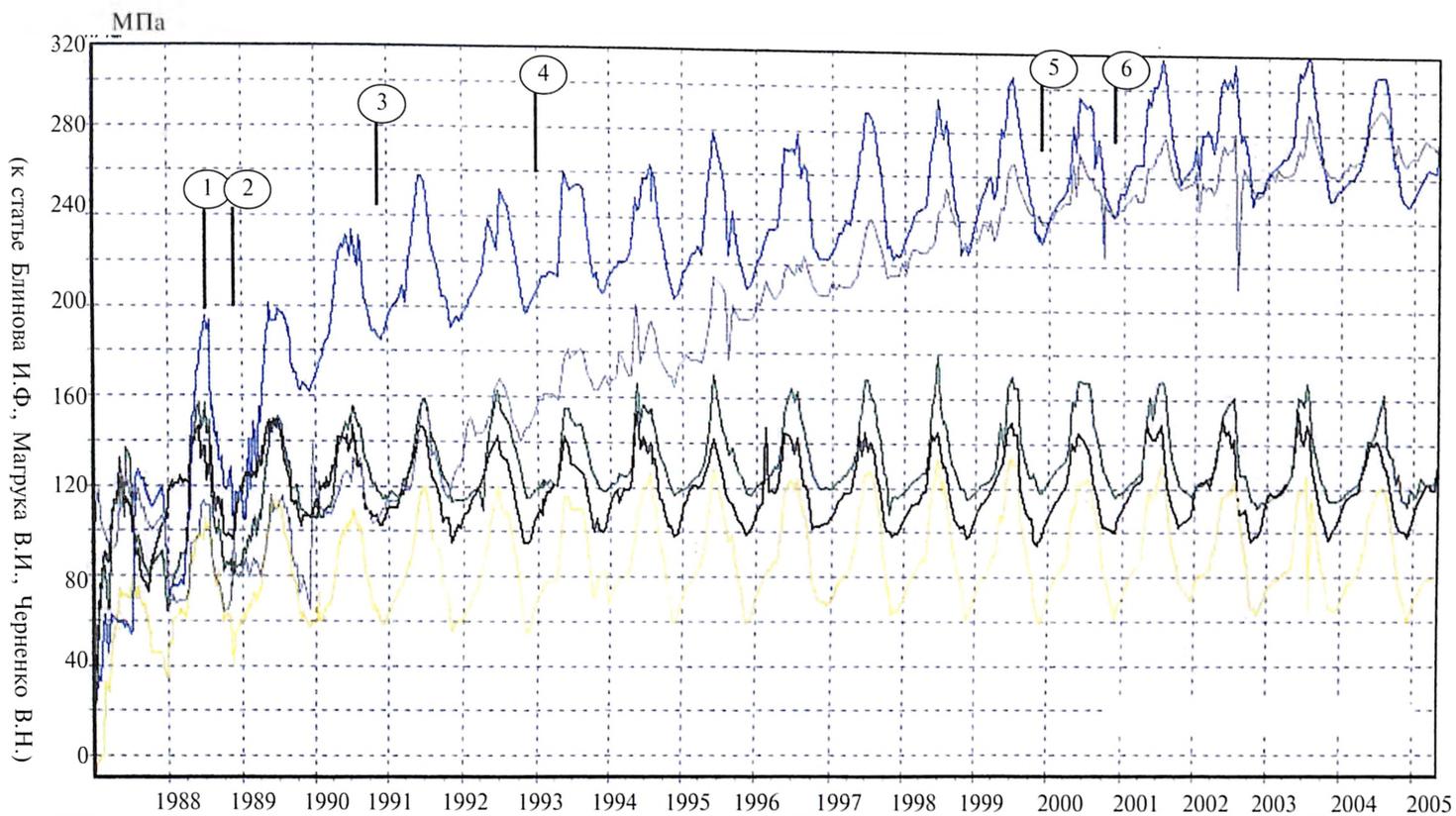


Рис. 4. Этап 8 — подъем уровня ВБ до отм. 257,0 м (6 лет).  
Распределение расчетных перемещений ( $u$ ,  $v$ ) и коэффициента запаса  $K_3$

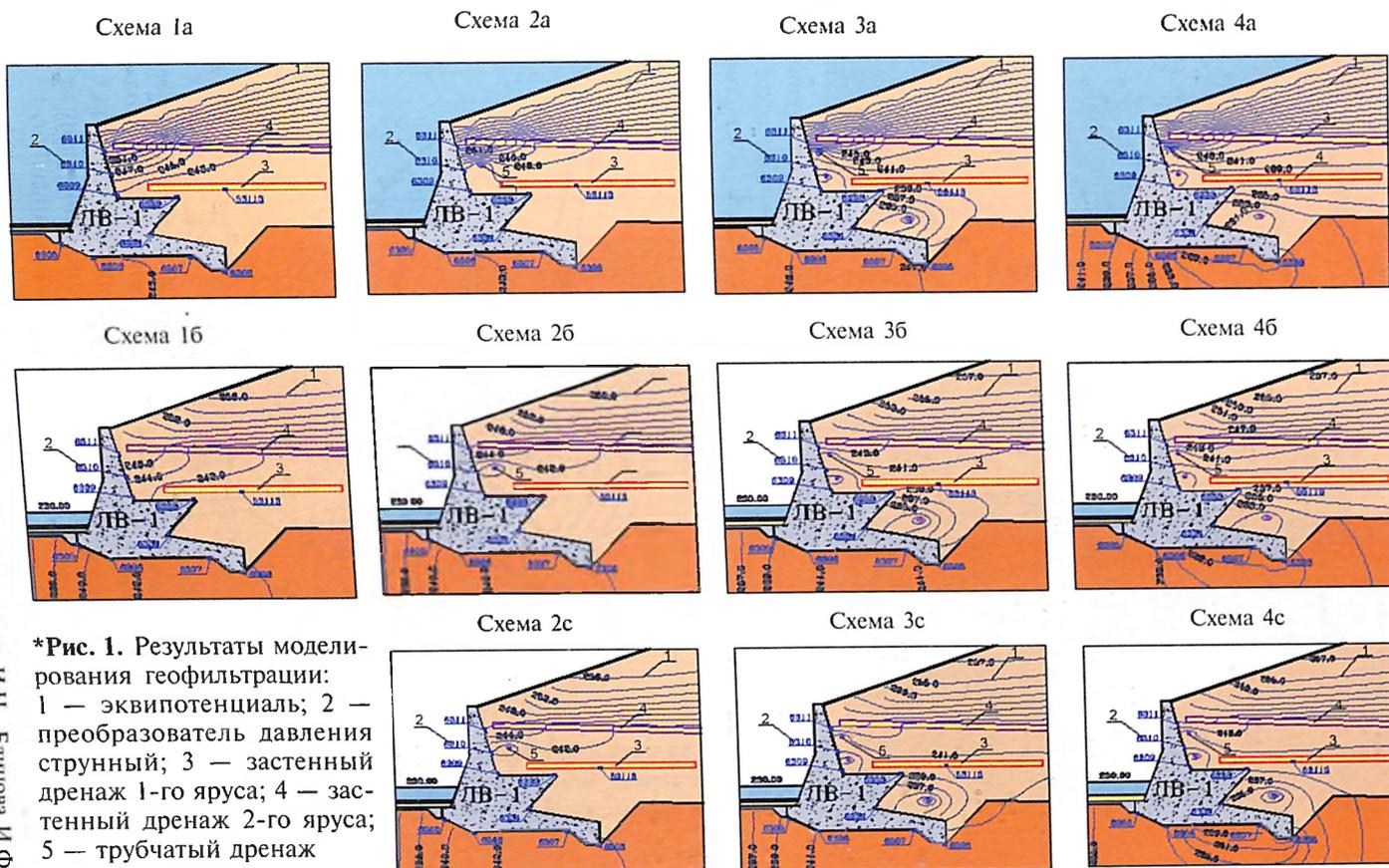
(к статье Белостоцкого А.М., Рассказова Л.Н.)



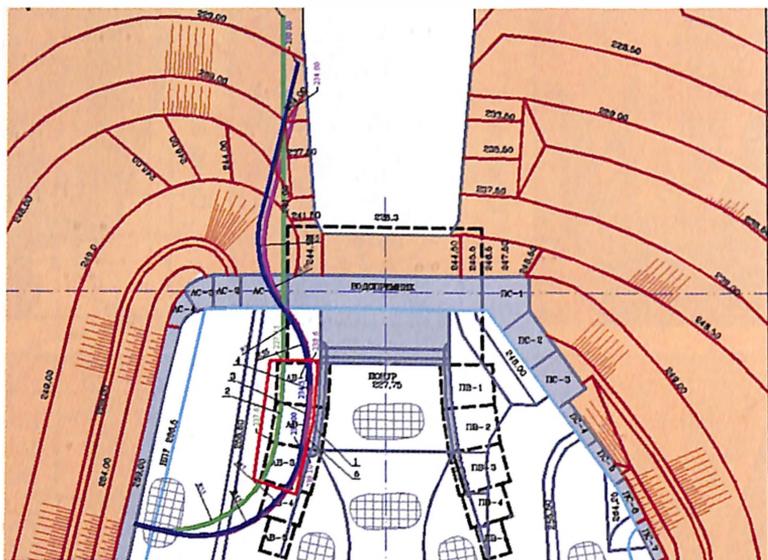
(к статье Бглинова И.Ф., Магжука В.И., Черненко В.Н.)

Напряжение в арматуре вдоль потока нижнего пояса фундаментной плиты водоприемника. Секция 2Т. УВБ: 1 — отм. 257,0 м; 2 — отм. 261,5 м; 3 — отм. 263,4 м; 4 — отм. 266,5 м; 5 — отм. 255,0 м; 6 — отм. 266,5 м. Условные обозначения ПСАС: — 1113 — 1117 со стороны ВБ; — 1121 по оси водоприемника; — 1138 — 1153 со стороны НБ

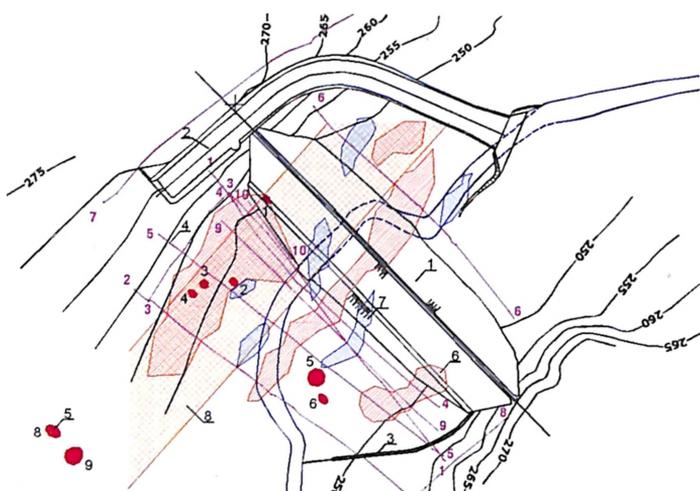
\* (к статье Сурникова Е.А., Быковского Д.В., Ивашенко И.Н., Бглинова И.Ф.)



\*Рис. 1. Результаты моделирования геофильтрации: 1 — эквипотенциаль; 2 — преобразователь давления струнный; 3 — застенный дренаж 1-го яруса; 4 — застенный дренаж 2-го яруса; 5 — трубчатый дренаж

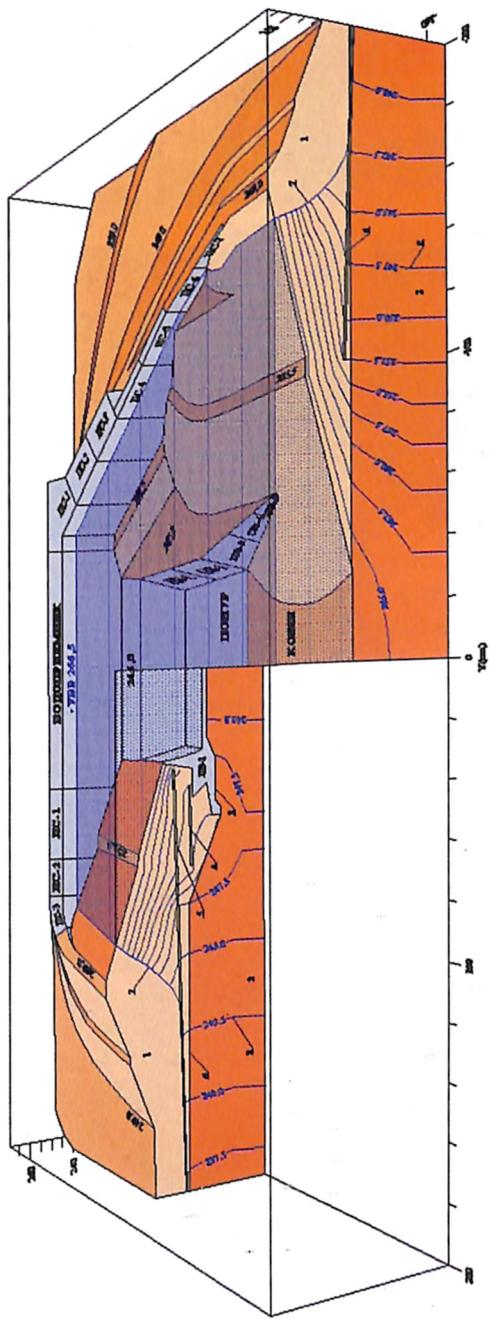


\*Рис. 2. Схема расположения трасс дренажей: 1 — напорная грань подпорных стен; 2 — трасса дренажа 1-го яруса; 3 — трасса дренажа 2-го яруса; 4 — трасса дренажа 3-го яруса; 5 — участок устройства дренажной трубы



План расположения основных сооружений гидроузла и фактического материала геофизических исследований: 1 — плотина; 2 — паводковый водосброс; 3 — донный водовыпуск; 4 — линии геофизических створов; 5 — эрозионно-карстовые воронки; 6 — аномалии пониженного сопротивления; 7 — аномалии повышенного сопротивления; 8 — полуса распространения основной массы воронок.

(к статье Зайцева Н.Н., Сурикова Е.А.)



(к статье Дидовича М.Я., Сурикова Е.А.)

Объемная визуализация геофильтрационной модели комплекса сооружений водохранилища: 1 — тело дамбы; 2 — основание; 3 — дренаж фундаментной плиты подпорных стен; 4 — застенный дренаж 1-го яруса; 5 — застенный дренаж 2-го яруса; 6 — горизонтальный дренаж; 7 — поверхность депрессии; 8 — эквипотенциаль

Президиум



Работа секций



Рабочие моменты



Таблица 2

	Коэффициент устойчивости на сдвиг*	Проектный коэффициент устойчивости	Нормативный коэффициент устойчивости
УВБ = 257,5 м (УМО)	1,95/1,423	3,36	1,2
УВБ = 244,5 м (ремонтный случай)	0,81/0,639	-	1,14
УВБ = 227,55 м (аварийно-ремонтный случай)	0,546/0,40	1,13	1,08

\* в числителе — коэффициент устойчивости при эпюре фильтрационного давления, рекомендованной НИС Гидропроекта [2], в знаменателе — коэффициент устойчивости при эпюре фильтрационного давления, взятой по данным натурных наблюдений [1].

При таких условиях опорожнение бассейна можно производить только постепенно по специальной программе, предусматривающей зависимость снижения уровня воды в бассейне от пьезометрических уровней в обратной засыпке подпорных стен или с применением дополнительных технических мероприятий по снижению фильтрационного давления.

Необходимое время (режим) сработки уровня воды в бассейне, при котором будет происходить снижение пьезометрических уровней до безопасного уровня (проектного), при фактических характеристиках грунтов и неэффективной работе дренажей может доходить до нескольких месяцев. Столь долгий срок сработки подразумевает недопустимо длительную остановку работы станции. В случае аварийного сброса минимальное время сработки верхнего бассейна до отм. 230,0 м составляет 6 — 7 часов. При фактических физико-механических характеристиках грунта обратной засыпки подпорных стен ( $K_{\phi} = 0,008/0,002$  м/сут.) снижения депрессионной поверхности за столь малый промежуток времени не будет.

Для эффективного снижения фильтрационного давления на тыльную грань подпорных стен необходимо устройство дополнительных дренажных систем. Предлагаемые варианты необходимых мероприятий должны быть направлены не на понижение депрессионной поверхности, а на снижение фильтрационного давления на тыловые грани подпорных стен.

В настоящее время существуют и практикуются различные технологии устройства дренажей в построенных сооружениях, в

том числе без необходимости остановки работы станции, например: применение игло-фильтровых установок, устройство лучевых дренажей, устройство трубчатых дренажей по технологии горизонтального направленного бурения.

Выполненный обзор и анализ технологии производства работ показывает, что перспективным является выполнение трубчатого дренажа по технологии горизонтального направленного бурения.

Технология выполнения дренажа методом горизонтального направленного бурения включает три этапа [8].

#### *Этап 1. Бурение пилотной скважины*

Бурение пилотной скважины осуществляется при помощи породоразрушающего инструмента — буровой головки со скосом в передней части и встроенным излучателем. Буровая головка соединена посредством полого корпуса с гибкой приводной штангой, что позволяет управлять процессом проходки пилотной скважины и обходить выявленные препятствия в любом направлении в пределах естественного изгиба протягиваемой рабочей штанги. Буровая головка имеет отверстия для подачи специального бурового раствора, который закачивается в скважину и образует суспензию с размельченной породой. Буровой раствор уменьшает трение на буровой головке и штанге, предохраняет скважину от обвалов, охлаждает породоразрушающий инструмент, разрушает породу и очищает скважину от ее обломков, вынося их на поверхность. Контроль за местоположением буровой головки осуществляется с помощью приемного устройства-локатора, который принимает и обрабатывает сигналы встроенного в корпус буровой головки передатчика. На мониторе локатора отображается визуальная информация о местоположении, уклоне, азимуте буровой головки. Также эта информация отображается на дисплее оператора буровой установки. Эти данные являются определяющими для контроля соответствия траектории трубчатого дренажа проектной и минимизируют риск излома рабочей штанги. При отклонении буровой головки от проектной траектории оператор останавливает вращение буровых штанг и устанавливает скос буровой головки в нужном положении. Затем осуществляется задавливание буровых штанг и устанавливается скос буровой головки в нужном положении с целью коррекции траектории бурения. Проходка пилотной скважины завершается выходом буровой головки в заданной проектом точке.

#### *Этап 2. Расширение скважины*

Расширение скважины осуществляется после завершения пилотного бурения. При этом буровая головка отсоединяется от

буровых штанг и вместо нее присоединяется риммер - расширитель обратного действия. Приложением тягового усилия с одновременным вращением риммер протягивается через створ скважины в направлении буровой установки, расширяя пилотную скважину до необходимого для протаскивания дренажной трубы диаметра. Для обеспечения беспрепятственного протягивания дренажной трубы через расширенную скважину ее диаметр должен на 25 – 30% превышать диаметр трубы дренажа.

### *Этап 3. Протягивание дренажной трубы*

На противоположной от буровой установки стороне скважины располагается готовая плеть трубчатого дренажа. К переднему концу плети крепится оголовок с воспринимающим тяговое усилие вертлюгом и риммером. Вертлюг вращается с буровой штангой и риммером, и в тоже время не передает вращательное движение на дренажную трубу. Таким образом, буровая установка затягивает в скважину плеть протягиваемого трубчатого дренажа по проектной траектории.

Для проверки эффективности предложенного мероприятия (устройство трубчатого дренажа) проведены расчетные исследования фильтрационного режима в обратной засыпке подпорной стены. Программа исследований включала построение геофильтрационной модели системы «подпорная стена – обратная засыпка – основание» и выполнение систематических расчетов фильтрационного режима вариантов технического решения с последующим расчетом устойчивости стены.

В задачи исследований входило выбор наиболее оптимального варианта решения, при котором будет достигнуто минимальное фильтрационное давление на подошву и тыльную грань подпорных стен при быстрой (6 – 7 часов) сработке уровня верхнего бассейна.

Для проведения фильтрационных расчетов использован программный комплекс Visual Modflow pro., v.4.0 [4]. По результатам выполненных расчетов оценивается устойчивость подпорной стены ЛВ-1. В основу расчета положена методика, описанная в [5]. Разработка геофильтрационной модели заключается в схематизации реальных геологических и гидрогеологических условий, а также параметров (характеристик) влияния или взаимодействия различных сооружений объекта моделирования и действующих нагрузок. В качестве типового створа для создания плоской геофильтрационной модели был выбран створ на ПК-88+50 (разрез по подпорной стенке ЛВ-1. Рис.1). В состав геофильтрационной модели входят подпорная стена 1-го яруса (ЛВ-1), уча-

сток дамбы верхнего бассейна первой очереди, система дренажей. В зависимости от расчетной схемы в модель включены предлагаемые трубчатые дренажи. Граничные условия модели задавались, исходя из данных натуральных наблюдений за уровнем бьефа, пьезометрическими уровнями, а также данных визуальных наблюдений и конструктивных особенностей сооружений [6, 7].

Физико-механические характеристики зон модели, составляющих область фильтрации, приняты в соответствии с табл. 1. Подпорные стены и понур водоприемника принимались абсолютно непроницаемыми. Влияние железобетонного крепления верхового откоса дамбы как противофильтрационного элемента на фильтрационный режим не учитывалось.

При выборе конкретных расчетных схем фильтрации (табл. 3) руководствовались данными проектных и исследовательских материалов, данными натуральных наблюдений, условиями работы сооружений и дренажных систем, результатами расчетов по предыдущим схемам [6, 7]. Расчеты выполнялись для стационарных задач (индекс «а» в названии схемы) и нестационарных (индекс «b» и «с» в названии схемы). В расчетных схемах нестационарной фильтрации время сработки верхнего бассейна принималось равным 6 часам (сработка бассейна с отм. 266,5 м до отм. 257,5 м за 4 часа и с отм. 257,5 м до отм. 230,0 м за 2 часа).

Основные положения принятых расчетных схем представлены в табл. 3.

Таблица 3.

	Фактическое состояние	+ 1 нитка дренажа	+ 3 нитки дренажа	+ 3 нитки дренажа + дренаж основания
Стационарная фильтрация	Схема 1а	Схема 2а	Схема 3а	Схема 4а
Нестационарная фильтрация*	Схема 1б	Схема 2б	Схема 3б	Схема 4б
Нестационарная фильтрация**	-	Схема 2с	Схема 3с	Схема 4с

\* за начальные условия принимаем результаты расчетов по схемам с индексом «а» (т.е. сработка бассейна начинается при уже постоянно работающем варианте решения); \*\* за начальные условия принимаем результаты расчетов по «Схеме 1а» (т.е. принятые решения начинают работать только на период быстрой сработки).

Схема 1а максимально приближена к фактическим данным натуральных наблюдений (рис. 2). Выполнена калибровка модели путем подбора значений коэффициентов фильтрации дренажей и обрат-

ной засыпки подпорных стен. Результаты моделирования геофильтрации представлены в таблицах 4 – 6 и на рис. 1 на цветной вкладке.

Результаты расчетов по схеме 1b показывает снижение фильтрационного давления только в верхней части стены в районе горизонтального дренажа. На остальной части стены снижение незначительно. Общее снижение нагрузки при сработке бассейна без каких-либо мероприятий составляет 14%.

Результаты расчета по схеме 1b берутся за основу для сравнения и оценки эффективности предложенных вариантов.

Расчеты по второй схеме показывают снижение фильтрационного давления в районе расположения скважины (верхняя часть стены до усиления с тыльной стороны) до 55,23% в районе ПДСП6310. На остальной части стены снижение незначительно. Разница между схемами 2b и 2c небольшая. Общее снижение фильтрационной нагрузки на стенку составляет 3,84%.

Расчеты по третьей схеме показывают значительное (около 50%) снижение фильтрационного давления по всей тыльной грани стены. Снижение фильтрационного давления на основании стены незначительно. Как и во второй схеме, значительной разницы в схемах 3b и 3c нет. Общее снижение фильтрационной нагрузки на стенку составляет 15,90%.

Расчеты по четвертой схеме показывают значительное снижение фильтрационного давления по всей тыльной грани стены и ее основания. В отличие от предыдущих схем разница результатов по схемам 4b и 4c значительна и составляет около 10%. Общее снижение фильтрационной нагрузки на стенку в схеме 4b составляет 55,98% и в схеме 4c — 45,54%.

Проведенные расчеты на этом этапе являются предварительными и выполнены с целью определения эффективности предложенного решения, количества трасс дренажей и их местоположения.

Расчет устойчивости подпорной стены выполнялся для расчетных схем с индексом «b» и «с». Результаты расчетов приведены в табл. 7. Полученный коэффициент запаса по схеме 1b равен 0,56, что несколько превышает коэффициент запаса, рассчитанный в [1] и равный 0,4. Данное различие объясняется способом задания исходных данных в расчете. В [1] при расчете устойчивости стены фильтрационные нагрузки брались по данным наблюдений с условием, что за короткое время сработки фильтрационные нагрузки не изменились. В нашем случае мы смоделировали сработку уровня воды в бассейне, которая показала снижение нагрузки на 14%.

Таблица 4

## Расчетные значения пьезометрических уровней и фильтрационного давления в местах установки ПДСП

Расчетная схема	Верх стенки	ПДС 6311	ПДС 6310	ПДС 6309	ПДС 6333	ПДС 6334	ПДС 6308	ПДС 6307	ПДС 6306	ПДСП 6305	
Пьезометрические уровни	Схема 1а	266.500	255.920	246.644	242.721	241.057	241.352	242.332	242.932	243.531	243.909
	Схема 1б	247.881	247.202	244.862	242.401	241.053	241.352	242.206	242.331	241.221	239.402
	Схема 2а	266.500	254.354	240.804	240.876	241.029	241.337	242.311	242.917	243.521	243.903
	Схема 2б	247.084	245.628	239.967	240.739	241.027	241.337	242.165	242.316	241.212	239.397
	Схема 2с	247.127	245.670	239.997	240.772	241.029	241.351	242.186	242.336	241.221	239.404
	Схема 3а	266.500	252.409	239.666	237.917	239.260	233.132	240.868	241.915	242.911	243.532
	Схема 3б	246.500	244.365	238.922	237.778	239.083	233.126	240.723	241.340	240.606	239.036
	Схема 3с	246.627	244.532	239.235	238.389	240.209	235.298	241.981	242.279	241.207	239.398
	Схема 4а	266.500	252.223	239.201	236.932	237.446	231.188	229.820	228.220	235.262	239.064
	Схема 4б	246.317	244.177	238.463	236.795	237.274	231.183	229.794	228.211	233.098	234.605
Схема 4с	246.640	244.539	239.230	238.354	240.097	235.022	232.284	228.447	235.161	236.528	
Фильтрационное давление, т/м <sup>2</sup>	Схема 1а	22.000	15.920	10.644	10.371	9.057	15.142	22.632	20.732	21.331	19.209
	Схема 1б	3.381	7.202	8.862	10.051	9.053	15.142	22.506	20.131	19.021	14.702
	Схема 2а	22.000	14.354	4.804	8.526	9.029	15.127	22.611	20.717	21.321	19.203
	Схема 2б	2.584	5.628	3.967	8.389	9.027	15.127	22.465	20.116	19.012	14.697
	Схема 2с	2.627	5.670	3.997	8.422	9.029	15.141	22.486	20.136	19.021	14.704
	Схема 3а	22.000	12.409	3.666	5.567	7.260	6.922	21.168	19.715	20.711	18.832
	Схема 3б	2.000	4.365	2.922	5.428	7.083	6.916	21.023	19.140	18.406	14.336
	Схема 3с	2.127	4.532	3.235	6.039	8.209	9.088	22.281	20.079	19.007	14.698
	Схема 4а	22.000	12.223	3.201	4.582	5.446	4.978	10.120	6.020	13.062	14.364
	Схема 4б	1.817	4.177	2.463	4.445	5.274	4.973	10.094	6.011	10.898	9.905
Схема 4с	2.140	4.539	3.230	6.004	8.097	8.812	12.584	6.247	12.961	11.828	

Примечание: Для схем с индексом «б» и «с» результаты приведены на 6 часов с начала сработки (отм. 230,0 м.)

Научно-технический и производственный сборник

Таблица 5

## Снижение фильтрационного давления в местах установки ПДСП

	Верх стенки	ПДС 6311	ПДС 6310	ПДС 6309	ПДС 6333	ПДС 6334	ПДС 6308	ПДС 6307	ПДС 6306	ПДС 6305
Схема 1а	22.00/ 100	15.92/ 100	10.64/ 100	10.37/1 00	9.06/ 100	15.14/ 100	22.63/ 100	20.73/ 100	21.33/ 100	19.21/ 100
Схема 2а	0.00/ 0	-1.57/ 9.84	-5.84/ 54.85	-1.84/ 17.78	-0.03/ 0.34	-0.01/ 0.09	-0.02/ 0.08	-0.01/ 0.06	-0.01/ 0.04	-0.01/ 0.04
Схема 3а	0.00/ 0	-3.51/ 22.05	-6.97/ 65.55	-4.80/ 46.32	-1.80/ 19.87	-8.22/ 54.28	-1.46/ 6.46	-1.02/ 4.90	-0.62/ 2.90	-0.38/ 1.97
Схема 4а	0.00/ 0	-3.70/ 23.22	-7.44/ 69.92	-5.79/ 55.81	-3.61/ 39.89	-10.16/ 67.12	-12.51/ 55.28	-14.71/ 70.96	-8.27/ 38.76	-4.85/ 5.23
Схема 1б	3.38/ 100	7.20/ 100	8.86/ 100	10.05/ 100	9.05/ 100	15.14/ 100	22.51/ 100	20.13/ 100	19.02/ 100	14.70/ 00
Схема 2б	-0.80/ 23.55	-1.57/ 21.83	-4.89/ 55.23	-1.66/ 16.53	-0.02/ 0.25	-0.01/ 0.09	-0.05/ 0.20	-0.01/ 0.07	-0.01/ 0.04	0.00/ 0.02
Схема 2с	-0.75/ 22.28	-1.53/ 21.25	-4.86/ 54.89	-1.63/ 16.20	-0.02/ 0.23	0.00/ 0	-0.02/ 0.11	-0.01/ 0.03	0.00/ 0.01	0.00/ 0.03
Схема 3б	-1.38/ 40.83	-2.83/ 39.37	-5.94/ 67.02	-4.62/ 45.99	-1.97/ 21.73	-8.22/ 54.32	-1.49/ 6.61	-0.99/ 4.92	-0.61/ 3.23	-0.36/ 2.48
Схема 3с	-1.25/ 37.07	-2.67/ 37.06	-5.62/ 63.49	-4.01/ 39.91	-0.84/ 9.29	-6.05/ 39.97	-0.23/ 1.02	-0.05/ 0.25	-0.01/ 0.07	0.00/ 0.01
Схема 4б	-1.56/ 46.24	-3.02/ 41.99	-6.40/ 72.20	-5.61/ 55.77	-3.78/ 41.72	-10.17/ 67.15	-12.42/ 55.16	-14.12/ 70.14	-8.12/ 42.70	-4.80/ 32.62
Схема 4с	-1.24/ 36.69	-2.66/ 36.96	-5.63/ 63.54	-4.05/ 40.26	-0.95/ 10.53	-6.33/ 41.80	-9.93/ 44.10	-13.88/ 68.97	-6.06/ 31.86	-2.87/ 19.54

Примечание: в числители давление в т/м<sup>2</sup>, в знаменателе в % от схемы 1

Безопасность энергетических сооружений

Таблица 6

Снижение общей нагрузки от фильтрационного давления, действующей на стену

	Действующие нагрузки			Снижение нагрузки	
	Thw	W	Общее	т/м <sup>2</sup>	%
Схема 1а	355.939	578.088	934.03		
Схема 2а	323.42	577.736	901.16	32.87	3.52
Схема 3а	247.702	554.814	802.52	131.51	14.08
Схема 4а	195.829	276.319	472.15	461.88	49.45
Схема 1б	269.992	533.93	803.92		
Схема 2б	239.551	533.532	773.08	30.84	3.84
Схема 2с	240.146	533.931	774.08	29.84	3.71
Схема 3б	165.167	510.97	676.14	127.78	15.90
Схема 3с	186.284	532.526	718.81	85.11	10.59
Схема 4б	113.212	240.693	353.90	450.02	55.98
Схема 4с	159.667	278.155	437.82	366.10	45.54

Таблица 7

	Кз	%*
Схема 1б	0.56404	
Схема 2б	0.59383	5.28117
Схема 2с	0.59293	5.12256
Схема 3б	0.6995	24.0152
Схема 3с	0.65444	16.0275
Схема 4б	1.02832	82.3132
Схема 4с	0.90186	59.8938

\* повышение коэффициента устойчивости от схемы 1б.

Расчеты по схеме 1б еще раз подтверждают, что стены в случае аварийной сработки верхнего бассейна неустойчивы и для обеспечения устойчивости необходимы дополнительные мероприятия.

Расчеты показывают, что коэффициент запаса больше 1 только по схеме 4б. Эти результаты показывают, что устойчивость стены обеспечивается только в случае комплексного подхода, включающего устройство дополнительных дренажей в обратной засыпке и восстановление работоспособности дренажа основания подпорных стен.

Схема трасс предлагаемого дополнительного трубчатого дренажа представлена на рис. 2 на цветной вкладке. Проходка скважин начинается с гребня дамбы. На участке обратной засыпки ЛВ-1 ÷ 3 используется дренажная труба. На остальных участках используется глухая труба. Отвод профильтрованной воды осуществляется самотеком на низовой откос дамбы в водоотводящую канаву.

Для восстановления работоспособности дренажа основания подпорных стен необходимо пробурить новые скважины (взамен существующих) из мокрой потерны в дренаж основания подпорных стенок, обеспечив его разгрузку согласно проекту.

#### **Выводы**

1. Результаты расчетов с учетом фактического наблюдаемого фильтрационного давления показывают, что в случае аварийной сработки верхнего бассейна стены 1-го яруса не устойчивы.

2. Для обеспечения устойчивости подпорных стенок (ЛВ-1 и ЛВ-2) при аварийной сработке верхнего бассейна ЗГАЭС в качестве эффективного мероприятия возможно устройство засыпного трубчатого дренажа и восстановление работоспособности дренажа под фундаментными плитами подпорных стенок.

3. Устройство трубчатых дренажей возможно выполнить с использованием технологии горизонтального направленного бурения.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. **Результаты** статических расчетов устойчивости на плоский сдвиг и прочности подпорных стенок водоприемника (секции ЛВ-1, 2) Загорской ГАЭС. Письмо 1-844 от 26.12.94. Московский областной проектно-изыскательский институт «Гидропроект».
2. **Приложение** к письму ГИП Загорской ГАЭС 2-14-25-121 от 2.12.94 г.
3. **Технический отчет** «О проектировании, строительстве и первом периоде эксплуатации». Том 1 «Основные сооружения и постоянный поселок, проектирование». Москва. РАО «ЕЭС России». Проектно-изыскательское и научно-производственное акционерное общество «Институт гидропроект». 1999.
4. **Visual MODFLOW v.4.0. User's Manual. For Professional Applications in Three-Dimensional Groundwater Flow and Contaminant Transport Modeling.** 2004, Waterloo Hydrogeologic Inc.
5. **СНиП 2.02.02-85** «Основания гидротехнических сооружений» Госстрой СССР. Москва, 1988.
6. **Разработка** предложений по безопасной эксплуатации комплекса сооружений водоприемника ГАЭС по результатам расчетов НДС, прочности и устойчивости и результатам натурных наблюдений с учетом пластических деформаций основания и имеющихся повреждений конструкций, а также влияния нестационарной фильтрации в основании и береговых примыканиях. Заключительный отчет. ОАО «НИИЭС», М. 2004.
7. **Отчет.** «Разработка рекомендаций по обеспечению устойчивости подпорных стенок 1-го яруса в верхнем бьефе комплекса сооружений водоприемника ЗГАЭС при аварийной сработке верхнего бассейна». Этап 1. Ассоциация «Гидропроект». ЗАО «ГИДЭП» М. 2005 г.
8. **<http://www.gnbrt.ru/work.htm>.** «Производство работ. Бестраншейное строительство».

9. Технический отчет «О проектировании, строительстве и первом периоде эксплуатации». Том 2 «Организация и производство строительно-монтажных работ. Опыт первых лет эксплуатации. Научно-исследовательские работы». Москва. РАО «ЕЭС России». Проектно-исследовательское и научно-производственное акционерное общество «Институт Гидропроект». 1999 г.

## ГЕОФИЛЬТРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСА СООРУЖЕНИЙ ВОДОПРИЕМНИКА ВЕРХНЕГО БАССЕЙНА ЗАГОРСКОЙ ГАЭС

*Дидович М.Я., кандидат техн. наук, Суриков Е.А., инженер  
(ОАО «НИИЭС»)*

В состав комплекса сооружений водоприемника верхнего бассейна Загорской ГАЭС (рис. 1) входят [1, 2]:

здание водоприемника реверсивного типа высотой 41,8 м на неразрезной фундаментной плите, длиной поперек потока 102,7 м; шириной по потоку 70,2 м;

сопрягающие верховые подпорные стены (1-го яруса уголкового типа и 2-го яруса ячеистого и уголкового типа) и низовые подпорные стенки (уголкового типа);

железобетонный понур, отделенный температурно-осадочными швами от фундаментных плит здания водоприемника и подпорных стен 1-го яруса;

насыпная дамба из уплотненного моренного суглинистого грунта высотой до 35 м.

В обратной засыпке подпорных стен 1-го яруса (ЛВ-1, ЛВ-2, ПВ-1, ПВ-2), выполненной из уплотненного суглинистого грунта, расположены 2 яруса плоского горизонтального дренажа, выполненные из песчано-гравийной смеси. Под фундаментными плитами подпорных стен и здания водоприемника также устроены плоские горизонтальные дренажи.

Участок комплекса сооружений водоприемника характеризуется как сложным рельефом, так и сложными инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями. Геологическое строение участка (рис. 2) составляют, сверху вниз, моренные грунты естественного сложения, представленные суглинками различной степени плотности и влажности, в подошве которых местами залегают прослои внутриморенных гравийно-галечниковых отложений и зеленоцветные малопроницаемые глины перемен-

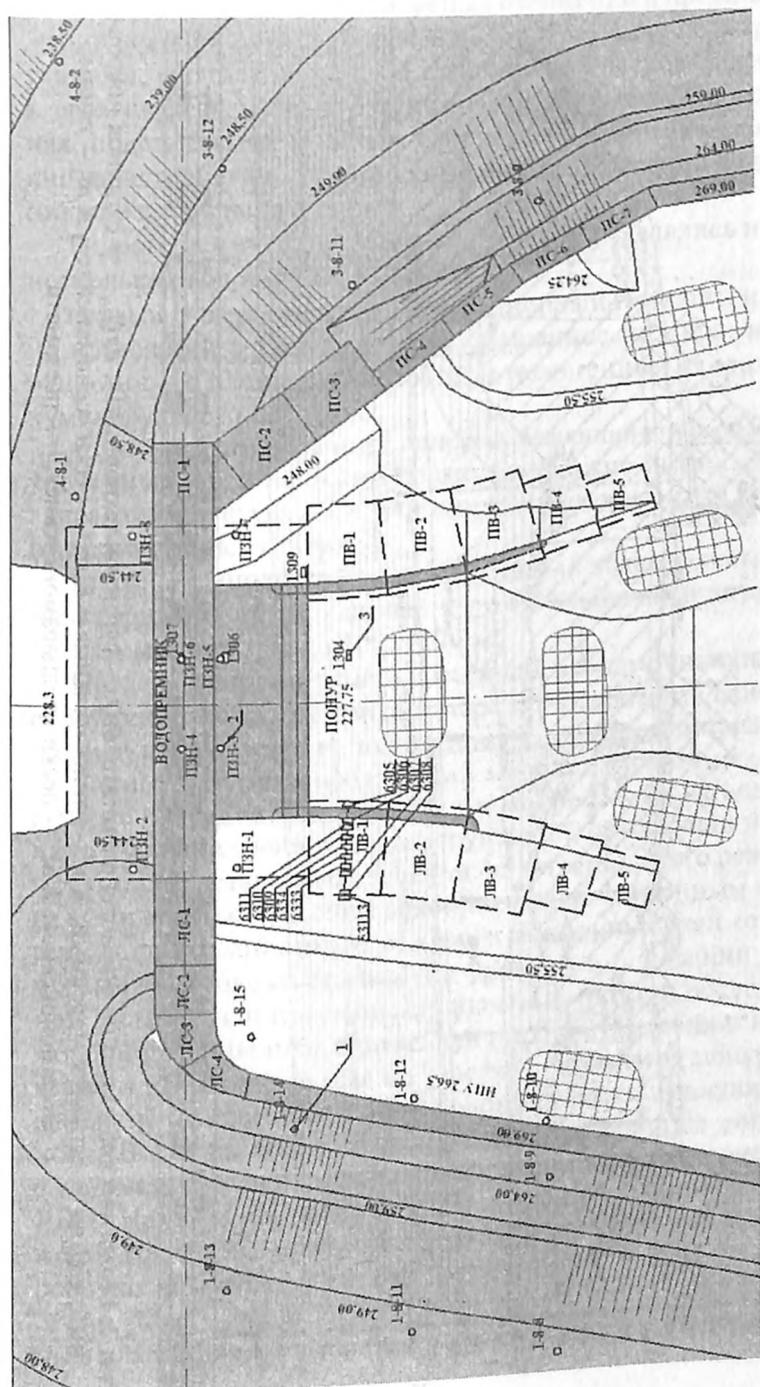


Рис. 1. Основные сооружения области моделирования и схема размещения КИА: 1 — пьезометр опускной; 2 — пьезометр закладной; 3 — преобразователь давления струнный

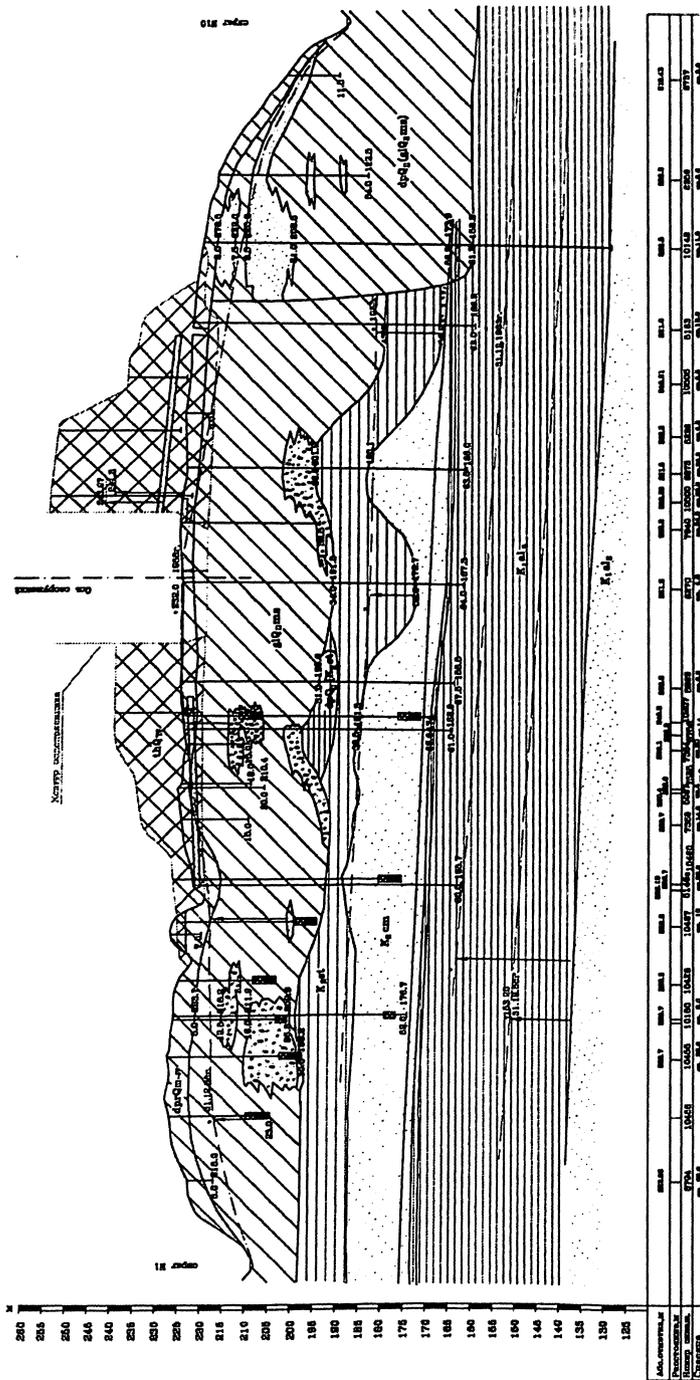


Рис. 2. Геологический разрез по оси водоприемника: \$H\_{Q\_{IV}}\$ - суглинок техногенный; \$dp\_{Q\_{III-IV}}\$ - суглинок покровный; \$gl\_{Q\_{I,ms}}\$ - суглинок моренный; \$K\_{st}\$ - глины «зеленые»; \$K\_{st}\$ - пески «сеноманские»; \$K\_{al}\$ - глины «парамоновские»; \$K\_{al\_1}\$ - пески «подпарамоновские»; | - пьезометр

ной мощности. Мощность мореных отложений в пределах сооружений водоприемника составляет 23 – 27 м. Ниже по разрезу, под глинами, располагается слой сеноманских песков, залегающих, в свою очередь, на практически водоупорных парамоновских глинах, подстилаемых мощным слоем песков. Физико-механические характеристики грунтов комплекса сооружений водоприемника представлены в табл. 1.

Гидрогеологические условия участка определялись наличием нескольких водоносных горизонтов:

первый – внутриморенный безнапорный горизонт, имеющий на настоящий момент времени смешанное питание: инфильтрационное, с площади водосбора, и техногенное, из верхнего аккумулялирующего бассейна;

второй – подморенный напорно-безнапорный горизонт, приуроченный к сеноманским пескам, возможно имеющий слабую гидравлическую связь с внутриморенным горизонтом через окна в зеленоцветных глинах;

третий – «подпарамоновский» самый водообильный напорный горизонт, приуроченный к нижнеальбским и аптальбским пескам мощностью до 100 – 120 м.

После введения верхнего бассейна в эксплуатацию на участке сооружений водоприемника в моренном горизонте основания и в дамбе наблюдается напорно-безнапорный режим фильтрации.

Данные натурных наблюдений за фильтрационным режимом, а также ситуация, сложившаяся в мокрой потерне водоприемника (наличие трещин, вынос грунта) [3], обусловили необходимость более детального изучения фильтрационного режима всего комплекса сооружений водоприемника. По данным наблюдений за фильтрационным режимом подпорных стен отмечается превышение пьезометрических уровней в основании и обратной засыпке над проектными значениями. При обследовании мокрой потерны наблюдалась фильтрация из трещин напорной грани и потолочного шва на участке сопряжения понура с фундаментными плитами здания водоприемника и подпорной стеной ЛВ-1 и из вертикального шва в левом торце сопряжения фундаментных плит здания водоприемника с подпорной стеной ЛВ-1. На всем протяжении пола потерны фиксировались отложения грунта, вынесенного фильтрационным потоком. Ориентировочно объем вынесенного грунта за 1997 – 2002 гг. составлял около 20 м<sup>3</sup>. Состав вынесенного грунта по лабораторным данным классифицировался как мелкий и пылеватый песок.

Таблица 1

Наименование грунта	Плотность грунта, $\rho$ , т/см <sup>3</sup>	Плотность водонасыщен- ного грунта, $\rho_s$ , т/см <sup>3</sup>	Коэффициент Пуассона $\nu$	Сцепление, $c$ , МПа	$\gamma$ гол внутреннего трения, град. $\phi$	Коэффициент фильтрации $K_f$ м/сут	К-т упругой емкости грунта $\mu_{упр}$	К-т водоотдачи грунта $\mu_w$	Пористость $n_e$	Свободная пористость $n_0$
Суглинки основания	2,18	2,22	0,35	0,025	25,0	0,02	0,0007	0,05	0,36	0,05
Суглинки тела дамбы и обратных насыпок	2,22	2,23	0,35	0,015	23,0	0,00216/ 0,00864*	0,0007	0,05	0,36	0,05
Грунт дренажей (ПГС)	1,8	2,0	0,30	0,00	40,0	1-10	-	0,117	0,3	0,117

\* числитель – коэффициент фильтрации в вертикальном направлении;  
знаменатель – коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении;

В задачи проводимых работ входило: разработка и калибровка геофильтрационной модели комплекса сооружений водоприемника; моделирование фильтрационного режима при различных режимах сработки верхнего бассейна, а также влияния нарушений дренажных и противофильтрационных устройств; выдача предложений по безопасной эксплуатации комплекса сооружений водоприемника.

### **Геофильтрационная модель комплекса сооружений водоприемника**

Геофильтрационная модель участка комплекса сооружений водоприемника ЗГАЭС реализована с использованием программного комплекса «Visual Modflow», разработанного Канадской фирмой Waterloo Hydrogeologic [4]. Этот комплекс позволяет моделировать трехмерный поток подземных вод в стационарной и в нестационарной постановке. Моделируются напорные и безнапорные фильтрационные потоки как в изотропных породах, так и в породах, обладающих широким диапазоном анизотропии. Программа позволяет задавать любые начальные и граничные условия на границах области фильтрации. Внутри области фильтрации можно размещать дренажные и нагнетательные скважины, любые дренажные и противофильтрационные устройства. В результате моделирования можно получать кривую свободной поверхности фильтрационного потока, гидроизогипсы в любом слое области фильтрации и эквипотенциали в любом вертикальном сечении модели. Кроме того, в модели реализуется функция подсчета расхода фильтрации как в целом через всю область, так и в любом гидрогеологическом слое или его участке и в дренажных устройствах.

Непосредственно границами изучаемого участка комплекса сооружений водоприемника ЗГАЭС условно приняты линии, параллельные оси водоприемника, и линии, параллельные оси сооружений. Западная граница модели отстоит от оси водоприемника на расстоянии 170 м вверх по течению (более 2-х напоров от начала понура), восточная — на 50 м вниз по течению (около 16 м от нижней грани фундаментной плиты здания водоприемника). С севера и юга границы участка отнесены на 200 м в каждую сторону от оси сооружений, т.е. ограничиваемся бермами дамбы на отметках 249 — 248 м. Общая площадь участка, принятого к моделированию пространственной фильтрации, составила 88000 м<sup>2</sup>. План рассматриваемого участка моделирования представлен на рис. 1.

При построении геофильтрационной модели вся область фильтрации разбивалась на ряд прямоугольных в плане ячеек со сторонами 100 x 100 см. Высота ячеек в каждом геологическом

слое зависела от его мощности и определялась необходимой точностью расчета. Всего разработанная геофильтрационная модель содержит 3168000 расчетных ячеек. Объемная визуализация геофильтрационной модели показана на рис. на цветной вкладке.

### **Калибровка модели**

Калибровка модели выполнялась для условий стационарной фильтрации. Граничные условия принимались для эксплуатационного случая, где уровень верхнего бассейна принимался равным НПУ верхнего бассейна ( $УВБ=266,5$  м) и средним значениям пьезометрических уровней на границе модели.

Калибровка модели осуществлялась путем приближения модельных результатов (пьезометрических уровней и фильтрационных расходов) к данным натурных наблюдений. Приближение модельных результатов выполнялось подбором параметров проницаемости грунтов, пропускной способности дренажей и граничных условий.

Для сопоставления использовались данные наблюдений за пьезометрическими уровнями:

- в основании здания водоприемника и понура;
- в основании подпорных стен 2-го яруса;
- в обратной засыпке, основании и застенных дренажах подпорных стен 1-го яруса;
- в горизонтальном дренаже дамбы.

Калибровка модели осуществлялась до максимально возможного приближения модельных значений параметров фильтрационного потока к среднестатистическим значениям, аналогичным данным натурных наблюдений для случая нормальной эксплуатации ЗГАЭС.

Достигнутые при моделировании значения (табл. 2) были, в основном, достаточно близки к натурным, но в то же время имелись и существенные отклонения (основание и обратная засыпка подпорных стен 1-го яруса). Такое положение обусловлено различными дефектами существующих конструкций (непроектный режим работы дренажей основания и обратной засыпки стен, фильтрация через трещины в мокрой потерне и т.д.)

### **Расчетные схемы**

Расчетные схемы составлены на основе проектных и исследовательских материалов с учетом условий работы сооружений в проектных режимах эксплуатации, а также с учетом различных нарушений в противофильтрационном контуре водоприемника и эффективности работы дренажных систем.

Разработка расчетных схем выполнялась применительно к двум направлениям исследований. Первое направление — анализ из-

менения фильтрационного режима комплекса сооружений водоприемника при сработке верхнего бассейна в соответствии с графиком [3] (схема 1). По этому графику предусматривается сработка бьефа от отм. 266,5 до отм. 256,0 м при работе агрегатов в энергетическом режиме (4–5 часов), от отм. 256,0 м до отм. 245,0 м со скоростью 1 м/сут., от отм. 245,0 до отм. 228,0 – 230,0 м со скоростью 5 м/сут. Второе направление – изучение влияния наличия возможных трещин в понуре или разрыва в шпонке между понуром и фундаментной плитой подпорной стены ЛВ-1 (схема 2) и фундаментной плитой водоприемника (схема 3).

Граничные условия задавались в соответствии с расчетными схемами, исходя из данных натуральных наблюдений за уровнем бьефа и пьезометрическим уровнем и данных визуальных наблюдений с учетом конструктивных особенностей сооружений водоприемника.

Для расчетных схем с нестационарной фильтрацией принималось, что процесс установления пьезометрических уровней в грунтах сооружений водоприемника в результате наполнения бассейна закончился, и нестационарность процесса фильтрации учитывается только для условий ремонтного и аварийно-ремонтного понижения бьефа.

За начальные условия принимали значения напоров из полученной откалиброванной геофильтрационной модели.

### **Результаты моделирования**

Откалиброванная по натурным данным геофильтрационная модель полностью отражает пространственный фильтрационный поток в области комплекса сооружений водоприемника. Фильтрационный режим в основании здания водоприемника близок натурным данным и не превышает проектные (табл. 2). Что касается фильтрационного режима непосредственно в области подпорных стен и тела дамбы, то здесь максимальное приближение модельных уровней к данным натуральных наблюдений было достигнуто посредством отключения дренажа основания подпорных стен и уменьшением проводимости застенных дренажей. В результате застенный дренаж 1-го яруса оказался занепорен на всем протяжении, а застенный дренаж 2-го яруса только на начальном отрезке, со стороны тыльной грани стен до оси дамбы, и далее в безнапорном режиме. Как следует из полученных данных, подпорные стенки 1-го яруса находятся в более жестких условиях, чем это предусматривалось проектом (табл. 2).

Результаты расчетов нестационарной фильтрации (схема 1) показали, что при сработке бьефа верхнего бассейна согласно гра-

	КИА	Отм. заложения (рабочей части)	Проектные данные [1]
Понур	ПДСП 1304	226.24	241.50
Основание водоприемника	ПДСП 1306	226.77	234.90
	ПДСП 1307	225.35	230.00
	1ПЗН-5	227.11	231.00
	1ПЗН-6	227.16	230.00
Основание подпорных стен (ЛВ-1)	ПДСП 6305	224.55	250.35
	ПДСП 6306	222.05	237.81
	ПДСП 1307	222.05	229.05
	ПДСП 1308	220.55	227.55
Обратная засыпка подпор- ных стен (ЛВ-1)	ПДСП 6334	225.90	229.46
	ПДСП 6333	232.00	232.52
	ПДСП 6309	232.22	232.62
	ПДСП 6310	236.00	сухо
	ПДСП 6311	240.00	сухо
Застенный дренаж подпор- ных стен (ЛВ-1) 1-го яруса	ПДСП 53113	233.00	233.10
Застенный дренаж подпор- ных стен (ЛВ-1) 2-го яруса	1-8-13	234.91-235.91	236.00
	1-8-14	235.7-237.7	238.00

\* для аварийного случая.

фику [3] снижение поверхности депрессии в области комплекса сооружений водоприемника не происходит. Изменения фильтрационного режима наблюдается на участках напорной фильтрации, в обратной засыпке подпорных стен 1-го яруса (табл. 2), а также на участке верхового откоса дамбы в пределах отметок 245,0 – 255,0 м и участке ложа водохранилища, на подходе к понуру.

Снижение пьезометрических уровней при напорной фильтрации в основании понура, водоприемника и подпорных стен 1-го яруса, соответственно, составляет 8 м (ПДСП1304), 1,15 м (ПДСП1307, 1ПЗН-1) и 8 м (ПДСП6305-6308). В обратной засыпке подпорных стен 1-го яруса изменение пьезометрических уровней уменьшается в зависимости от глубины и составляет 10 м (ПДСП6311) и 7 м (ПДСП6334). На участке верхового откоса дамбы разгрузка фильтрационного потока осуществляется как в горизонтальный дренаж, так и на откосе. Причем разгрузка на откосе происходит с

Таблица 2

Проектные данные* [1]	Натурные данные	Геофильтрационная модель	Схема 1	Схема 2	Схема 3
-	246.77	244.40	236.38	244.59	246.45
-	226.85	227.42	227.41	227.42	227.42
-	230.89	230.10	228.95	230.10	230.06
-	227.87	227.42	227.41	227.42	227.42
-	229.87	230.10	228.95	230.10	230.06
231.55	252.55	246.82	238.85	250.77	247.31
229.05	243.29	248.77	240.45	248.95	248.81
229.05	244.60	249.13	240.81	249.23	249.13
227.55	239.86	249.17	240.89	249.19	249.17
229.46	256.04	252.96	245.86	252.96	252.96
232.52	260.53	253.58	246.44	253.58	253.58
232.62	260.57	255.32	247.80	255.32	255.32
сухо	241.53	257.02	248.49	257.02	257.02
сухо	256.74	259.53	249.53	259.53	259.53
233.10	245.37	253.29	246.37	253.29	253.29
-	235.66	235.67	235.67	235.67	235.67
-	237.42	237.08	237.08	237.08	237.08

высокими значениями градиентов напора ( $I_m \geq 2$ ), превышающими допустимые значения. На участке ложа водохранилища на подходе к понуру фильтрационный поток также разделяется на два потока: один разгружается в верхний бьеф (в бассейн), а другой — в дренаж основания здания водоприемника.

Результаты моделирования (табл. 2), при наличии трещины или повреждения шпонки между понуром и фундаментной плитой стены ЛВ-1 на всем ее протяжении (схема 2), показывают повышение пьезометрических уровней (4 м, ПДСП6305) в основании подпорных стен ЛВ 1 + 3 и незначительное повышение в основании понура (0,2 м, ПДС1304). Влияние этого нарушения на режим фильтрации больше нигде не проявляется.

Наличие трещины у концевго зуба понура по всему фронту водоприемника (схема 3) незначительно влияет на режим фильтрации в рассматриваемой области (табл. 2). В основном до 2 м

(ПДС1304) выросли напоры под понуром и несколько повысились в основании подпорных стен (0,5 м, ПДСП6305). На остальных участках комплекса сооружений водоприемника изменения фильтрационного режима не проявляются.

#### **Выводы**

Создана геофильтрационная модель комплекса водоприемника, откалиброванная по данным натуральных наблюдений, которая отображает характеристики фильтрационного режима.

Данная модель позволяет оперативно выполнять моделирование фильтрационного режима в стационарной и нестационарной постановке при изменениях характеристик грунтов, возможных нарушениях противофильтрационных и дренажных устройств, влиянии различных инженерных мероприятий.

Все представленные результаты анализа фильтрационного режима при понижении бьефа в соответствии с рекомендациями [3] при ремонтном и аварийном случаях свидетельствуют о недостаточном снижении гидродинамических нагрузок на основание фундаментной плиты и тыльные грани подпорных стен (табл. 2).

Результаты расчетов, с учетом возможных нарушений шпонки между понуром и фундаментными плитами водоприемника и подпорных стен, показывают их малое влияние на фильтрационный режим в основании здания водоприемника и дамбы. В то же время указанные нарушения влияют на фильтрационный режим в основании подпорных стен, а следовательно, и на их устойчивость.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. **Технический** отчет «О проектировании, строительстве и первом периоде эксплуатации». Том 1 «Основные сооружения и постоянный поселок, проектирование». Москва. РАО «ЕЭС России». Проектно-изыскательское и научно-производственное акционерное общество «Институт Гидропроект». 1999 г.
2. **Технический** отчет «О проектировании, строительстве и первом периоде эксплуатации». Том 2 «Организация и производство строительно-монтажных работ. Опыт первых лет эксплуатации. Научно-исследовательские работы». Москва. РАО «ЕЭС России». Проектно-изыскательское и научно-производственное акционерное общество «Институт Гидропроект». 1999 г.
3. **Критерии** состояния южного оползневого склона на период начального наполнения верхнего бассейна. Письмо 54-25-65 от 03.02.88. Институт «Гидропроект» им. С. Я. Жука.
4. **Visual MODFLOW v.4.0. User's Manual. For Professional Applications in Three-Dimensional Groundwater Flow and Contaminant Transport Modeling.** 2004, Waterloo Hydrogeologic Inc.

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО РЕЖИМА НИЗОВОЙ ПЛОТИНЫ ЗАГОРСКОЙ ГАЭС

*Магрук В.И., инженер, Черненко В.Н., кандидат техн. наук  
(Загорская ГАЭС), Дидович М.Я., кандидат техн. наук, Суриков Е.А.,  
инженер, Быковский Д.В., кандидат техн. наук (ОАО «НИИЭС»)*

Низовая плотина (рис. 1) нижнего аккумулирующего бассейна Загорской ГАЭС (ЗГАЭС) высотой до 26 м выполнена намывом из песчано-гравелистых грунтов по двусторонней схеме. Общая протяженность плотины составляет 1000 м (ПК-5 и ПК-15). Между пикетами ПК-12 – ПК-13 расположен донный водосброс. Под гребнем и верховой упорной призмой выполнен понур из суглинистого грунта, уложенного насухо с уплотнением. Коэффициент фильтрации понура — 0,02 м/сутки, тела плотины 2,0 + 8,0 м/сутки. Плотина распластанного профиля, шириной по гребню 13,0 м, имеет по две бермы на верховом и низовом откосах. Заложение верхового откоса начиная от основания составляет 1 : 6; 1 : 12 и 1 : 3,5. Заложение низового откоса начиная от гребня находится в пределах от 1 : 3 до 1 : 7.

В основании плотины залегают аллювиальные отложения, представленные в нижней части мелко- и тонкозернистыми, а также пылеватыми песчаными и гравийно-песчаными грунтами, а в верхней части супесями и суглинками. Пески имеют коэффициент фильтрации до 4,0 м/сутки, гравийно-песчаные отложения — 25 м/сутки. Супеси и суглинки — 0,05 м/сутки.

Плотина имеет следующие дренажные устройства:

прерывистый дренаж из трубофильтров на верховом откосе в пределах отметок 153 – 160 м;

горизонтальный трубчатый дренаж низового откоса с отметкой заложения лотка трубофильтра 144,0 м;

вертикальный дренаж основания в виде ряда самоизливающихся скважин с шагом 6,0 м и глубиной 17 – 20 м.

В пределах участка водосброса начиная с ПК-11+50 и далее до ПК-15 какие-либо дренажные устройства отсутствуют.

Отвод дренажных вод из вертикального дренажа и атмосферных вод осуществляется в р. Кунья водоотводящей канавой.

Типовой поперечный профиль плотины представлен на рис. 2.

До июля 2000 г. низовая плотина эксплуатировалась при отметке воды в бассейне на 3,5 м ниже НПУ, а с июля по декабрь 2000 г. в условиях постепенного подъема уровня бьефа до проек-



тной отметке НПУ, равной 162,5 м. Начиная с декабря 2000 г. эксплуатация плотины осуществляется при проектной отметке НПУ и при суточном колебании уровня 9 м.

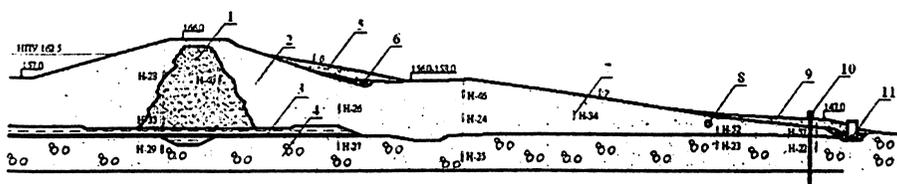


Рис. 2. Типовой профиль плотины. Створ 3 – 3

Условные обозначения: 1 — намытое ядро; 2 — тело намывной плотины; 3 — понур из суглинка; 4 — аллювиальные отложения; 5 — пригрузка из ПГС; 6 — комбинированный дренаж; 7 — пьезометр опускной; 8 — трубчатый дренаж; 9 — пригрузка из ПГС; 10 — вертикальный дренаж; 11 — смотровой колодец

К этому моменту горизонтальный дренаж низового откоса из-за большой засоренности на значительном протяжении находился в мало работоспособном состоянии. Фильтрационный расход, поступающий из горизонтального дренажа, до последнего времени оставался стабильным и составлял 12,2 – 10,8 л/с. Суммарный фильтрационный расход вертикального дренажа в 1999 – 2000 гг. также отличался стабильностью и находился в пределах 0,60 – 0,18 л/с.

Положение пьезометрических уровней в теле плотины, фиксируемое опускными точечными пьезометрами, до начала повышения отметки уровня воды в бассейне оставалось стабильным, с максимальной амплитудой сезонного колебания до 1 м, и отвечало ранее назначенным предельно допустимым значениям (ПДЗ). Начиная с августа 2000 г. инструментально фиксировалось медленное повышение депрессионной поверхности в теле и напоров в основании плотины (рис. 3).

Реакции на повышение уровня бьефа в бассейне со стороны горизонтального дренажа не отмечалось.

Существенное повышение уровня бьефа в низовом бассейне негативно отразилось на фильтрационном режиме низовой плотины и в конечном итоге выразилось в практически повсеместном выклинивании кривой депрессии на высоких отметках низового откоса плотины (156,5 – 157,5 м) (рис. 4), включая и участок водосброса. Данные о высоком положении депрессионной поверхности были получены в результате визуального контроля состояния плотины в мае – июне 2001 г. При этом первоначально проявились мо-

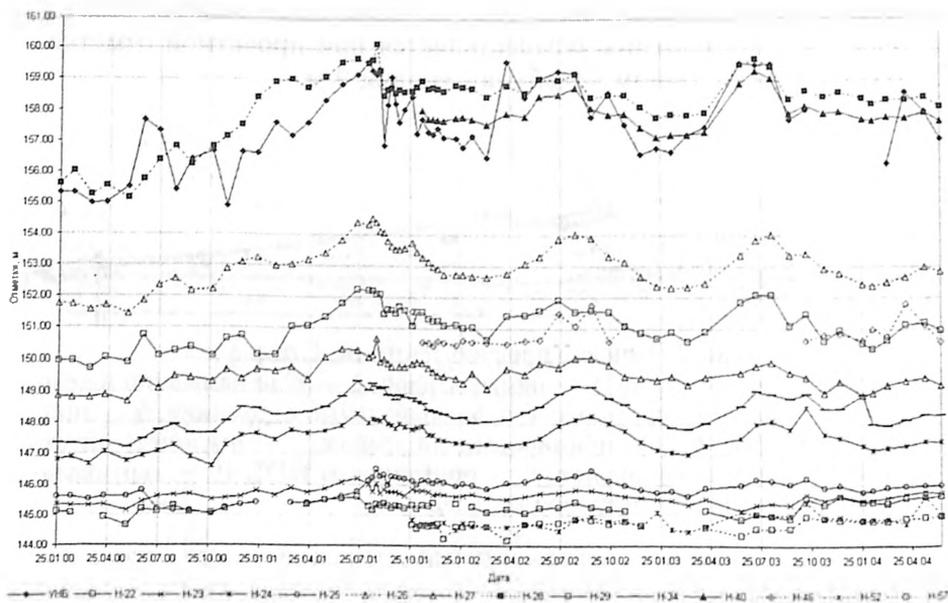


Рис. 3. График изменения пьезометрических уровней в теле и основании плотины. Створ 3-3

чажины на участках, примыкающих к берегам, и в дальнейшем по мере водонасыщения грунта происходило как повышение отметки выклинивания фильтрационного потока, так и распространение фронта выклинивания в русловую сторону. Точечными пьезометрами, расположенными в зоне выклинивания фильтрационного потока на откосе плотины (Н-10; Н-11; Н-26 и Н-27), столь значительный подъем депрессионной поверхности не был зафиксирован, что свидетельствовало о низкой чувствительности этих пьезометров. Наиболее сложная обстановка сложилась в створе водосброса, где при укороченном пути фильтрации и отсутствии дренажа наблюдались два участка выклинивания депрессионной кривой на дневную поверхность, примерно на отметках 157,0 и 152,5 м.

Кроме того, в правобережном примыкании к этому створу наблюдались поверхностные потоки профильтровавшихся вод с расходом 1,7 л/с и с тенденцией размыва откоса. На участке с ПК-13+00 по ПК-13+50 произошло оплывание откоса. Основными причинами ухудшения фильтрационной обстановки на плотине после подъема горизонта воды в бассейне на отметку НПУ являлись: отсутствие в плотине малопроницаемого ядра; отсутствие дренажа в правобережном примыкании и в створе

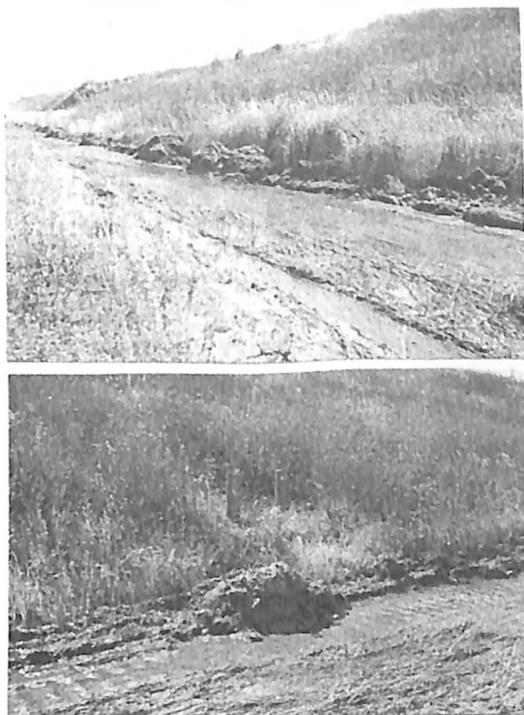


Рис. 4. Выклинивание фильтрационного потока на берму отм. 156,0 м

водосброса. Кроме того, плохая работоспособность горизонтального дренажа обуславливала появление мочажин на отметках около 148,7–146,0 м в левобережном примыкании плотины и заболачивание бермы на отм. 145,0 м.

Выполненная по формуле Шестакова В.М. [1] проверка устойчивости откоса на оплывание для случая выклинивания депрессионной кривой на незащищенный откос и стекания воды по откосу подтвердила, что условие устойчивости откоса на оплывание на некоторых участках не удовлетворяется.

Данные исследования фильтрации методом ЭГДА и численным методом локальных вариаций (в плоской постановке) для фактического профиля плотины и фактических значений водопроницаемости грунтов, слагающих тело плотины и основания, показали хорошие совпадения между собой и с фактическим положением депрессионной поверхности на момент реконструкции плотины.

С целью устранения проявившихся опасных тенденций нарушения статической и фильтрационной устойчивости низового откоса рассматривались следующие варианты инженерных мероприятий по обеспечению безопасной эксплуатации плотины (рис. 5):

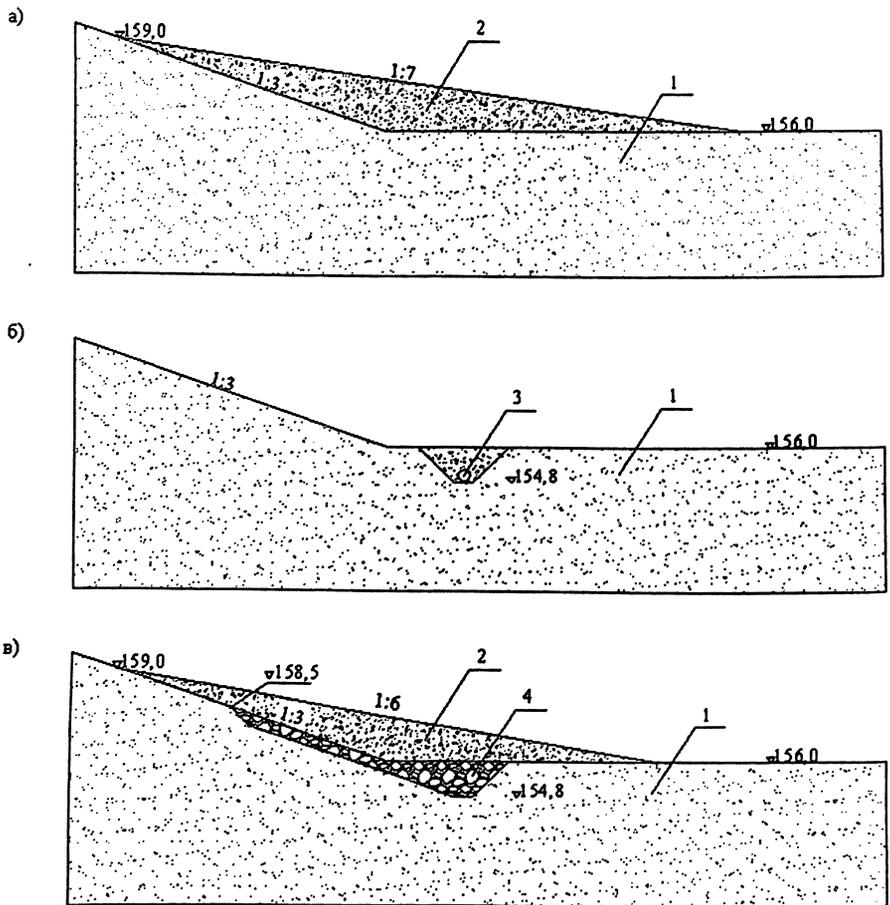


Рис. 5. Варианты ремонтных мероприятий

1 — тело намывной плотины; 2 — песчано-гравийная смесь; 3 — дренаж из трубофильтров; 4 — комбинированный дренаж

уполаживание низового откоса до заложения 1 : 7 с отметки 159,0 до отметки 156,0 м, отсыпкой ПГС, исключая выклинивание кривой депрессии на дневную поверхность;

дренирование низового откоса горизонтальным дренажом из трубофильтров на берме с отметкой 157,0 – 156,0 м, заложение лотка трубофильтров на отм. 154,0 м;

дренирование низового откоса в пределах отметок 158,5 – 154,8 м комбинированным дренажом (наслонным на откосе и ленточным, заглубленным на 1,2 м на берме) с последующим уполаживанием этого участка откоса до заложения 1:6 посред-

ством отсыпки ПГС. Аналогичное решение предложено для участка водосброса между отм. 147,0 – 156,0 м и на отметке 148,0 м и для участка откоса с ПК-11 по ПК-11+50.

В двух последних вариантах предполагалось применение водопонижения иглофильтровыми установками и последовательное выполнение работ небольшими по протяженности участками.

Отвод дренажных вод в водоотводящую канаву предусматривался сбросными коллекторами из асбоцементных труб  $d = 300$  мм через каждые 100 м.

На основе технико-экономического сравнения рассмотренных вариантов с учетом наличия необходимых стройматериалов, а также временного фактора выполнения работ (необходимость выполнения работ в сухое время года) и применения однотипных конструкций на различных участках был принят 3-й вариант дренирования и укрепления откоса плотины.

Главной особенностью запроектированной дренажной системы являлось применение каменной наброски крупностью до 200 мм в качестве водопроводящего тракта и геотекстиля толщиной 1 – 6,5 мм в качестве обратного фильтра (разделительного слоя).

Приоритетность выполнения работ на плотине была определена в следующем порядке:

берма на отм. 156,0 м;

участок водосброса между отм. 147,0 – 156,0 м;

участок откоса с ПК-11 по ПК-11+50, отм. 148,0 м.

Все работы по реконструкции плотины проводились без изменения режима работы ГАЭС, т. е. в обычном суточном диапазоне колебания уровня воды в нижнем бассейне между отметками УМО и НПУ, и без проведения водопонижения на участках производства работ. Предварительно была выполнена очистка и промывка горизонтального дренажа, в результате которой дренажный расход увеличился с 12,8 до 22,8 л/с и произошло осушение левобережного примыкания и бермы на отм. 145 м.

Работа осуществлялась в два этапа в следующей последовательности.

*1-й этап:*

организация водоотвода временными канавами;

срезка растительного слоя на откосе плотины;

разработка траншеи под ленточный дренаж;

укладка геотекстильного полотна на подготовленное основание и закрепление его крупным камнем, частично укладываемым на откосе вручную;

наброска камня в траншею ленточного дренажа и на откос;

устройство сбросных коллекторов дренажных вод.

Длина участка производства работ (захваток) составляла 4 – 12 м в зависимости от физико-механических характеристик грунта и обводненности откоса. Фактическая крупность камня, укладываемого в дренаж, составляла  $450 \pm 20$  мм, а примененное иглопробивное геотекстильное полотно для разделительного слоя соответствовало ТУ-8397-038-05766623-97, марки Б. Толщина и коэффициент фильтрации полотна при давлении 2 КПа соответственно равны 4,5 мм и  $1 \cdot 10^{-3}$  м/с.

После завершения работ 1-го этапа по всему фронту плотины (с ПК-14+50 по ПК-6+00 работ 1-го этапа, рис. 6) выполнялись работы 2-го этапа, включающие:



Рис. 6.

укладку геотекстильного полотна на каменную наброску;  
уполаживание откоса отсыпкой ПГС;  
укладку растительного слоя.

Параллельно велись работы по устройству дренажа на участке водосброса, где в пределах отметок 147,0–152,0 м намытый в тело плотины песок был заменен на каменную наброску, а над лотком водоспуска, помимо каменного банкета, дополнительно

была уложена железобетонная балка прямоугольного сечения 0,5 x 1,6 м, служащая упором для наброски банкета, обеспечивающего уполаживание откоса до заложения 1:6.

Принятая конструкция комбинированного дренажа и удачная организация производства работ позволили в короткие сроки, август – октябрь, провести необходимую реконструкцию низовой плотины без изменения режима работы ГАЭС. При этом было уложено 36000 кв. м геотекстильного полотна, около 10000 куб. м камня и галечника и около 40000 куб. м ПГС.

Для усиления контроля за фильтрационным режимом в плотине дополнительно к существующей пьезометрической сети было установлено 19 пьезометров.

С целью выполнения требований СНиП [2] в части исключения выхода фильтрационного потока в зону, подверженную промерзанию (низовая призма плотины отм. 143,0 м, 147,0 м), была выполнена пригрузка бермы до отм. 147,0 м. При этом были прочищены скважины вертикального дренажа, выпуски из скважин были выведены в отдельные смотровые колодцы, отводящая канава заменена на закрытый горизонтальный дренаж, объединяющий смотровые колодцы и выведенный в новый отводящий канал.

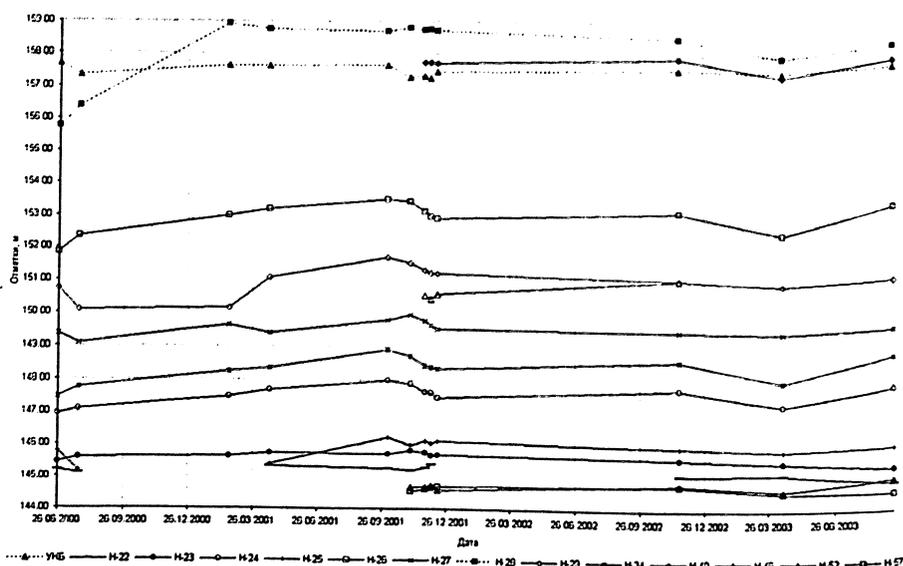
Анализ данных натурных наблюдений за пьезометрическими уровнями (рис. 3) показывает, что фильтрационный режим плотины стабилизировался. Наблюдаемые колебания пьезометрических уровней в основном происходят за счет изменения среднесуточного уровня воды в нижнем бассейне при изменениях режима работы станции. Другим фактором, влияющим на фильтрационный режим, является инфильтрация атмосферных вод.

Как видно из рис. 7, с 2000 г. по 2004 г. пьезометрические уровни фильтрационного потока одинаковы при заданном среднесуточном уровне бьефа в бассейне. Незначительные колебания пьезометрических уровней возможно вызваны точностью отбора данных наблюдений. Критерием отбора служил среднесуточный уровень нижнего бассейна, равный промежутку от отм. 157,25 до отм. 157,75 м.

Выполненные ремонтные мероприятия по устройству дренажа и пригрузки на отм. 143,0–147,0 м, а также новой системы отвода фильтрационной воды посредством закрытого трубчатого дренажа исключили возможность подпора фильтрационного потока при промерзании грунта на низовом участке откоса.

### **Выводы**

1. Основными причинами, обусловившими недостаточный уровень безопасности низовой плотины ЗГАЭС после подъема уров-



ня воды в нижнем бассейне на проектную отметку НПУ, являлись отсутствие дренажа в правобережном примыкании и в створе водосброса, а также несоответствие фактического сложения тела плотины проектному профилю, заключающееся в отсутствии в плотине малопроницаемого ядра.

2. Выполненные инженерные мероприятия по стабилизации фильтрационного режима в низовой плотине и повышение уровня контроля за фильтрацией обеспечивают безопасную эксплуатацию плотины при всех проектных уровнях воды в бассейне.

3. Применение геотекстиля для устройства дренажной системы на низовой плотине ЗГАЭС позволило отказаться от дефицитных природных фильтровых материалов, сократило время строительства и является первым масштабным опытом использования геотекстиля на ответственном гидротехническом сооружении.

4. Широкое внедрение геотекстиля в практику гидротехнического строительства требует изучения влияния кольматации и нагрузки на его фильтрационные свойства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Технические условия и нормы на проектирование и возведение земляных намывных плотин (проект).** Госстройиздат. М.: 1959.
2. **СНиП 2.06.05-84. Плотины из грунтовых материалов.** Госстрой СССР. 1985.

## **ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ РАЙОНА ПЛОТИНЫ ТАЛЬ ХОШ (ЗАПАДНАЯ СИРИЯ)**

*Бесстрашнов В.М., инженер (ЦСГНЭО – филиал ОАО  
«Инженерный Центр ЕЭС»)*

Работы по уточнению исходной сейсмичности для гидроузла Таль Хош в Сирийской Арабской Республике проводились сотрудниками Центра службы геодинамических наблюдений в электроэнергетической отрасли – филиала ОАО «Инженерный центр ЕЭС». Были выполнены следующие работы:

проведен анализ данных по сейсмологии, геологии, тектонике и неотектонике;

проведено дешифрирование космических снимков;

построены карты эпицентров сейсмических событий;

выделены основные сейсмогенерирующие структуры и проведена оценка их основных параметров;

проведен расчет балльности на площадке гидроузла для проектного землетрясения (ПЗ) — период повторяемости 100 лет и максимального расчетного землетрясения (МРЗ) — период повторяемости 10 000 лет.

Гидроузел Таль Хош находится на территории западной Сирии. Гидроузел расположен на западных склонах хребта Джебел-Ансария. Территория в целом характеризуется высокой сейсмической активностью.

Для оценки сейсмической опасности таких объектов должны быть рассмотрены воздействия из удаленных и ближайших сейсмогенерирующих структур, а также учтены воздействия от местных землетрясений на уровне рассеянной сейсмичности. Для этого была проанализирована сейсмичность территории, ограниченной координатами 31°-43° N; 32°-48° E.

Так как полнота сейсмологических материалов за период инструментальных наблюдений зависит от местоположения сейсмических станций относительно исследуемого района, был составлен список станций, расположенных на указанной территории. Однако ближайшие к району расположения гидроузлов сейсмические станции работают относительно недавно и поэтому слабые сейсмические события ( $M < 3,7$ ) в этом районе без пропусков могут определяться лишь начиная с 1994 г.

В значительной части публикаций, посвященных исторической сейсмичности рассматриваемого района, приводятся лишь

данные о сейсмических сотрясениях в отдельных населенных пунктах. Поэтому предпочтение отдавалось работам последних лет, в которых указаны координаты эпицентров и магнитуды землетрясений. Одной из основных работ, в которой рассматривается связь исторических и современных землетрясений с активными разломами, является публикация «Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region» (Ambraseys, Jackson, 1998). В табл. 1 приведены источники, на основе которых был составлен сводный каталог.

Таблица 1

Источники сейсмологических данных

Источник	Принятое сокращение
Ambraseys, Jackson. Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. <i>Geophys.J.Int.</i> (1998) 133, 390-406.	AJ
Catalog of earthquakes occurring in the Middle East, 1900 - 1983, compiled at NOAA (Riad and Meyers, 1985).	MEAST
International Seismological Centre. Pipers Lane, Thatcham, Berkshire, U.K. RG19 4NS.	ISC
Preliminary Determinations of Epicenters, Monthly Listing. U.S. Geological Survey, Information Services, Box 25286, Federal Center, Denver, CO 80225.	PDE
Geophysical Institute of Israel. Catalog of earthquakes 1990-2003.	Israel

В случае, когда параметры землетрясения приводились в нескольких источниках, выдерживалась следующая приоритетность этих источников: (1 – AJ) → (2 – ISC) → (3 – PDE) → (4 – Israel). На основе данных сводного каталога и списка сейсмостанций были построены распределения землетрясений для гидроузла за весь период для землетрясений с  $M \geq 5$  и начиная с 1900 г. для землетрясений с  $M \geq 3,7$  (рис. 1).

Проведенный анализ сейсмичности показывает, что разрушительные ( $M > 7$ ) землетрясения в ближайших к площадкам гидроузлов сейсмоактивных зонах (Ливано-Сирийской и Восточно-Анатолийской) происходили в исторический период и распределение их во времени крайне неравномерно. В то же время их современная сейсмическая активность, устанавливаемая по инструментальным данным, достаточно высока. В XX веке в зоне Восточно-Анатолийского разлома известно 11 землетрясений с  $M > 6$

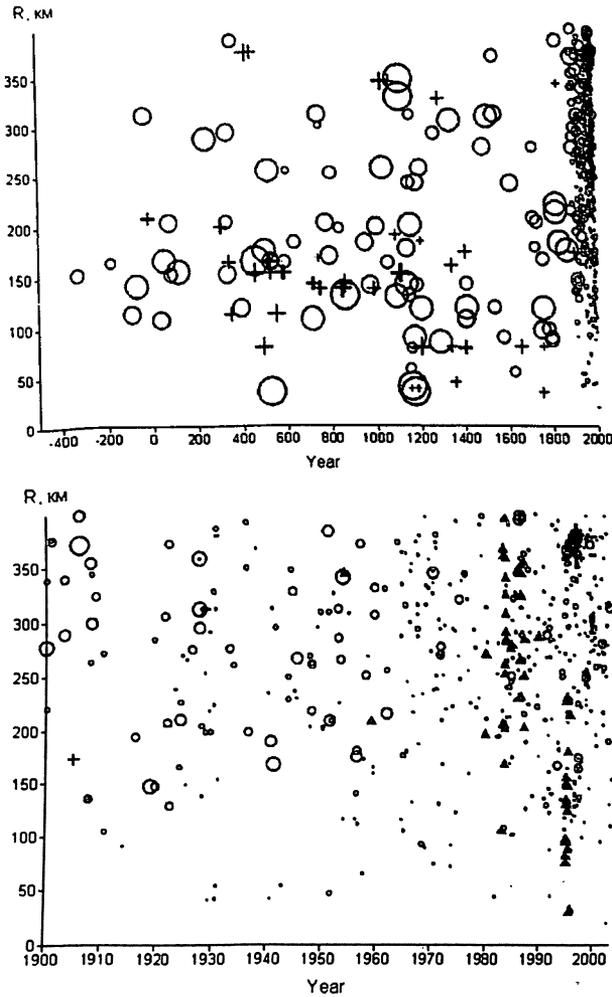
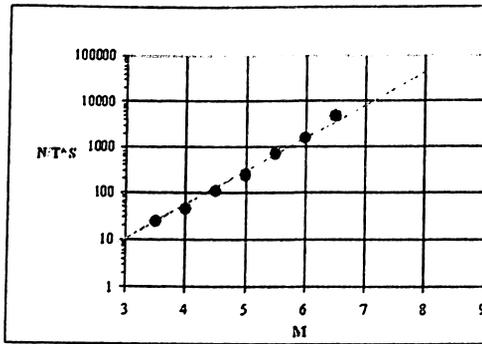


Рис. 1. Распределение землетрясений относительно гидроузла Таль Хош

и 2 таких события в 1918 г. и 1927 г. произошли в зоне Ливано-Сирийского разлома. При этом землетрясение 29.09.1918 г. с  $M = 6.5$  произошло на расстоянии 57 км от гидроузла Таль Хош.

График повторяемости, построенный для рассматриваемой части зоны Ливано-Сирийского разлома по каталогу Геофизического института Израиля за период 1900 – 2003 гг. (рис. 2), показывает, что возможная максимальная магнитуда для периода 10 000 лет составляет примерно 7,2 при максимальной наблюдаемой магнитуде за этот период, равной 6,5.



T, лет	S, км <sup>2</sup>
104 (1900-2003)	45740
Магнитуда (M)	Кол-во (N)
2.5	368
3	199
3.5	96
4	59
4.5	23
5	13
5.5	4
6	2
6.5	1

$$\gamma_M = 0,717$$

Рис. 2. График повторяемости землетрясений в зоне Ливано-Сирийского разлома за период 1900 – 2003 гг.

Для уточнения положения основных разрывных нарушений и оценки современной активности проведено специализированное дешифрирование космических снимков.

Практически повсеместно основные геологические структуры достаточно хорошо дешифрируются на космических снимках, а породные комплексы разного состава и возраста находят свое выражение в рельефе.

Несмотря на то, что при дешифрировании сознательно не фиксировались линеаменты, отвечающие четко выраженным границам породных комплексов и простираию слоистости, часть таких элементов геологических структур все-таки может присутствовать на схеме дешифрирования. Кроме того, на участках относительно слаборасчлененного рельефа в качестве возможных разрывных нарушений рассматривались протяженные спрямленные участки долин рек и ручьев. Наиболее протяженные разрывные нарушения, показанные на геологической карте масштаба 1 : 500 000 и тектонической карте масштаба 1 : 1 000 000, достаточно хорошо сопоставимы с линеаменентами.

Наиболее четкие признаки современной тектонической активности (смещение форм рельефа) установлены для Ливано-Сирийского разлома на его субмеридианальном участке протяженностью около 75 км от Ливано-Сирийской границы примерно до широты г. Тель Сальхаб (Tell Salhab). Присутствуют эти признаки и в районе расположения плотины гидроузла Ас Саура.

По имеющимся материалам можно с уверенностью говорить о том, что в зоне Ливано-Сирийского разлома имеются палео-

сейсмодислокации — следы землетрясений прошлого. Детальное изучение таких образований может позволить оценить магнитуды землетрясений, при которых образовались эти структуры и реальную повторяемость таких событий.

Если принять рассматриваемый участок Ливано-Сирийского разлома как палеосейсмодислокацию, возникшую при одном землетрясении, то оценка возможной магнитуды по длине разрыва (Bonilla et al., 1984; Chinnery, 1969; Iida, 1965; Khromovskikh, 1985; Slemmons et al., 1989; Wells, Coppersmith, 1994, Стром, 1998) будет  $\approx 7,5 - 8,0$  при сдвиго-сбросовом характере подвижки.

Проведенный анализ данных по сейсмологии, геологии, тектонике, неотектонике и основным геофизическим полям дает основание рассматривать в качестве основных местных и далеких сейсмогенерирующих зон, влияющих на оценку сейсмостойкости основных сооружений гидроузла Таль Хош, следующие структуры:

Ливано-Сирийская СГС — продолжение зоны глубинных разломов впадины Мертвого моря и долины р. Иордана;

Восточно-Анатолийская СГС;

Загросская СГС — расположена на значительном расстоянии, но, учитывая определенный частотный состав и длительность колебаний при воздействиях из этой зоны, она может быть рассмотрена при определении параметров расчетных сейсмических воздействий на уровне МРЗ.

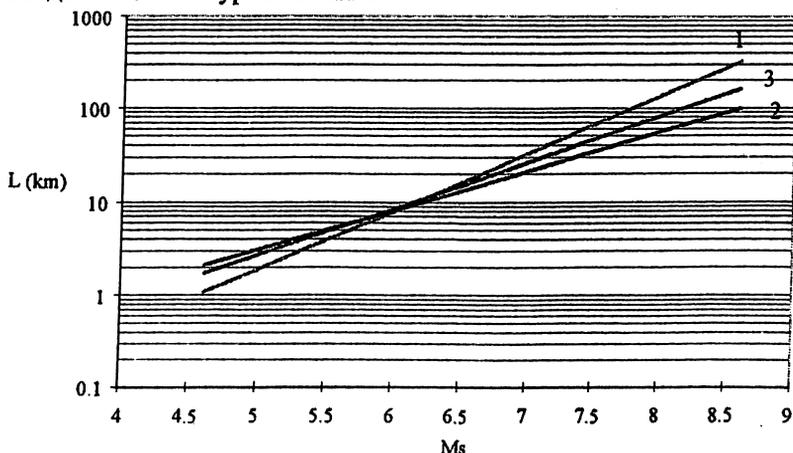


Рис. 3. Соотношение протяженности сейсмогенных разрывов (L) и магнитуд землетрясений ( $M_s$ )

- 1 — преимущественно сдвиговые подвижки в очагах (89 событий)
- 2 — преимущественно сбросовые подвижки в очагах (54 события)
- 3 — преимущественно взбросовые подвижки в очагах (47 событий)

Характеристика этих структур и расчетный макросейсмический эффект на площадке основных сооружений на грунтах II-ой категории по сейсмическим свойствам в баллах шкалы MSK-64 (табл. 2) приведены в табл. 3 и табл. 4.

Таблица 2

Характеристика грунтов по сейсмическим свойствам (Табл. 1, СНиП II-7-81\*, 2000; фрагмент)

Категория грунта по сейсмическим свойствам	Грунты	Сейсмичность площадки строительства при сейсмичности района, баллы		
		7	8	9
I	Скальные грунты всех видов ... неветерельные и слабоветерельные; крупнообломочные грунты плотные маловлажные из магматических пород, содержащие до 30% песчано-глинистого заполнителя; выветрелые и сильновыветрелые	6	7	8
II	Скальные грунты выветрелые и сильновыветрелые, в том числе вечномерзлые, кроме отнесенных к I категории; крупнообломочные грунты, за исключением отнесенных к I категории; пески гравелистые, крупные и средней крупности плотные и средней плотности маловлажные и влажные; пески мелкие и пылеватые плотные и средней плотности маловлажные; глинистые грунты с показателем консистенции $I_L \leq 0,2$ при коэффициенте пористости $e < 0,9$ для глин и суглинков и $e < 0,7$ — для супесей;	7	8	9
III	Пески рыхлые независимо от влажности и крупности, пески гравелистые, крупные и средней крупности плотные и средней плотности водонасыщенные; пески мелкие и пылеватые плотные и средней плотности влажные и водонасыщенные; глинистые грунты с показателем консистенции $I_L > 0,5$ ; глинистые грунты с показателем консистенции $I_L \leq 0,5$ при коэффициенте пористости $e \geq 0,9$ для глин и суглинков и $e \geq 0,7$ — для супесей.	8	9	>9

Таблица 3

Характеристика основных сейсмогенерирующих структур

Сейсмогенерирующие структуры			Возможная магнитуда		
Название	Тип подвижки	Максимальная магнитуда известных землетрясений	Глубина гипоцентра (км)		
			ПЗ		МРЗ
			$M_{\text{инструментальны}}$	$M_{\text{исторические}}$	$M_{\text{ПЗ}}$
Ливано-Сирийская	Сдвигосброс	6.5	7.8	$\frac{7.0}{20}$	$\frac{8.0}{25}$
Восточно-Анатолийская	Сдвиговзброс	7.2	7.8	$\frac{7.2}{20}$	$\frac{8.0}{25}$
Загросская	Надвиг	7.2	7.8	$\frac{7.2}{20}$	$\frac{8.0}{25}$

Таблица 4

Макросейсмический эффект на участке основных сооружений гидроузла

Объект	Таль Хош		
	$\Delta$	$J_{\Delta}^{100}$	$J_{\Delta}^{10000}$
Сейсмогенерирующие структуры			
Ливано-Сирийская	10	9.1	10.0
Восточно-Анатолийская	100	6.8	8.0
Загросская	760	3.7	4.9

при расчетах использована формула: (New catalogue, 1982)

$$J_{\Delta} = 1.5M - 3.5 \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + 3.0$$

Значения магнитуд для ПЗ ( $M^{100}$ ) приняты с учетом произошедших в пределах сейсмогенерирующих структур за последние 100 лет землетрясений. Для Ливано-Сирийской структуры значения повышены на 0.5 магнитуды в связи с высокой вероятностью обнаружения в ее пределах палеосейсмодислокаций.

Значения магнитуд для МРЗ ( $M^{10000}$ ) приняты для всех зон на уровне  $M = 8.0$  с допущением, что такие магнитуды являются предельными для рассматриваемых структур.

Глубины гипоцентров очагов ( $h$ ) приняты в достаточной мере условно на уровне 20 – 25 км, что соответствует средней части земной коры.

Приведенные в табл. 5 данные о величине сейсмических сотрясений ( $I$ ) вблизи Ливано-сирийского разлома – в Алеппо, Антакии, Баальбеке, Триполи и Дамаске по арабским докумен-

там VII-XVIII веков (Poirier and Taher, 1980) — косвенно подтверждают такую высокую оценку сотрясаемости.

Таблица 5

Сильные (6 и более баллов) землетрясения в Алеппо, Антакии, Баальбеке, Триполи и Дамаске

Алеппо						Антакия						Дамаск					
год	мес.	день	h	M	I	год	мес.	день	h	M	I	год	мес.	день	h	M	I
634	0	0	15	6,3	8	713	3	20	30	7.4	9	991	4		22	7,1	9
951	9	0	16	6,8	9	835	0	0	14	6.1	9	1094	6				6
1170	6	30	40	7,7	10	859	0	0	22	7.4	11	1151			12	6,1	8
1404	2	11	36	7	9	1091	9	17	30	7.4	9	1152	2	2	12	5,9	6
1404	12	5			7	1408	12	30	22	7.5	11	1177					8
1484	4		10	4,7	7							1259	3				6
Баальбек						Триполи						1284	0	0	12	5,5	10
1201	6	2	40	7.7	11	1339	1		30	6.8	8	1753	12	18	5	2,3	7
												1759	10	30	18	6,9	11

Проведенный анализ данных позволяет говорить о том, что основной сейсмогенерирующей структурой, определяющей исходные (фоновые) сейсмические воздействия для гидроузла Таль Хош является Ливано-Сирийский разлом с магнитудой возможных землетрясений для периода повторяемости 100 лет равной 7.0 и для периода повторяемости 10 000 лет — 8.0.

Воздействия из зоны Восточно-Анатолийского разлома с магнитудой возможных землетрясений для периода повторяемости 100 лет равной 7.2 и для периода повторяемости 10 000 лет — 8.0 также должны быть учтены при определении расчетных сейсмических воздействий для гидроузла Таль Хош.

Кроме того, учитывая определенный частотный состав и длительность колебаний при воздействиях из Загросской зоны, она может быть рассмотрена при определении параметров расчетных сейсмических воздействий для всех гидроузлов на уровне максимального расчетного землетрясения.

Максимальный макросейсмический эффект на площадке основных сооружений на грунтах II-ой категории по сейсмическим свойствам в баллах шкалы MSK-64 составляет 9 баллов для периода повторяемости 1 раз в 100 лет (ПЗ) и 10 баллов для периода повторяемости 1 раз в 10000 лет (МРЗ).

Воздействия из Ливано-Сирийской, Восточно-Анатолийской и Загросской зон, с принятой магнитудой возможных землетрясений для периода повторяемости 100 лет и 10 000 лет, должны быть учтены при определении расчетных сейсмических воздействий для гидроузла Таль Хош.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Ambraseys N.N.** On the seismicity of South West Asia, data from a XV century arable manuscript, *Revue pour l'Etude des Calamites* 37. 1961.
2. **Ambraseys N.N.** A note on the chronology of Willis' list of earthquakes in Palestine and Syria. // *Bull. Seism. Soc. Am.* 52. 1962.
3. **Ambraseys N.N.** Value of historical records of earthquakes. // *Nature* 232. 1971.
4. **Ambraseys N.N.** Studies of historical seismicity and tectonics, in *Geodynamics Today*, the Royal Society of London. 1975.
5. **Ambraseys N.N., Jackson J.A.** Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. // *Geophys.J.Int.* 133. 1998.
6. **Bonilla, M.G., Mark R.K., Lienkaemper J.J.** Statistical relations among earthquake magnitude, rupture length and surface fault displacement. // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1984. 74.
7. **Chinnery M.A.** Earthquake magnitude and source parameters. // *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1969, 59, 1969-1982.
8. **Harvard centroid-moment tensor (CMT) catalog.** <ftp://saf.harvard.edu>.
9. **Iida K.** Earthquake magnitude, earthquake fault and source dimensions. // *J. Earth Sciences Nagoya University*. 1965. 13.
10. **Khromovskikh V.S.** Determination of magnitudes of ancient earthquakes from dimensions of observed seismodislocations. // *Tectonophysics*. 166. 1989.
11. **New catalog of strong earthquakes in the USSR from ancient times through 1977.** Editors-in chief profs. N.V.Kondorskaya and N.V. Shebalin. National Oceanic and Atmospheric Administration. Boulder. Colorado. USA. 1982.
12. **Poirier J.P. and Taher M.A.** Historical seismicity in the near and Middle East, North Africa, and Spain from Arabic Documents (VIIth - XVIIIth Century): *Bulletin of the Seismological Society of America*. v. 70. 1980.
13. **Riad, Samir and Meyers H.** Earthquake catalog for the Middle East countries 1900-1983: National Geophysical Data Center, Report SE-40. Boulder. CO. 1985.
14. **Slemmons D.B., Bodin P., Zang X.** Determination of earthquake size from surface faulting events. In *Proc. of the International Seminar on Seismic Zonation, Guangzhou, China, State Seismological Bureau. Beijing.* 1989.
15. **U. S. Geological Survey.** <http://www.usgs.gov>
16. **Wells D.L., Coppersmith K.J.** New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. // *Bull. Seism. Soc. Am.* 84. 1994.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЛОТИНЫ ТАЛЬ ХОШ

*Зайцев Н.Н., инженер (ФГУ «НТЦ Гидротехбезопасность»  
Ростехнадзора России), Желанкин В.Г., кандидат техн. наук,  
Иващенко И.Н., доктор техн. наук (ОАО «НИИЭС»)*

В течение 2003 – 2004 гг. сотрудниками ЦБНН ОАО «НИИЭС» выполнено комплексное обследование состояния четырех гидроузлов, расположенных в Западной части Сирийской Арабской Республики: Таль Хош и Ас Саура в Прибрежном бассейне, а также Растан и Рабита Шейх в бассейне р. Оронт. Некоторые результаты, представляющие интерес и для российской практики эксплуатации гидросооружений, представлены, наряду с данной статьей, в статьях Бесстрашнова В.М., а также Зайцева Н.Н. и Сурикова Е.А.

Программа комплексного обследования включала:

изучение имеющейся проектной и исполнительной документации, включая данные изысканий и исследований, а также опыта эксплуатации гидроузлов;

детальное визуальное обследование сооружений с фиксацией повреждений;

обследование и проверку сохранности и работоспособности системы КИА;

сбор, формирование компьютерной базы данных, обработку и анализ результатов натуральных визуальных и инструментальных наблюдений;

сбор и анализ гидрологической, метеорологической и сейсмологической информации;

инженерно-геологическое обследование, а также инструментальные геофизические исследования основания и тела сооружений;

поверочные расчеты напряженно-деформированного состояния плотин при воздействии статических и сейсмических воздействий, а для плотины Таль Хош – при воздействии ветроволновых воздействий;

разработку критериев безопасности и оценку уровня безопасности гидросооружений;

разработку технических предложений, технических решений, а также технических и рабочих проектов реконструкции гидросооружений.

Кроме того, для гидроузлов Растан и Рабита Шейх выполнена оценка параметров волны прорыва и размеров ущерба в случае аварии, сопровождающейся прорывом напорного фронта.

Комплексное обследование гидроузла Таль Хош выполнено весьма детально и завершено разработкой проекта реконструкции верхового откоса плотины Таль Хош.

В состав гидроузла ирригационного назначения Таль Хош входят: каменно-земляная плотина с суглинистым ядром, поверхностный водосброс автоматического действия, донный ирригационный водовод с башней и с затвором. Цементационная завеса по основанию выполнена из потерны (средняя глубина 80 м). Дополнительная цементационная завеса протяженностью до 600 м выполнена на левом берегу.

Максимальная высота плотины — 62,5 м, длина по гребню — 851 м, ширина гребня — 8,0 м. Проектная отметка гребня — 210,8 м. Заложение откосов со стороны верхнего бьефа 1 : 1,8, со стороны нижнего бьефа 1 : 1,5. Отметка нормального подпорного уровня (НПУ) 209,10 м, в проекте допускается форсировка уровня до отметки 210,66 м (рис. 1).

В геологическом строении района принимают участие дочетвертичные и четвертичные отложения различного генезиса: юрские известняки и доломиты; меловые отложения апта, сеномана и турона, представленные известняками, доломитами, мергелями и глинами; миоценовые базальты; плиоценовые известняки, мергели, песчаники, конгломераты, базальты; четвертичные конгломераты, песчаники, глины, суглинки, пески. Основанием плотины является толща закарстованных сеноманских известняков ( $K_4^b$ ) возраста и, на правом берегу, плиоценовых базальтов ( $\beta N_2^b$ ). Главными тектоническими структурами района являются горст-антиклиналь Ансария и депрессия Аккар. В основании плотины выявлены два разлома.

Для обеспечения необходимой надежности и устойчивости плотины в данных геологических условиях выполнен комплекс мероприятий по созданию бетонной плиты в основании ядра, площадной цементации под всей плитой основания ядра, укрепительной цементации на глубину 32 м и цементационной завесы на глубину до 80 м.

Обследование состояния плотины Таль Хош выявило серьезные повреждения верхового откоса. В результате осадок и переформирования верхового откоса при наполнении водохранилища на ряде участков образовалась берма, а заложение откоса достигло 1 : 1,6. Выявлены две основные причины переформирования откоса: а) грунт, отсыпаемый на откос, имеет очень большую неоднородность (коэффициент неоднородности достигает значения 100) — при



отсыпке таких грунтов возникает сильная сегрегация, мелкие фракции не перемешиваются с крупными, образуются пустоты и неплотности; б) в результате воздействия волны мелкий материал и глинизированный известняк вымываются обратной волной из больших пор, образованных крупным вышележащим материалом, и откладываются в зоне, где скорость откатывающейся волны резко падает. На образованной берме был пройден шурф размером 2,5 x 2,0 м и глубиной до 1 м. Глубину шурфа определило то, что ниже 1 м находились очень крупные камни. Таким образом, подтвердились указанные причины переформирования откоса. Кроме того, были изучены и подробно проработаны архивные материалы геотехнического контроля качества укладки грунтов в тело плотины. Как показывают расчетные оценки, приведенные в данной статье, материал верховой упорной призмы (табл. 1) не рассчитан на восприятие волнового воздействия высокой интенсивности (табл. 2). Указанные повреждения явились следствием ошибок проекта, которым не было предусмотрено необходимое волнозащитное крепление верхового откоса (при этом в проекте отсутствуют даже расчеты волнозащитного крепления).

*Таблица 1*  
*Расчетные характеристики грунтов плотины Таль Хош*

№	Наименование грунта	Объемный вес скелета грунта $\gamma_{ск}$ (Т/М <sup>3</sup> )	Угол внутреннего трения $\varphi$ град	Удельное сцепление кг/см <sup>2</sup>
1.	Горная масса упорных призм (проектное значение)	1,85	41,5	0,02
2.	Переходная зона и фильтры	1,65	35	0,01
3.	Суглинок ядра	1,59	17	0,275
4.	Аллювиальное основание	2,06	40	0,1
5.	Каменное крепление с заменой грунта (вариант 1)	1.85	58	0,02
6.	Каменная кладка из известняка (вариант 2а)	1.85	45	0,02

*Таблица 2*

Обеспеченность Р, %	1	2	4	5 <sup>*)</sup>	10	20	25	30
Максимальная скорость ветра, м/с	32	31	30	29	28	27	26,5	26

*\*) данные приводятся с округлениями*

К числу повреждений, обнаруженных при обследовании плотины, следует также отнести продольные трещины, обнаруженные на дорожном асфальтовом покрытии гребня плотины и ориентированные вдоль ее оси. Указанные трещины явились следствием осадок тела плотины: по данным геодезических измерений гребень плотины осел на 70 – 80 см. Данные визуального обследования коррелируются с результатами расчетов напряженно-деформированного состояния плотины при статических воздействиях: расчетами зафиксированы зоны развития повышенных пластических деформаций вблизи гребня.

Проведенная в ходе обследования достаточно подробная оценка сейсмологической информации ( см. статью Бесстрашнова В.М. в данном сборнике) показывает, что в данном районе возможны землетрясения с интенсивностью 9,2 и более баллов по шкале MSK–64. Наличие указанных зон развития повышенных пластических деформаций вблизи гребня может привести к быстрому нарастанию необратимых перемещений и осадок гребня при сейсмическом воздействии. Выполненные в ходе работ поверочные расчетные оценки, приведенные в данной статье, показали, что при сейсмическом воздействии столь высокой интенсивности устойчивость верхового откоса плотины Таль Хош не обеспечена.

Таким образом, результаты обследования выявили необходимость разработки мероприятий по обеспечению устойчивости верхового откоса плотины Таль Хош на действие интенсивных ветроволновых и сейсмических воздействий.

Необходимые для расчетов характеристики деформационных свойств материала плотины определены методом сейсморазведки - путем измерения скорости распространения упругих волн в диапазоне от десяти Герц до одного килоГерца (геофизические исследования выполнены специалистами Центра службы геодинамических наблюдений в электроэнергетической отрасли к.т.н. Козловым О.В. и инж. Артемьевым В.А.). При проведении работ использовалась цифровая компьютеризированная станция СП002 и невзрывной источник колебаний. Общий объем сейсмических измерений — 224 физические точки. Основной объем измерений выполнен в горизонтальной плоскости (отм. 199 – 202 м).

Для определения параметров материала бермы верхового откоса использовался метод обращенного сейсмического профилирования с шагом 1 м при общей длине 22 м со встречным и выносным пунктами приема. Пункты приема и возбуждения при сейс-

мическом просвечивании располагались по обе стороны от гребня плотины приблизительно на одинаковых отметках. Результаты статистической обработки данных измерений представлены на рис. 2.

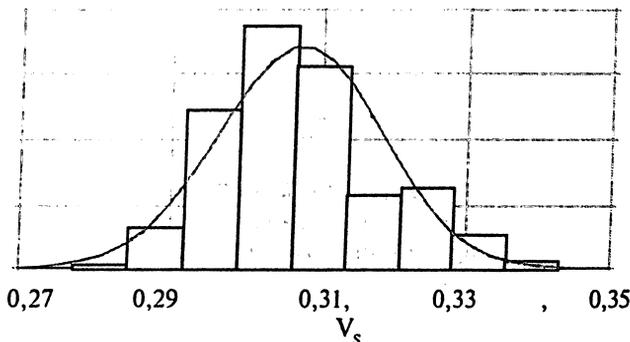


Рис. 2. Результаты статистической обработки и распределение скоростей поперечных волн (в м/с) по данным сейсмического просвечивания плотины: 525 — число лучей; 0,3 — среднее значение; 0,01 — стандартное отклонение; 0,28 — минимальное значение; 0,34 — максимальное значение.

Определенные по результатам сейсмических измерений деформационные свойства материалов верхового откоса и ядра близки к аналогичным по наименованию и зерновому составу грунтам, например, для плотины г/у Аль Кадисия, Ирак. При скорости продольных волн около 700 м/с модуль деформации составляет 1000 — 1100 кг/см<sup>2</sup>. В обследованном сечении не обнаружено существенных скоростных аномалий. Видимая на поверхности дорожно-асфальтового покрытия продольная трещина вглубь ядра не прослеживается. Наличие незначительного экстремума гистограммы (около 0,32 км/с) объясняется строением плотины — определенная часть каждого сейсмического луча проходит как через материал бермы и переходного слоя, так и через материал ядра.

В архивных отчетных материалах обнаружены результаты только двух опытов испытания каменной наброски на сдвиг. Однако учитывая, что сравнение с аналогами (горная масса из доломитизированных известняков) дает даже несколько большие углы внутреннего трения при данных скоростях упругих волн и данной плотности укладки, в поверочных расчетах напряженно-деформированного состояния и устойчивости плотины Таль Хош приняты проектные характеристики грунтов, несмотря на малое количество опытов.

В результате комплексного обследования плотины Таль Хош получены следующие результаты:

на основе детальной статистической обработки данных натурных наблюдений оценена работоспособность пьезометров, установленных в ядре и основании плотины;

с привлечением результатов расчетов фильтрационного режима в плотине и основании определены соответствующие критерии безопасности;

по результатам статистической обработки данных натурных наблюдений и расчетов напряженно-деформированного состояния плотины определены критериальные значения осадок и горизонтальных смещений в плотине, необходимые для контроля за безопасностью по имеющимся маркам на гребне и бермах плотины;

разработаны технические предложения по реконструкции существующей контрольно-измерительной аппаратуры и организации системы мониторинга для обеспечения безопасности;

дана оценка уровня безопасности плотины: на этой основе определены ограничения режима подъема уровня воды в водохранилище, а также разработаны мероприятия, обеспечивающие безопасную эксплуатацию плотины.

Основное внимание в данной работе уделено поиску и обоснованию вариантов технических решений, которые могут обеспечить сейсмостойкость плотины и крепление верхового откоса на ветроволновые воздействия. Рассмотрены варианты проекта с использованием только каменного материала (в ходе работ был разработан также проект усиления откоса с использованием габионов, от которого отказались по причинам технологического характера).

Расчеты сейсмостойкости плотины Таль Хош по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения выполнены при интенсивности землетрясений 7, 8 и 9 баллов (по шкале MSK). В расчете принимались проектные характеристики грунтов, а также данные аналогов (при этом для сопоставления использованы экспериментально определенные характеристики скоростей упругих волн, рис. 2).

#### *Описание вариантов расчетов*

*Вариант 1.* Производится замена части грунта верхового откоса на более прочный материал с углом трения  $\varphi = 58^\circ$  и ручной укладкой поверхностного слоя толщиной не менее 1,5 м в зоне от гребня до отм. 196 м. На участке замены грунта требуется

использовать материалы изверженных пород – гранитов, базальтов. Заложение откоса сохраняет проектное значение 1 : 1,8.

*Вариант 2.* Производится пригрузка перемычки отсыпкой с уплотнением каменного материала с верхового откоса перемычки до отм. 177,5 м для обеспечения устойчивости. Производится отсыпка грунта с уплотнением с верховой бермы перемычки и уположивание верхового откоса до заложения 1 : 2,0. Грунт верхового откоса остается с проектными характеристиками с углом трения  $\varphi = 41,5^\circ$ . Зерновой состав отсыпаемого камня должен соответствовать требованиям по волнозащите. Схема варианта 2 и 2а представлена на рис. 1.

*Вариант 2а.* Существенное повышение устойчивости откоса и прочности на ветроволновые воздействия достигается в случае, если верхняя часть откоса (до отм. 200,0 м) выполняется в виде каменной кладки с углом внутреннего трения  $\varphi = 45,0^\circ$ .

Для варианта 2а были проведены дополнительные уточняющие расчеты с целью определения устойчивости верховой перемычки, в состав которой входит развитый экран из суглинистого материала (рис. 2). Данные расчеты позволили определить необходимый объем пригрузки горной массой верхового откоса перемычки от бермы на отм. 176,0 м, что обеспечивает устойчивость выбранной конструкции крепления. Результаты расчетов устойчивости по всем рассмотренным вариантам сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов

Коэффициенты устойчивости	Откос с проектными значениями характеристик грунта и проектным заложением			Варианты технических решений							
				Вариант 1. Замена части грунта верхового откоса			Вариант 2. Крепление каменной наброской с заложением 1:2			Вар. 2а	Вар. 2а (уточнен)
Баллы	7	8	9	7	8	9	7	8	9	9	9
$K_{\text{верх}}$	1,29	1,11	0,86	1,5	1,27	1,0	1,45	1,25	1,01	1,16	1,15
$K_{\text{низ}}$	-	-	1,06	-	-	-	-	-	-	-	-

Результаты расчетов показывают, что при землетрясении 9 баллов коэффициент устойчивости верхового откоса с проектными значениями характеристик грунта и проектным заложением имеет значение ниже единицы и, следовательно, устойчивость верхово-

вой упорной призмы плотины Таль Хош может быть нарушена в процессе эксплуатации. Проектные проработки выполнены для варианта плотины 2а (с уточнением согласно табл. 3).

Проверка устойчивости верхового откоса плотины Таль Хош (вариант конструкции 2а) на ветроволновое воздействие выполнена в соответствии с указаниями действующих нормативных документов [1, 2, 3].

Непосредственно для бассейна реки сведения о ветровом режиме отсутствуют.

Расчетные максимальные скорости ветра (параметры ветроволновых воздействий установлены Жиркевичем А.Н., начальником отдела института «Гидропроект») заданной обеспеченности (табл. 2) могут быть приняты с учетом физико-географических условий рассматриваемого бассейна по данным метеорологической станции Сафита (по аналогии с данными проекта плотины Аль-Хусейн в бассейне р. Хусейн).

В соответствии с рекомендациями действующих СНиП 2.06.04-82\* [1] и СНиП 2.06.05-84\* [3] для плотины, класс которой не выше чем II, следует принимать расчетную максимальную скорость ветра 2%-ой обеспеченности (31 м/с) при НПУ. При ФПУ для данного класса гидротехнических сооружений расчетная максимальная скорость ветра должна приниматься 20%-ой обеспеченности — 27 м/с.

Расчетные значения высоты волны, определенные в соответствии с рекомендациями [1] и использованные в проекте реконструкции, составили:

при НПУ (209,10 м)  $h_{1\%} = 2,02$  м.;

при ФПУ (210,66 м)  $h_{1\%} = 1,81$  м.

Параметры волноустойчивого каменного крепления верхового откоса, определенные в соответствии с указаниями [1], приведены в табл. 4.

На рис. 3. представлен требуемый зерновой состав камня.

Таблица 4

Наименование параметра каменного крепления	Значение параметра
Вес камня на откосе	0,51 тонны
Требуемый приведенный диаметр камня	0,7 м
Минимальный диаметр камня 50%-ой обеспеченности	0,43 м
Максимальный диаметр камня 50%-ой обеспеченности	1,26 м
Средний диаметр камня	0,85 м

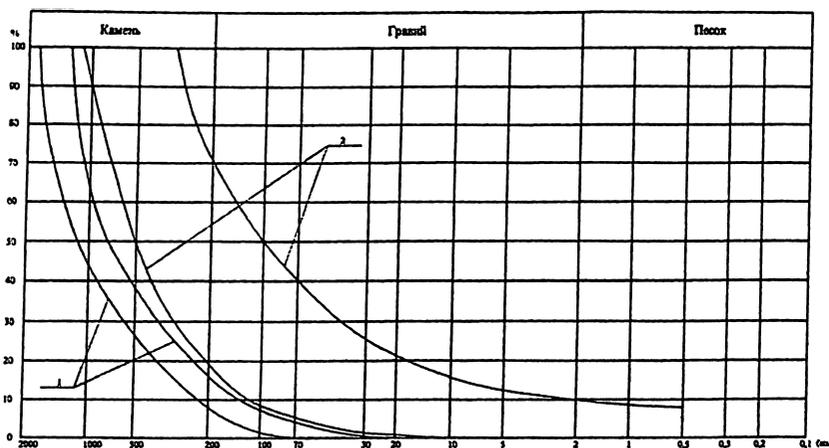


Рис. 3. Требуемый зерновой состав для восстановления верхового откоса плотины Таль Хош: 1 — требуемый зерновой состав горной массы для восстановления верхового откоса плотины Таль Хош; 2 — зерновой состав верховой упорной призмы плотины Таль Хош.

Конструктивное решение гребня плотины Таль Хош, приведенное на рис. 4, выполнено с учетом ветроволновых нагрузок, а также с учетом произошедших осадок гребня плотины.

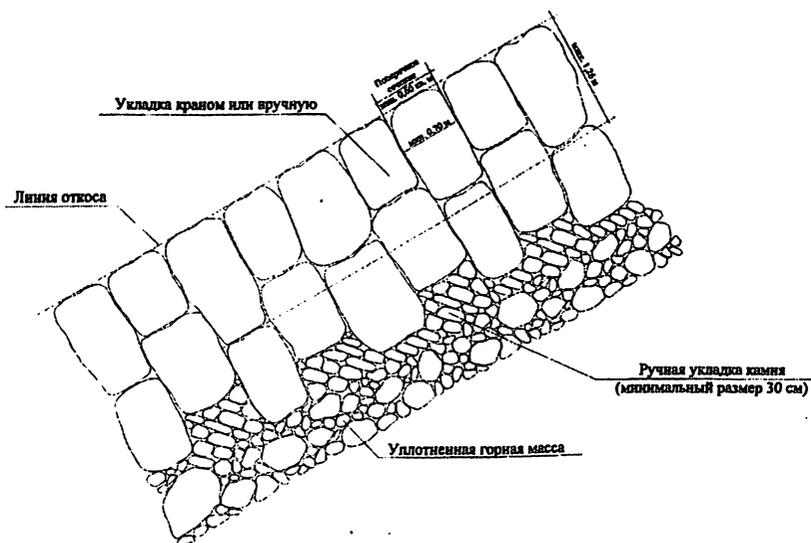


Рис. 5. Ручная укладка камня с отметки 200,00 до отметки 210,00.



Расчет высоты стенки парапета выполнен согласно указаниям [1] и [3]. Максимальная расчетная отметка гребня парапета равна: при НПУ — 210,51 м.; при ФПУ — 212,13 м. Устойчивость конструкции парапета на сдвиг обеспечена — коэффициент устойчивости, определенный с учетом нагрузок при накате и откате волны, равен 2,09.

Укрепление водного (верхового) откоса плотины Таль Хош от воздействия волн, возникающих от ветра (скорость ветра до 31 м/с), и сейсмических нагрузок (до 9 баллов по шкале МКС) выполняется в два этапа:

I этап — укрепление верхового (водного) откоса с заложением 1 : 2,0 каменной насыпью от низа плотины до отметки 200,00 м и от отметки 200,00 м до гребня с ручной (краном) укладкой камня (рис. 5);

II этап — реконструкция гребня плотины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 2.06.04-82\* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Минстрой России, ГП ЦПП. М.: 1996 г.
2. СНиП 2.06.05-84\* Плотины из грунтовых материалов. Госстрой СССР. М.: 1991 г.
3. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружений. Под ред. Д.Д. Лапто. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. Ленинград. 1990 г.

### **РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА РЕКОНСТРУКЦИИ ГИДРОУЗЛА РАБИТА ШЕЙХ, ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ ЭРОЗИИ КАРСТУЮЩИХСЯ ПОРОД ОСНОВАНИЯ**

*Зайцев Н.Н., инженер (ФГУ «НТЦ Гидротехбезопасность» Ростехнадзора России), Суриков Е.А., инженер (ОАО «НИИЭС»)*

Гидроузел Рабита Шейх (Сирийская Арабская Республика) расположен на вадии Ассарут, являющейся левобережным притоком реки Аль Ассы (Оронт). Гидроузел включает (рис. на цветной вкладке) грунтовую плотину, поверхностный автоматический паводковый водосброс и донный водовыпуск. Объем водохранилища — 15 млн. куб. м. Площадь зеркала водохранилища при нормальном подпорном уровне — 225 га. Основной целью создания водохранилища являлось регулирование речного стока, а также подпитка нижележащих грунтовых вод. Максимальная высота пло-

тины (рис. 1) — 18 м, длина по гребню — 370 м, ширина гребня — 4 м. Заложение верхового откоса — 1 : 3, низового откоса — 1 : 2,5. На гребне плотины установлен парапет высотой 1 м.

Плотина Рабита Шейх — каменно-земляная с центральным грунтовым ядром и грунтовым зубом, врезанным в проницаемое основание (рис. 1). Максимальная глубина врезки зуба в скальное основание — 14,0 м. Под упорными призмами плотины, на пойме и русловой части, уложен слой малопроницаемого глинистого материала, выполняющего с напорной стороны роль понура при ядре, а за ядром дополнительно увеличивающий путь фильтрации до разгрузки в нижнем бьефе. Между грунтовым ядром и боковыми каменными призмами устроены переходные зоны (двухслойный обратный фильтр).

Донный водовыпуск состоит из водоприемника, магистрального железобетонного водовода, выходного оголовка и камеры ремонтного дискового затвора (затвора Butterfly). Водовод облицован металлом (труба диаметром 1520 мм) и проложен под телом плотины.

Паводковый водосброс траншейного типа выполнен в виде водослива практического профиля, криволинейного в плане быстротока и водобойного колодца. Водосброс расположен в левобережном примыкании плотины.

Борта и ложе водохранилища г/у Рабита Шейх сложены карстующимися глинистыми известняками с прослоями кремней кампанского яруса верхнего мела. Породы залегают субгоризонтально с падением на юго-восток под углом 3 — 5°. Мелкая складчатость практически отсутствует. В обнажении известняков глинистых, слоистых, желтовато-белых, мелоподобных, хрупких, средней прочности, трещиноватых, мощность слоев которых достигает 1 м, с прослоями кремня мощностью 0,2 — 0,4 м, в правобережном примыкании плотины в откосе дороги наблюдаются относительно крупные субвертикальные трещины с азимутом простирания 335°. По этим трещинам наблюдаются ступенчатые сбросы слоев глинистых известняков и кремней с амплитудой 45 — 50 см. Трещины шириной раскрытия до 5 см заполнены глиной трения красноватого и зеленоватого цвета. Выше по течению вади в правобережном склоне на абсолютных отметках порядка 260 м наблюдаются провалы и пещеры глубиной более 2,5 м, размерами в плане около 1,04 x 1,5 м, часто заполненные суглинистым делювием с обломками кремня и известняка. В правом борту небольшого оврага, впадающего в долину вади, на-



блюдаются древние проявления карста, которые косвенно могут иллюстрировать характер карстовых процессов и масштаб полостей в толще глинистых известняков, слагающих днище вади в основании водохранилища и основных сооружений.

На абсолютных отметках 265 м и выше лежит покров делювиально-пролювиальных четвертичных отложений (dpQ), сложенный суглинистым материалом с большим количеством обломков известняка и кремня, причем количество обломочного материала в разрезе увеличивается сверху вниз до 90 – 95% по объему.

Ложе водохранилища покрыто чехлом пойменных и русловых пролювиальных отложений (pQ4) — суглинками красновато-коричневыми с гравием, галькой, щебнем, мелкими валунами (до 20 – 30 см. в поперечнике). Количество обломочного материала вниз по разрезу увеличивается до 90 – 95%. Средняя мощность толщи рыхлых отложений по данным буровых работ на стадии изысканий составила около 8 м, наиболее часто встречающаяся мощность пролювия 3 – 5 м, максимальная — 21 м. Поверхность ложа водохранилища относительно ровная, прорезана руслом шириной 5 – 8 м, глубиной 2 – 3 м.

Гидрологический режим водохранилища характеризуется ежегодной динамикой бьефа. Наполнение водохранилища происходит в процессе зимне-весенних паводков. По окончании паводка водохранилище опорожняется в течение 2 – 3 мес. Такая динамика объясняется тем, что за время эксплуатации гидроузла в ложе водохранилища проявилось большое количество воронок. Воронки являются путями сосредоточенной фильтрации из водохранилища и исключают поддержание проектных уровней воды в водохранилище. Со временем такая нерасчетная фильтрация может привести к размыву основания и береговых примыканий с последующим разрушением плотины.

В пределах водохранилища обследованы и описаны 34 эрозионно-карстовые воронки (одна из них в нижнем бьефе), максимальная глубина которых достигает 15 м, а диаметр — 30 м. Первые сведения об эрозионно-карстовых воронках появились в 1993 г. в связи с началом строительства гидроузла (было обнаружено 5 воронок). Дальнейшие наблюдения показали, что новые воронки появлялись в акватории водохранилища практически ежегодно после прохода паводка. Наблюдаемые карстовые воронки относятся к эрозионному типу и имеют во всей области распространения сходное строение. Например воронка 15 имеет вертикальные стенки, в откосах — сверху вниз: суглинок красно-коричневый с редкими,

мелкими обломками — 2,5 м, щебень, галька, гравий с суглинистым заполнителем до 10% — 2,5 м, известняк массивный, мучнистый, желто-белый, слабо трещиноватый — 4,0 м, ниже — оплывшие пологие формы, сходящиеся к центру из переотложенного суглинка.

Все без исключения воронки в верхнем бьефе находятся в пределах водохранилища. Процесс формирования воронки предположительно проходит таким образом: воронка зарождается на участке повышенной фильтрации четвертичных отложений, совпавшим с зоной ослабленных сильнотрещиноватых и закарстованных известняков. Далее происходит увеличение скорости вертикальной фильтрации и размыв “защитного” суглинистого чехла. Формирование карстового канала и вынос туда рыхлого материала сопровождается интенсивными эрозионными процессами в самих известняках. Существенную роль в этих процессах очевидно играет наличие большого количества крепкого щебня и дресвы кремня в пролювиальных отложениях. Развитие воронки завершается при понижении уровня воды частичным обрушением стенок и формированием дна воронки.

Большинство воронок имеют практически круглую форму в плане, вертикальные стенки на высоту 2 — 3 и более метров и оплывшее конусовидное дно. Вокруг них формируются трещины оседания серповидной формы.

Что касается фильтрационного режима в теле и основании плотины Рабита Шейх, то, по-видимому, вода из водохранилища уходит в основном в толщу карстовых известняков основания. Вода фильтрует сквозь делювиально-пролювиальные отложения в нижележащие известняки, которые имеют несколько систем крутопадающих трещин и субгоризонтальные трещины напластования. По этим трещинам фильтрационный поток стремится как в сторону дрена, то есть в сторону долины Оронта, так и вниз, к субпостоянному горизонту подземных вод, обнаруженному на глубинах порядка 50 — 80 м. Фильтрации через ядро плотины не происходит из-за малого времени стояния воды в водохранилище, при этом происходит лишь незначительное намокание понура и ядра плотины. Такое состояние подтверждается и пьезометрами, установленными в низовой призме и основании и остающимися на протяжении всего срока эксплуатации сухими.

Наиболее опасной, определяющей предаварийное состояние плотины, явилась деформация бермы у левобережного примыкания с отметкой 253,0 м в виде провальной воронки 1 (рис. 2) размером 6,3 м перпендикулярно оси плотины и 8,3 м вдоль оси и



**Рис. 2.** Воронки на берме отм. 253,2 и в ложе водохранилища глубиной около трех метров. В воронке наблюдалось обнажение переходной зоны и понура плотины. Данная воронка возникла в месте примыкания понура к основанию на отметке 250,0 м.

Зафиксированы просадки и трещины плит крепления у водосливной части паводкового водосброса. Максимальная величина просадки плит зафиксирована у устоя — обтекателя водосброса и составила 16 см. Раскрытие трещин достигло 3 см.

На основе анализа приведенных данных обследования гидроузла состояние плотины и левобережного примыкания оценивается как предаварийное. Необходимо принятие срочных мер по обеспечению безопасности гидроузла.

Для уточнения свойств основания плотины и выработки технического решения, обеспечивающего безопасность плотины при заполненном водохранилище, проведены дополнительные исследования пород основания геофизическими методами (рис. на цветной вкладке). Исследования выполнены специалистами «Центра службы геодинамических наблюдений в электроэнергетической области» к.т.н. О.В. Козловым и инженером-геофизиком В.А. Артемьевым.

В задачи геофизических исследований входило: уточнение генезиса воронок, картирование зон их предполагаемого развития, оценка мощности четвертичных отложений и поиск разуплотненных зон в верхней части скального массива.

Поставленные задачи были решены с использованием комплекса геофизических методов. В его состав вошли электропрофилирование, электротондирование (ВЭЗ), сеймопрофилирование, сейсмокаротаж и межскважинная сейсмотомография. Применение геофизических методов продиктовано необходимостью в сжатые сроки обследовать значительную территорию — при минимальном объеме бурения получить информацию о строении полускального массива на глубинах до 30 — 50 м.

Результаты геофизических исследований позволили установить (рис. на цветной вкладке), что в основании плотины и в ложе водохранилища на различных глубинах существуют аномальные зоны. В результате анализа геофизических изысканий были сделаны выводы, что локальные аномалии повышенного сопротивления можно рассматривать как потенциально опасные участки, где благодаря повышенной пустотности известняков смогут развиваться интенсивные фильтрационные процессы.

По представленным данным обследования любые локальные мероприятия (защитные приплотинные экраны, укрепительная и противоточная цементация, «стены в грунте» и др.) не смогут препятствовать дальнейшему развитию карстовых процессов в ложе водохранилища, но, в принципе, могут способствовать сохранности самого подпорного сооружения.

В связи с приближением паводка 2003 — 2004 гг. совместно с дирекцией бассейна Оронт и службой эксплуатации было принято решение об оперативной разработке проекта и реализации мероприятий по обеспечению безопасности плотины при пропуске паводка 2003 — 2004 гг.

В конце 2003 г. ОАО «НИИЭС» был выпущен проект «Реконструкция плотины Рабита Шейх. Пропуск паводка 2003 — 2004 гг.». Целью проекта являлось снижение гидростатической нагрузки на плотину и основание путем понижения отметки порога водослива паводкового водосброса и укрепления выявленных потенциально опасных зон основания путем их цементации. Выбор отметки порога водослива был обоснован расчетами параметров волны прорыва и зоны затопления в нижнем бьефе при возможной аварии плотины. Было показано, что при пропуске расхода 10%-ой обеспеченности (и соответствующем объеме водохранилища)

возможное разрушение плотины не приведет к опасному затоплению населенных пунктов в нижнем бьефе и гибели людей.

Реконструкция плотины Рабита Шейх для пропуска паводка 2003 – 2004 гг. предусматривает проведение следующих работ, выполняемых в три этапа:

разработка котлована подводящего канала к водосбросу, включая выемку грунта и разборку части бетонной стены водослива паводкового водосброса;

крепление откосов и дна подводящего канала камнем;

гидроопробование и цементация с бермы верхового откоса опасных зон в основании плотины (рис. 1. Работы I-ой очереди).

До наступления паводка были выполнены полностью I этап, II этап и часть III этапа — 7 скважин I-ой очереди первого ряда. Кроме того, разработана и реализована технология «залечивания» воронки 1, образовавшейся на берме верхового откоса в левобережном примыкании плотины.

Технология «залечивания» воронки включает:

заполнение полости (воронки) литым бетоном;

цементация зоны вокруг полости (воронки) цементно-песчаным раствором.

Указанные работы повысили надежность и безопасность плотины. Успешно пропущены паводки 2003 – 2004 и 2004 – 2005 гг, а на участке плотины, где выполнена часть проекта «Проект пропуска паводка 2003 – 2004», до настоящего периода образование новых воронок не наблюдается, что говорит об эффективности предложенного мероприятия.

Для обеспечения дальнейшей безопасной эксплуатации плотины ОАО «НИИЭС» был выпущен «Проект реконструкции плотины. Обоснование инвестиций». Продолжение реконструкции плотины Рабита Шейх предусматривает обеспечение надежности и безопасности плотины при проектных нагрузках. Но этот проект не предусматривает поддержание (сохранение) уровня воды в пределах отм. НПУ.

Проектом предусмотрено (рис. 1): выполнение цементационной завесы в основании и бортах плотины глубиной 40 м; продление понура ядра плотины в сторону верхнего бьефа и устройство в начале понура зуба, а также укрепительная цементация в основании понура на глубину 10-15 м.

Представленные в проекте мероприятия должны укрепить основание и бортовые примыкания плотины, а также снизить воздействие воды (фильтрационные нагрузки), являющиеся главной причиной образования воронок.

Работы предусмотрено выполнить в 2 этапа:  
 выполнение цементационной завесы в основании и в береговых примыканиях плотины;  
 продление понура, выполнение с него укрепительной цементации и защита его от размыва креплением камнем.

Как альтернативный вариант рассматривалось создание вместо цементационной завесы «стены в грунте».

Для оценки эффективности предложенного мероприятия проведено численное моделирование фильтрационного режима. На пойменном участке плотина имеет практически постоянный профиль. Поэтому фильтрационные расчеты проводились для плоских моделей области фильтрации. Кроме того, быстро меняющийся уровень водохранилища исключает возможность формирования обходного потока фильтрации в бортовых примыканиях.

Выполнена оценка фильтрационного режима плотины и основания для фактического профиля плотины и для профиля с предложенными проектом мероприятиями по обеспечению безопасной эксплуатации плотины при основном сочетании нагрузок.

В данной работе приводятся результаты моделирования фильтрационного режима грунтовой плотины с помощью программы Visual MODFLOW (Waterloo Hydrogeologic).

В основу программы MODFLOW [1] положен основной закон фильтрации (закон Дарси).

$$v = -k \frac{dh}{ds}, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент фильтрации;  $h$  — напор;  $s$  — расстояние.

Моделирование сводится к решению дифференциального уравнения неразрывности потока, выведенного на основе закона Дарси:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (2)$$

где  $K_x$ ,  $K_y$  — величина коэффициента фильтрации вдоль координатных осей  $x$ ,  $y$ ;  $W$  — внешний поток (показывает источник и/или сток);  $S_s$  — коэффициент упругой емкости (отдачи) пласта породы;  $t$  — время.

Решение уравнения движения потока грунтовых вод в конечно-разностной форме следует из применения уравнения неразрывности: сумма всех потоков в конце выхода из ячейки должна быть рав-

на изменению скорости в пределах объема ячейки. При этом уравнение неразрывности выражает баланс потока для каждой ячейки

$$\sum Q_i = SS^{\Delta h} \Delta t, \quad (3)$$

где  $Q_i$  — расход потока в ячейке;  $S_s$  — введен для обозначения удельной упругой емкости в конечно-разностной формулировке; его значение эквивалентно  $S_s$  в уравнении (2). Это объем воды, который может быть введен в единицу объема материала водоносного слоя на единицу изменения напора;  $\Delta V$  — объем ячейки;  $\Delta h$  — изменение напора за промежуток времени продолжительностью  $\Delta t$ .

Для решения поставленных перед моделированием задач были разработаны две двухмерные геофильтрационные модели плотины и ее основания. Первая модель разработана для фактического состояния, а вторая модель — с учетом предложенных проектом мероприятий.

При разработке моделей принят типичный профиль плотины, соответствующий пойменному участку створа плотины (рис. 3). При назначении характеристик грунтов использованы данные проекта гидроузла Рабита Шейх, геофизических исследований и данные гидроопробования цементационных скважин, проведенного в 2003 — 2004 гг.:

противофильтрационный элемент в виде центрального ядра с зубом и понурной частью  $K_{\phi} = 0,0003$  м/сут.;

упорные призмы  $K_{\phi} = 1000$  м/сут.;

аллювиальные суглинки,  $K_{\phi} = 0,3$  м/сут.;

выветрелый известняк,  $K_{\phi} = 4,67$  м/сут.;

трещиноватый глинистый известняк,  $K_{\phi} = 0,507$  м/сут.;

глинистый известняк,  $K_{\phi} = 0,09$  м/сут.;

карстовый известняк  $K_{\phi} = 8,64$  м/сут.;

укрепительная цементация и цементационная завеса —  $0,0013$  м/сут.

Все грунты, слагающие тело и основание плотины, приняты изотропными.

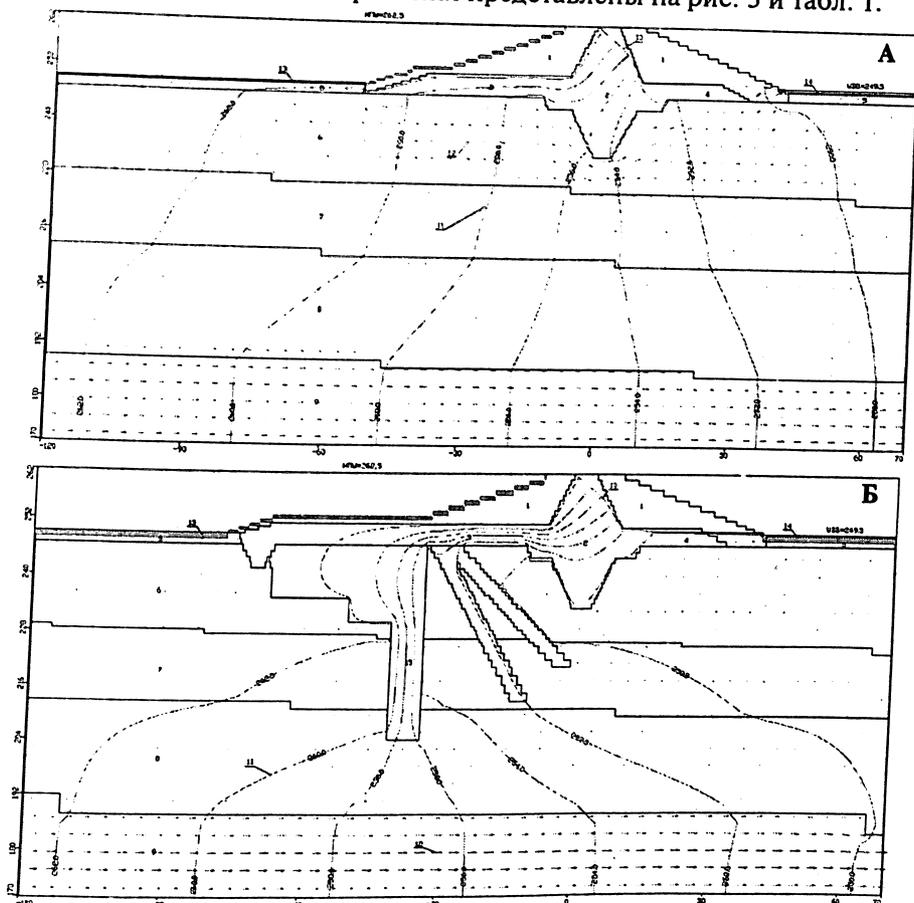
Для всех моделей решалась стационарная задача фильтрации.

Граничные условия фильтрации для моделей заданы согласно проектным данным:

на контуре питания — в виде постоянного максимального напора в верхнем бьефе, равного НПУ (262,5 м);

на контуре стока — в виде постоянного напора, соответствующего проектному уровню нижнего бьефа (249,0 м).

Результаты моделирования представлены на рис. 3 и табл. 1.



**Рис. 3.** Геофильтрационная модель плотины Рабита Шейх: А — для фактического профиля; Б — для профиля с проектным вариантом: 1 — упорные призмы из каменной наброски; 2 — глинистое ядро; 3 — понур ядра; 4 — противофильтрационный элемент с низовой стороны ядра; 5 — аллювиальные суглинки; 6 — выветрелый известняк; 7 — глинистый известняк; 8 — трещиноватый глинистый известняк; 9 — карстовый известняк; 10 — депрессионная поверхность; 11 — эквипотенциаль; 12 — вектор направления скорости; 13 — контур питания; 14 — контур стока; 15 — зона цементации.

Представленные данные моделирования для фактических условий показывают, что основной фильтрационный поток (95% всего расхода) фильтрует через слой выветрелого известняка и через карстовый известняк (слои с наибольшим коэффициентом

Таблица 1

		Градиент напора		Скорость, м/сут.		Расход, м <sup>3</sup> /сут.	
		Фактическое состояние	После реконструкции	Фактическое состояние	После реконструкции	Фактическое состояние	После реконструкции
Тело плотины	Глинистый экран	1.0714	2.8571	0.00075	0.002	-	-
	Ядро плотины	0.4192	0.2662	0.0002935	0.0001864	0.008	0.005
Основание плотины	Укрепительная цементация и цементационная завеса	-	1.1538	-	0.0015	-	-
	Выветрелый известняк	0.2161	0.0054	1.0092055	0.0250678	8.003	0.185
	Глинистый известняк	0.1469	0.0452	0.0740533	0.0227763	1.056	0.338
	Трещиноватый глинистый известняк	0.0968	0.0708	0.0096801	0.0070755	0.23	0.165
	Карстовый известняк	0.0701	0.0676	0.6055077	0.5844731	10.554	10.427

**Примечание [2, 3]:** критический градиент на цементационной завесе ( $I_{cr} = 15$ ), критический градиент на понуре ( $I_{cr} = 12$ ), критический градиент на ядре ( $I_{cr} = 12$ ), осредненный критический градиент напора в основании ( $I_{cr} = 1,125$ ).

том фильтрации), где наблюдаются максимальные скорости фильтрации. Значение градиентов напора во всех слоях основания и тела плотины меньше критических [2, 3].

Данные результатов моделирования при проектных мероприятиях показывают, что большая часть фильтрационного потока сосредоточена в слое карстового известняка (94% всего расхода). Значения градиентов напора в теле и основании не превышают критические [2, 3].

Сравнение данных результатов моделирования (рис. 3 и табл. 1) показывает, что предложенное мероприятие значительно снижает значение пьезометрических напоров, градиентов напора и скорости фильтрации в верхних двух слоях основания (выветрелый известняк и глинистый известняк). При

этом практически в два раза увеличился градиент напора на понур ядра плотины. Значения характеристик фильтрационного потока в двух нижних слоях основания (трещиноватый глинистый известняк и карстовый известняк) остаются практически неизменными. Практически в два раза снизился расход через створ плотины.

#### **Выводы**

Недостаточный объем изысканий на стадии проекта, не позволивший выявить потенциальную опасность эрозии карстующихся пород основания, является основной причиной аварийного состояния плотины Рабита Шейх.

Дальнейшая эксплуатация плотины Рабита Шейх в условиях интенсивной эрозии карстующихся пород основания невозможна без разработки комплекса специальных мероприятий.

Для обеспечения безопасной эксплуатации плотины необходимо снизить воздействие фильтрационного потока на основание плотины (увеличение длины понура ядра и противофильтрационная завеса в основании) и укрепить основание (укрепительная цементация под понуром и цементационная завеса в основании).

Выполненные фильтрационные расчеты подтверждают эффективность предложенных мероприятий.

Предложенные мероприятия направлены на обеспечение безопасности плотины, но не обеспечивают поддержание уровня воды в водохранилище в течение года.

На участке плотины, где выполнена часть проекта «Проект пропуска паводка 2003 – 2004», до настоящего периода образование новых воронок не наблюдается, что говорит об эффективности предложенного мероприятия.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Visual MODFLOW v.4.0. User's Manual. For Professional Applications in Three-Dimensional Groundwater Flow and Contaminant Transport Modeling. Waterloo Hydrogeologic Inc. 2004.
2. СНиП 2.06.05-84\*. «Плотины из грунтовых материалов». Госстрой СССР. 1985.
3. СНиП 2.02.02-85\* «Основания гидротехнических сооружений». М.: 2004.

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ГЭС С УЧЕТОМ ОПЫТА ВОТКИНСКОЙ ГЭС

*Фисенко В.Ф., инженер, Деев А.П. (Воткинская ГЭС)*

При проектировании гидроэлектростанций большое внимание должно уделяться организации натуральных наблюдений. Проект организации натуральных наблюдений разрабатывается генпроектировщиком согласно ПТЭ [7, 8], СНиП [9, 10] при проектировании гидросооружений. При строительстве устанавливается значительная часть контрольно-измерительной аппаратуры. В проекте организации натуральных наблюдений определяется частота и периодичность наблюдений, а также критериальные значения диагностических показателей (ранее назывались предельно допустимые значения).

В процессе эксплуатации организация и состав натуральных наблюдений подлежат уточнению. Выявляются проблемные зоны сооружений, уточняются проектные предположения и математические модели объекта. На примере Воткинской ГЭС в данной статье рассмотрена организация натуральных наблюдений и мероприятия по ее улучшению с учетом опыта эксплуатации.

Воткинский гидроузел на р. Каме, возведенный для целей энергетики и судоходства, расположен в среднем течении реки в 366 км ниже Камской ГЭС и в 68 км выше г. Сарапула. Водохранилище гидроузла осуществляет сезонное регулирование стока; ГЭС, работая в энергосистеме, осуществляет суточное регулирование, участвует в покрытии пиков графиков нагрузки, несет аварийный и нагрузочный резервы энергосистемы.

Воткинская ГЭС сооружена в 1955-65 гг. В постоянную эксплуатацию гидроузел принят в 1966 г. В состав его сооружений входят: здание гидроэлектростанции руслового типа, бетонная водосливная плотина (пустотелая, контрфорсная), одноступенчатый двухниточный судоходный шлюз, русловая земляная плотина №1, правобережная пойменная земляная плотина №2, левобережная пойменная земляная плотина №3, левобережная пойменная земляная плотина №4.

Длина напорного фронта гидроузла 5370 м, в том числе по бетонным сооружениям — 670 м.

Установленная мощность ГЭС — 1020 МВт.

Среднемноголетняя выработка электроэнергии — 2280 млн.кВт час.

Максимальный напор 23,0 м.

Объем Воткинского водохранилища: полный — 9,36 км<sup>3</sup>, полезный — 3,7 км<sup>3</sup>.

Класс капитальности ГЭС Воткинского гидроузла — II. Максимальный естественный расход воды обеспеченностью 0,1% — 19450 м<sup>3</sup>/с.

Максимальная пропускная способность гидроузла при НПУ — 19984 м<sup>3</sup>/с.

### **Проблемы, возникающие при эксплуатации земляных плотин Воткинской ГЭС**

На Воткинской ГЭС положение депрессионных поверхностей в теле земляных плотин установилось ниже проектных предположений, за исключением проблемного участка плотины №2. Также меньше проектной величина эпюры фильтрационного противодавления под основаниями водосливной плотины и здания ГЭС. Вопреки проектным предположениям напряжения в арматурных динамометрах анкерной плиты не растягивающие, а сжимающие. Внеснные при строительстве изменения в проект дренажа земляной плотины №2 стали одной из причин нарушения его работы. По проекту было предусмотрено два водовыпуска на ПК 42+95 и ПК 40+65. Однако в процессе строительства был выполнен только один водовыпуск на ПК 40+65. Следует отметить, что плотина №2 самая протяженная из земляных плотин — 1840 м — и расположена над старым руслом Камы. Поэтому сооружение одного водовыпуска должно было породить проблемы в эксплуатации, и они начали возникать сразу же после строительства. Весной 1964 г. в пределах ПК 41+45 — ПК 43+45 появились грифоны разгрузки фильтрационных вод в нижнем бьефе за плотиной, что свидетельствовало о наличии напорных вод в основании плотины и нижнем бьефе. После бурения разгрузочных скважин грифоны исчезли. Ниже началось заболачивание поймы. С октября 2001 г. стал наблюдаться выход фильтрационных вод на пойме ниже плотины в районе ПК 42+62 (напротив колодца СК-3, где планировался водовыпуск).

В 2002 г. заболоченность территории увеличилась: при осмотре было зафиксировано повышение уровня воды в колодце СК-3. Было решено устроить дополнительные разгрузочные скважины. В августе 2003 г. скважины были сооружены, зона заболачивания уменьшилась. Однако в сентябре этого же года были зафиксированы выходы фильтрационных вод в районе СК-3 на участке 80 м

по обе стороны, от подошвы низового откоса до дренажного лотка. Было решено до наступления зимы устроить самоизливающий отвод из колодца СК-3 в дренажный лоток и пригрузить песчано-гравийным грунтом обводненный участок с целью недопущения промерзания. К 15.11.03 эти работы были выполнены.

При сооружении водовыпуска из дренажа земляной плотины вместо отводящей канавы длиной 400 м с укрепленными откосами была вырыта траншея для отвода воды из дренажа в нижний бьеф. Эта траншея к концу 70-х годов превратилась в овраг глубиной до 7 м и шириной более 50 м, который угрожал подмыву низового откоса плотины. Для предотвращения развития этого процесса был запроектирован и построен коллектор водоотвода длиной 450 м, а овраг отсечен от нижнего бьефа перемычкой. Образовался водоем, который в настоящее время является приемником фильтрационных вод основания и тела плотины и облегчает условия работы дренажа низового откоса на участке просадки дренажа между СКО-4 и СК-5. Водоем связан с нижним бьефом трубопроводом, врезанным в коллектор водоотвода. При превышении уровня водоема отметки водосбросного отверстия в колодце происходит перелив воды из водоема в колодец и коллектор, далее в нижний бьеф.

С начала эксплуатации наблюдения за расходом дренажа плотины №2 ведутся по единственному водовыпуску на ПК 40+65, исходящему из колодца СК-4. В настоящее время измерения ведутся по мерному водосливу, установленному на выходе коллектора в нижний бьеф. Измерения по данному водовыпуску позволяют судить о характере фильтрации как через тело плотины, так и фильтрации под основанием вод, выходящих на поверхность, так как в этот водовыпуск притекает поток и от дренажа земляной плотины №2 и из зоны заболоченности пойменного участка ниже плотины. Для получения данных о работе дренажа на этом проблемном участке был установлен дополнительный пьезометр в теле плотины на отметке 80,00 м ПК 42 (напротив колодца СК-3) и рядом с неработающим пьезометром П-25 (на отметке 80,00 м ПК 43+45 створ 4) установлен также дополнительный пьезометр.

Осенью 1964 г. были обнаружены небольшие просадки грунта на ПК 39+30 над дренажем, и в плитах крепления откоса появились трещины. Весной 1965 г. просадки грунта увеличились, одна из плит крепления обрушилась, на других трещины увеличились до 2 см, дренажный коллектор был занесен песком на 20% сечения. В 1965 г. был произведен ремонт коллектора с перекладкой

труб. До 1978 г. занесения песком дренажного коллектора не наблюдалось. В 1978 г. при осмотре колодцев дренажа в трубе, подходящей к СКО-4, было 40 см песка. В 1980 г. на дренажном коллекторе между СК-5 и СК-5а наблюдались места просадки грунта.

В 1985 г. был произведен ремонт участка дренажа на ПК 39+14 — ПК 39+26 с извлечением 4-х секций коллектора, очисткой от наносов, подсыпкой основания и последующей укладкой секций коллектора. Однако уже в 1986 г. при осмотре дренажа было отмечено, что в трубе, подходящей к СК-4а, песка 50 см и «идет постоянный вынос песка». В настоящее время процесс просадки дренажного коллектора не остановлен, трубы в районе ПК 39+45 заполнены песком на 90%.

Для объяснения причины появления этого дефекта рассмотрим конструкцию дренажа низового откоса плотины №2 по данным проекта, по исполнительной документации и по документации выполнявшихся ремонтных работ.

Дренажный трубопровод закрытого и открытого дренажа низового откоса плотины №2 выполнен из асбоцементных труб  $d_{\text{вн}} = 0,96$  м в двухслойной фильтровой обсыпке. Фильтры, сопрягающие водоприемные отверстия труб с грунтами основания и тела плотины, выполнены из мелкого гравия крупностью 5 — 15 мм и крупного песка. Согласно исполнительной документации дренажная труба укладывалась на первый слой обратного фильтра (крупный песок), а второй слой обратного фильтра из гравия заполнял пазухи сбоку дренажной трубы и защищал только боковую и верхнюю части коллектора. При проведении ремонта отмечалось, что в местах вскрытия дренажа под трубами находился черный илистый грунт. Такая конструкция и исполнение привели к возникновению суффозии окружающего грунта в полость коллектора в условиях разгрузки в дренаж напорных вод основания сооружения. Гидравлические градиенты в нижней части дренажного коллектора достигают значительных величин. Максимальное значение градиента напора  $J=1,23$ , что превышает критический градиент напора для тела и основания плотины из песка, рекомендованный в СНиП 2.06.05-84\* [11] «Плотины из грунтовых материалов» и равный 0,75.

Анализ графика изменения максимальной годовой отметки уровня воды в пьезометре П-11 показывает снижение максимальной годовой отметки уровня воды до 1989 г. и стабилизацию отметок после 1992 г. до настоящего времени в районе 75,00, что ниже отметок, наблюдаемых до 1987 г.

Поведение уровня в пьезометре П-11 подтверждает предположение, что несмотря на то что дренажный коллектор на участке ПК 38 – ПК 40 почти полностью закольматирован, фильтрационный режим плотины на этом участке стабильный, не приводящий к угрозе безопасности плотины. Часть профильтровавшейся воды просачивается через закольматированный участок дренажа и стекает в колодец СК-4, далее в водовыпуск и по коллектору в нижний бьеф; большая же часть фильтрационных вод, преодолев водораздел в коллекторе на ПК 36+65 (СК-6), скатывается в дренаж земляной плотины №1 и через водовыпуск в нижний бьеф. Для повышения уровня безопасности земляной плотины №2 был выполнен проект шунтирующего дренажа на участке ПК 38+65 – ПК 40+65 (между колодцами СК-5 и СК-4). Уклон выполнен в СК-4. Если в дальнейшем фильтрационный режим плотины на этом участке изменится, уровень фильтрационных вод поднимется до шунтирующего дренажа, профильтровавшаяся вода будет собираться в трубах шунтирующего коллектора и стекать в СК-4.

Отсутствие предполагаемого подпора нижнего бьефа со стороны Нижнекамской ГЭС вызвало нарушения крепления нижнего бьефа Воткинской ГЭС и усилило русловые процессы. По опыту эксплуатации ГТС Воткинской ГЭС и по рекомендациям привлекаемых научно-исследовательских организаций, после согласований с проектировщиком, в организацию природных наблюдений вносились необходимые изменения.

Появление проблемных зон на сооружениях требует дополнительных визуальных наблюдений, установку дополнительной контрольно-измерительной аппаратуры, назначение дополнительных диагностических показателей и их критериальных значений. Так: на земляной плотине №2 в проблемной зоне устанавливались дополнительные пьезометры; на выходах дренажей плотины №4 и общем водовыпуске с пойменного участка плотины №2 установлены мерные водосливы; на образовавшихся трещинах бетона бычков водосливной плотины установлены двухосные щелемеры.

По результатам наблюдений по дополнительным контрольно-измерительным приборам составлены математические модели и разработаны критерии безопасности.

Разработка современных средств контроля состояния гидросооружений тоже вносит свои изменения в организацию природных наблюдений. На Воткинской ГЭС установлена Си-

стема автоматического контроля (САК) фильтрационного противодействия в основании здания ГЭС. Данная САК, созданная на базе датчиков давления ПДС-3 и микропроцессорного терминала, в автоматическом режиме собирает данные о противодействии и передает их в информационно-диагностическую систему контроля ГЭС. Ведутся работы по внедрению САК фильтрационного противодействия в основании водосливной плотины и САК взаимных смещений секций бетонных сооружений.

### **Разработка критериев безопасности ГЭС Воткинской ГЭС**

Развитие нормативной и научной базы обеспечения безопасности гидротехнических сооружений также требует пересмотра выбранных диагностических показателей и пересмотра их критериальных значений. На Воткинской ГЭС такая работа в процессе эксплуатации проводилась трижды.

В 1977 г. с привлечением Ленгидропроекта были выполнены работы по определению предельно допустимых показателей состояния напорных сооружений Воткинского гидроузла с использованием данных натурных наблюдений.

В 1996 г. с привлечением ОАО «НИИЭС» была выполнена корректировка номенклатуры и предельно допустимых показателей состояния гидротехнических сооружений Воткинской ГЭС на основе анализа результатов натурных наблюдений. Номенклатура показателей состояния была расширена, значения уточнены на основании корреляционно-регрессионного анализа.

В 2002 г. с привлечением ОАО «НИИЭС» были определены критериальные значения показателей состояния Воткинской ГЭС. Определение критериев было выполнено с учетом требования ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» [1], «Методики определения критериев безопасности гидротехнических сооружений» [3, 6] и на основе анализа данных натурных наблюдений. Были уточнены диагностические показатели и с использованием математических моделей определены два уровня их критериальных значений К1 и К2.

Согласно «Методике определения критериев безопасности ГЭС» в контролируемые показатели входят как количественные показатели состояния ГЭС, измеренные с помощью технических средств, так и качественные показатели, полученные визуальными наблюдениями за гидросооружениями. При назначении качественных диагностических показателей была предпринята попытка

ка формализации обработки результатов визуальных наблюдений. Были назначены качественные диагностические показатели состояния бетонных сооружений и качественные диагностические показатели состояния грунтовых плотин. При назначении качественных критериев была произведена обработка опыта эксплуатации Воткинской ГЭС и других отечественных гидроузлов.

В качестве примера назначения качественных критериев безопасности приводятся виды дефектов земляных плотин, определяемые визуальными наблюдениями.

Критериальные оценки состояния сооружений, ранжируемые как предаварийные К2:

- просадка гребня с разрушением автодорожного полотна;
- разрушение плит крепления верхового откоса с выносом из-под них грунта;
- появление в теле плотины трещин;
- появление влажных пятен на низовом откосе;
- появление ключей и грифонов в основании плотины с выносом грунта;
- промерзание увлажненного участка над дренажом в зимний период.

Критериальные оценки состояния сооружения, ранжируемые как потенциально опасные К1:

- разрушение плит крепления верхового откоса;
- разуплотнение межплитного температурно-осадочного шва;
- локальная просадка гребня;
- появление пятен яркой растительности на откосе;
- увлажнение и заболачиваемость низового клина у подошвы плотины;
- появление просадок грунта на низовом откосе и низовом клине плотины;
- заиливание рабочего сечения трубы дренажного коллектора;
- просадки дренажной призмы;
- разрушение крепления низового откоса русловой плотины.

В последующем при разработке экспертно-диагностической системы управления безопасности ГЭС была проделана дальнейшая формализация результатов визуальных наблюдений и определения на их основе количественной величины уровня безопасности.

### **Системы автоматического контроля состояния ГЭС**

С середины 80-х годов в СССР стали разрабатываться и внедряться автоматические системы контроля состояния гидротехни-

ческих сооружений на основе информационно-компьютерных технологий. В ПТЭ, 15-е издание, (РД 34.20.501-95)[7] появился пункт о необходимости оснащения ответственных гидротехнических сооружений автоматическими системами диагностического контроля (АСДК). Данные системы необходимы «для повышения оперативности и достоверности контроля» за состоянием ГТС. В ныне действующих ПТЭ [8] также присутствует пункт о необходимости АСКД.

На Воткинской ГЭС внедрение АСДК началось с 1994 г. Была приобретена система «Гидрон», разработанная во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. Эта система использовалась в качестве базы данных, наладить опции диагностики в ней не удалось. С 2002 г. внедрена и работает информационно-диагностическая система БИНГ-2, разработанная и адаптированная для Воткинской ГЭС ОАО «НИИЭС». В настоящее время совместно с ОАО «НИИЭС» на Воткинской ГЭС разработана и установлена экспертно-диагностическая система D-2. В функции данной системы входит обработка данных инструментальных и визуальных наблюдений, оценка уровня безопасности гидросооружений и выдача рекомендаций эксплуатационному персоналу по проведению мероприятий, препятствующих снижению уровня безопасности.

Оценка уровня безопасности ГТС в экспертно-диагностической системе D-2 проводится по «Методике оценки уровня безопасности ГТС» [4], утвержденной в качестве стандарта предприятия ОАО «НИИЭС». Под уровнем безопасности, согласно «Методике», принят детерминированный показатель, в обобщенной форме определяющий степень отклонения состояния эксплуатируемого сооружения от положений проекта и требований действующих нормативов. Проводится ранжирование уровня безопасности ГТС, оценок ущерба от аварии или разрушения ГТС, изменения нормативных оценок состояния ГТС.

Количественная оценка уровня безопасности позволяет учесть большое количество качественных и количественных факторов, имеющих разную природу и значимость, разные масштабы. Структура факторов безопасности и схема оценки их влияния приведены на рис.1.

Количественные значения факторов приводятся к масштабу единой шкалы, значения которой изменяются от 0 до 6. Оценке «0» соответствует идеальное исправное состояние сооружения; оценкам до «3» соответствует работоспособное состояние со-

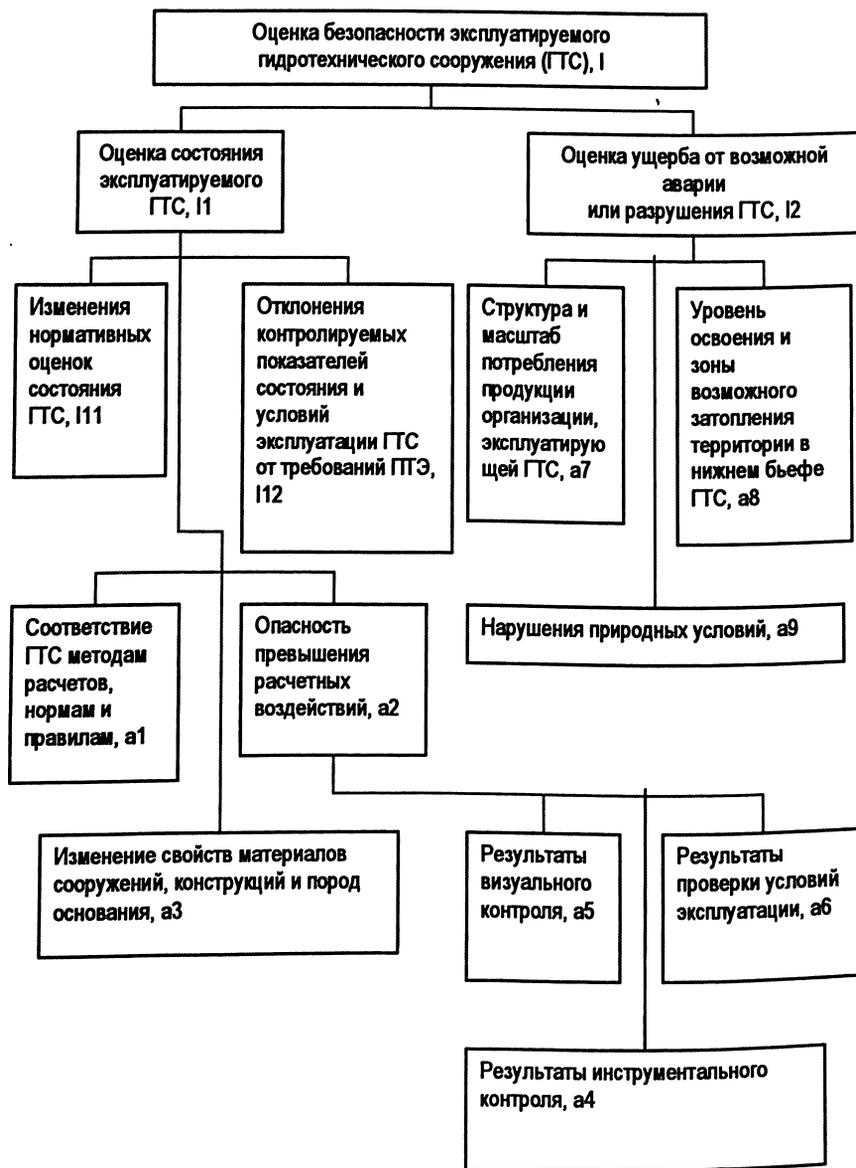


Рис. 1. Структура факторов безопасности и схема оценки их влияния на безопасность эксплуатируемых ГТС

оружения, отвечающее нормативным требованиям по первой и второй группе предельных состояний; оценка свыше «3» и до «5» соответствует состоянию сооружения, отвечающему условиям эксплуатации сооружений при действии особого сочетания нагрузок; при оценке свыше «5» и до «6» сооружения находятся в состоянии несоответствия нормативным требованиям (аварийное состояние).

Из приведенных факторов для оперативной оценки состояния ГТС наиболее важны результаты инструментального контроля (а4) и результаты визуального контроля (а5). В экспертно-диагностической системе D2 на основе учета всех вышеуказанных факторов, а также оперативных данных инструментального и визуального контроля рассчитывается итоговая количественная и качественная оценка уровня безопасности сооружения.

Результаты визуальных наблюдений были ранжированы в той же нормативной шкале, значения которой изменяются от 0 до 6. Подход к назначению количественной величины оценки состояния объекта наблюдения был принят сходным с уже примененным при назначении качественных диагностических показателей состояния сооружения. В качестве примера можно привести оценку состояния водосливной плотины по результатам осмотра:

- понижение уровня заливки шахтных шпонок
- со стороны верхнего бьефа ниже ФПУ -  $2 < I < 3$ ;
- со стороны верхнего бьефа ниже НПУ -  $3 < I < 4$ .

Таким образом, разработаны и введены в систему правила диагностики для всех видов визуальных наблюдений. На рис. 2 приводится правило диагностики при обнаружении дефекта низового откоса земляной плотины.

В системе предусмотрена опция «Комментарии экспертизы», которая выдает рекомендации персоналу по выполнению мероприятий по повышению уровня безопасности сооружения.

Внедрение информационно-диагностической экспертной системы позволит повысить оперативность оценки состояния ГТС, облегчит действия эксплуатационного персонала при нештатных ситуациях, снизит влияние субъективного фактора на безопасность ГТС. Последнее важно в связи с нехваткой квалифицированных гидротехников, имеющих достаточный опыт в проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений в составе эксплуатационного персонала многих гидроузлов.

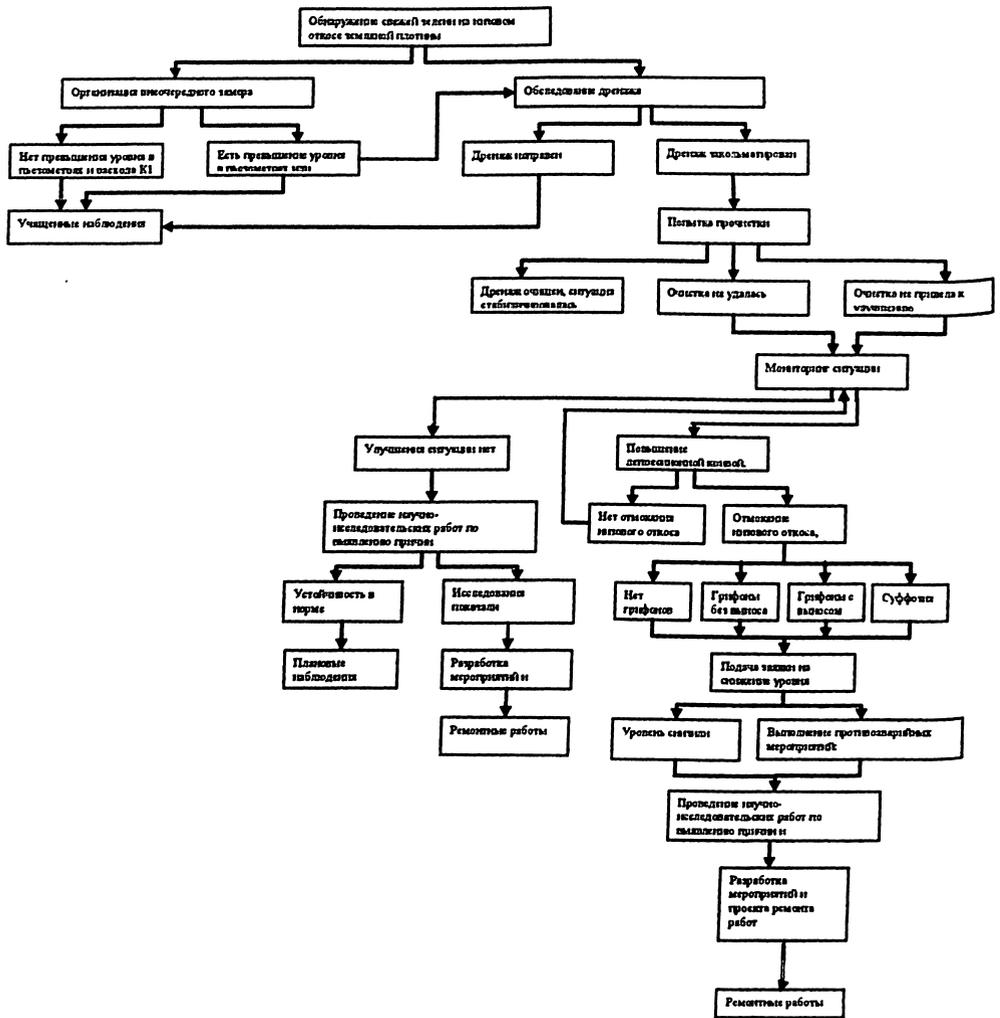


Рис.2. Сценарий развития аварийной ситуации при обнаружении дефекта низового откоса земляной плотины.

### Выводы и рекомендации

Мероприятия по улучшению натуральных наблюдений могут быть выделены в следующие направления:

1. Определение проблемных объектов и зон сооружений.
2. Проведение научно-исследовательских работ по проблемам эксплуатации ГТС.
3. Корректировка с учетом этой программы наблюдений.

4. Установка дополнительной контрольно-измерительной аппаратуры.

5. Разработка программы визуальных наблюдений и правил диагностики.

6. Разработка и периодический пересмотр диагностических показателей и критериев безопасности ГТС.

7. Автоматизация инструментальных наблюдений с целью повышения оперативности диагностики.

8. Разработка и внедрение экспертно-диагностической системы, определяющей уровень безопасности ГТС и дающей рекомендации по его повышению.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений»** (в редакции 21.07.1997 117-ФЗ). Собрание законодательства Российской Федерации. 1997.
2. **Золотов Л.А., Иващенко И.Н., Радкевич Д.Б.** Оперативная количественная оценка уровня безопасности эксплуатируемых гидротехнических сооружений. // Гидротехническое строительство №2. 1997.
3. **Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений.** РД 153-34.2-21.342-00. М.: ОАО «НИИЭС». 2001.
4. **Методика оценки уровня безопасности гидротехнических сооружений.** Стандарт предприятия (СТП НИИЭС). М.: ОАО «НИИЭС». 2004.
5. **Положение о системе отраслевого надзора за безопасностью гидротехнических сооружений электростанций.** РД 34.03.102-94. М.: СПО ОРГРЭС. 1994.
6. **Пособие к «Методике определения критериев безопасности гидротехнических сооружений»** / Под редакцией Иващенко И.Н., Блинова И.Ф. М.: ОАО «НИИЭС». 2004.
7. **Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей.** РД 34.20.501-95. М.: СПО ОРГРЭС. 1996.
8. **Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации.** М.: Энергосервис. 2003.
9. **СНиП 2.06.01-86.** Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования. М.: ЦИТП Госстроя СССР. 1987.
10. **СНиП 33-01-2003.** Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования. М.: ЦИТП Госстроя РФ. 2003.
11. **СНиП 2.06.05-84\*.** Плотины из грунтовых материалов. — М.: ЦИТП Госстроя СССР. 1991.

## ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ЭКРАНА ВЕРХНЕГО ВОДОЕМА ДНЕСТРОВСКОЙ ГАЭС ПРИ ВЫСОКИХ ГРАДИЕНТАХ НАПОРА

*Борткевич С.В., кандидат техн. наук, Воронин С.Г., инженер  
(ОАО «НИИЭС»)*

Ложе верхнего водоема Днестровской ГАЭС, строящейся на Украине, полностью покрывается защитным экраном. Неравномерные деформации основания в местах сопряжения его конструктивных или инженерно-геологических элементов, имеющих различные деформационные характеристики, могут вызывать нарушения сплошности глинистого экрана, наиболее опасными из которых являются сквозные вертикальные трещины. При появлении таких трещин могут резко увеличиваться фильтрационные потери из водоема и возникнет угроза подъема уровня грунтовых вод с нарушением устойчивости склона и нормальной работы сооружения.

Для устранения такой опасности в случае возникновения трещин в глинистых экранах Всесоюзным научно-исследовательским институтом «ВОДГЕО» разработаны специальные мероприятия [1], заключающиеся в следующем:

экран прикрывается сверху защитным песчаным слоем, причем зерновой состав песка обеспечивает возможность самотечного заполнения трещин песком;

экран выполняется с подстилающим и прикрывающим слоями песка.

В первом случае фильтрационный поток, выходя из трещины в экране, свободно фильтрует в слои грунта основания. Во втором — проницаемость грунтов основания не обеспечивает свободного выхода воды из трещины и в ней создается подпор.

Водопроницаемость экрана, защищенного вышеуказанными способами, при повреждении сквозными трещинами характеризуется фиктивным коэффициентом фильтрации  $K_{\phi}$ :

$$K_{\phi} = K_3 \cdot \eta,$$

где:  $K_3$  — коэффициент фильтрации глинистого грунта экрана;  $\eta$  — коэффициент эффективности глинистого экрана с полыми или заполненными песком трещинами.

Степень влияния трещин в экране и их заполнения песчаным грунтом на его эффективность охарактеризованы результатами

методических расчетных исследований, выполненных во ВНИИ «ВОДГЕО» при следующих условиях: экран однослойный с прикрывающим слоем песка; толщина экрана 0,5 м; толщина прикрывающего песчаного слоя 0,5 м; коэффициент фильтрации глинистого грунта экрана  $K_2 = 10^{-8}$  м/с; коэффициент фильтрации песчаного грунта прикрывающего слоя  $K_1 = 10^{-4}$  м/с; напор воды над прикрывающим слоем экрана  $h_b = 10$  м.

Результаты расчетов, выполненные без учета проницаемости тела экрана, показывают, что образование сквозных трещин оказывает существенное влияние на водопроницаемость экрана. При их образовании фиктивный коэффициент фильтрации экрана повышается примерно на два – три порядка по сравнению с коэффициентом фильтрации неповрежденного трещинами экрана. Заполнение трещин песком позволяет существенно снизить их отрицательное влияние, при этом проницаемость поврежденного экрана приблизительно на порядок и менее превышает проницаемость экрана без нарушений.

Другим мероприятием, повышающим эксплуатационную надежность экрана, является применение самокольтатирующихся смесей из глинистых грунтов, песка и щебенистых частиц или увеличение толщины экрана. В этом случае возникающие сквозные трещины под действием воды кольтатируются отслаивающимися со стенок трещин частицами грунта. Однако при пересыхании поверхности глинистого экрана или отдельных слоев отсыпки в нем могут появляться несквозные трещины, которые при наполнении водомойкой водой будут способствовать уменьшению пути фильтрации, то есть повышению градиентов напора, действующих на неповрежденную часть экрана. Для устранения возможного отслаивания глинистого грунта экрана на контакте с трещиноватым основанием и разрушения его выходными градиентами, как правило, устраивают подстилающиеся слои песка или геотекстиля.

Однако остается вопрос, не изменяется ли коэффициент фильтрации глинистого грунта экрана с увеличением градиентов напора и вымывом порового раствора из грунта в процессе фильтрации.

В связи с этим при строительстве экрана верхнего водоема Днестровской ГАЭС был возведен опытный фрагмент из аллювиальных неогеновых суглинков на площади 40 x 80 м в районе пикета 18 + 19. Карьер аллювиальных неогеновых грунтов располагался внутри проектируемого водоема на ПК 19 + 40 по его оси. Грунт укладывался слоями в уплотненном теле по 25 см и укатывался скрепером Д-357 за 6 – 8 проходов по одному следу.

В процессе геотехнического контроля определялось число пластичности глинистых грунтов в карьерах и в уложенных слоях. Из каждого слоя отбирались пробы на плотность-влажность и монолиты для определения коэффициента фильтрации.

По результатам лабораторных исследований число пластичности аллювиальных неогеновых грунтов изменяется в пределах  $J_p = 0,11 \div 0,15$ , т.е. грунты представлены суглинками с влажностью на пределе текучести, в основном  $W_L = 0,34 - 0,36$ . Суглинки уложены с влажностью близкой к оптимальной  $W_{\text{опт}} = 0,22$ . Оперативный контроль качества, рекомендуемый ОАО «НИИЭС», по области, ограниченной предельными значениями плотности-влажности глинистого грунта в уплотненном теле  $S_r = 0,9 \div 1,0$ , показал, что эти критерии в основном были выполнены при укладке неогеновых суглинков. Следовательно, при уплотнении этих грунтов была достигнута диспергационная структура, обеспечивающая их наименьшую водопроницаемость. Образцы грунтов, приготовленные из монолитов, сохраненных для исследований по определению коэффициента фильтрации при высоких градиентах напора 400–600, характеризуются следующими физическими свойствами: влажность грунта ( $W$ ) — 0,189, плотность сухого грунта ( $\rho_d$ ) — 1,73 т/м<sup>3</sup>, коэффициент водонасыщения ( $S_r$ ) — 0,90, влажность на границе текучести ( $W_L$ ), — 0,34, число пластичности ( $J_p$ ) — 0,13.

Известно, что чем меньше пластичность глинистого грунта, тем ниже его фильтрационная прочность, особенно при высоких градиентах напора, и тем большее значение коэффициента фильтрации он имеет, что особенно заметно проявляется в условиях отсутствия внешних нагрузок. В связи с вышеуказанными особенностями малопластичных разностей уплотненных глинистых грунтов их фильтрационные испытания проводили при высоких градиентах напора до 400 — 600 без приложения внешних нагрузок на приборе ПФГ-1, общий вид которого приведен на рис. 1, а схема — на рис. 2.

Для определения коэффициента фильтрации грунтов в приборе ПФГ-1 давление воды на образец грунта создается сжатым воздухом, подаваемым из баллона низкого давления до 3 атм. Устройство для измерения расходов состоит из съёмных пьезометрических трубок (1), металлической линейки с миллиметровой шкалой (2). Внутренний диаметр трубок подбирается в зависимости от ожидаемого порядка величины коэффициента фильтрации. Рабочая камера выполнена разборной, состоящей из рабочего кольца (5), верхней крышки (6) с центральным резьбовым отверстием под штуцер (3) и вентилем (4), нижней



Рис. 1. Общий вид прибора ПФГ-1  
для фильтрационных испытаний глинистых грунтов

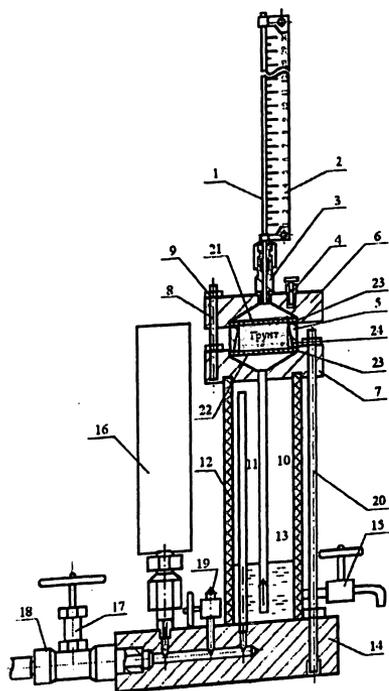


Рис. 2. Схема прибора ПФГ-1  
для фильтрационных испытаний глинистых грунтов

крышки (7) с отверстием для подачи воды под давлением, стяжных болтов (8) с гайками (9) для соединения верхней (6) и нижней (7) крышек, трубки (10) для подачи воды из камеры (12) блока питания. Блок питания включает трубку (11) для подачи воздуха в камеру (12), в которой находится запас воды (13). Камера (12) размещается на основании (14) и крепится болтами (20). Подача воздуха из баллона производится через штуцер (18) и запорный регулировочный вентиль (17). Давление контролируется манометром (16). В рабочей камере размещены верхний (21) и нижний (22) перфорированные диски. Герметизация рабочей камеры осуществляется с помощью кольцевых прокладок (23) из мягкой листовой маслостойкой резины толщиной 1 мм стяжными болтами (8) и (20). Кольцевой конический зазор (24) между боковой поверхностью образца грунта и рабочим кольцом (5) заполняется водонепроницаемой, вязкой, нейтральной по отношению к грунту и металлу консистентной смазкой.

Подготовка к испытанию глинистых грунтов производится в следующей последовательности. С помощью шаблона образец грунта выдавливается из кольца пробоотборника и размещается в рабочем кольце (5). Конусный зазор между боковой поверхностью образца и рабочим кольцом заполняется консистентной смазкой заподлицо с торцом рабочего кольца. На торцевых поверхностях образца размещают металлические сетчатые фильтры. Камеру (12) на 1/3 заполняют водой. Внутри рабочей камеры в нижнюю крышку (7) устанавливают нижний перфорированный диск (22) с уплотнительным кольцом из резины (23). Через штуцер (18) и вентиль (17) в камере (12) создается избыточное давление воздуха, достаточное для подъема воды в нижнюю крышку (7) до уровня, немного превышающего нижний перфорированный диск, после чего перекрывается вентиль подачи воздуха (17). На нижний диск (22) устанавливается рабочее кольцо (5) с металлическими фильтрами. Излишек воды удаляется. Сверху на рабочее кольцо располагают верхний перфорированный диск (21) с уплотнительным кольцом (23) и верхнюю крышку рабочей камеры (6). Верхняя и нижняя крышки стягиваются болтами (8). Через центральное отверстие в верхней крышке при открытом вентиле (4) заливается вода до появления ее на выходе вентиля. Закрепляется пьезометрическая трубка (1), в которой начальный уровень регулируется с помощью вентиля (4).

Проведение испытаний производится в следующем порядке. При закрытых вентилях (15), (19), (4), через вентиль (17) в камеру (12) подается давление 40 – 50 кПа (0,4 – 0,5 кгс/см<sup>2</sup>), соответствующее напорным градиентам в образце 200 – 250. Давление контролируется по манометру (16) после начала поднятия воды в пьезометрической трубке (1) в течение заданного промежутка времени, например  $\Delta t = 10$  мин. Записываются начальный и конечный отсчет. Через вентиль (4) сбрасывают столб жидкости, и измерения повторяют до тех пор, пока не будет достигнут установившийся режим фильтрации. Фильтрация считается установившейся, если в течение трех последовательных равных промежутков времени подъем мениска в пьезометрической трубке будет один и то же. Для построения графика зависимости скорости фильтрации от градиента напора в процессе испытания необходимо получить 3 – 4 экспериментальные точки при различных заданных градиентах, выбор которых производится в соответствии с проницаемостью исследуемого грунта.

Коэффициент фильтрации глинистого грунта рассчитывается в следующей последовательности. Для каждой ступени измеренного манометром давления вычисляется скорость движения жидкости через образец по формуле:

$$V = \frac{S_1}{S} \times \frac{\Delta h}{\Delta t},$$

где:  $S_1$  — площадь пьезометрической трубки, см<sup>2</sup>;  $S = 40$  см<sup>2</sup> — площадь поперечного сечения образца грунта;  $\Delta h$  — приращение перемещения мениска в пьезометрической трубке, см;  $\Delta t$  — интервал наблюдения, сек.

Напорный градиент  $i$  в образце грунта для интервала времени установившейся фильтрации находится по формуле:

$$i = \frac{P_{\text{ман}} - \delta}{0,001H},$$

где:  $P_{\text{ман}}$  — отсчет по манометру, кг/см<sup>2</sup>;  $\delta$  — поправка на противодействие столба жидкости в коммуникациях прибора и пьезометрической трубке, кг/см<sup>2</sup>;  $H$  — длина пути фильтрации, равная высоте образца грунта, см; 0,001 — плотность воды, кг/см<sup>3</sup>.

Поправка  $\delta$  определяется как произведение величины расстояния (в см) от уровня жидкости (13) в камере (12) до уровня жидкости в пьезометрической трубке (1), умноженное на плотность воды.

Значения коэффициента фильтрации  $K_\phi$  и начального градиента фильтрации  $i_0$  определяются следующим образом: по результатам испытаний строится график зависимости скорости фильтрации  $V$  от градиента напора  $i$ :

$$V = K_\phi(i - i_0),$$

Отрезок, отсекаемый прямой графика на оси  $i$ , дает значение начального градиента фильтрации  $i_0$  и угловой коэффициент — значение коэффициента фильтрации  $K_\phi$ .

Аналитически  $K_\phi$  и  $i_0$  рассчитываются по формулам:

$$K_\phi = \frac{n \sum iV - \sum i \sum V}{n \sum i^2 - (\sum i)^2},$$

$$i_0 = \frac{1}{\sum i} \left( \sum i^2 - \frac{\sum i \sum V}{K_\phi} \right),$$

где:  $n$  — количество пар  $i$  и  $V$ ;  $i$  — градиент напора;  $V$  — скорость фильтрации, см/с.

Нормативное значение коэффициента фильтрации дается для температуры окружающей среды  $T = 10^\circ\text{C}$  и находится по формуле:

$$K_{10} = \frac{K_\phi}{0,7 + 0,03T},$$

где:  $K_\phi$  — величина коэффициента фильтрации, см/с;  $T$  — величина температуры в опытах,  $^\circ\text{C}$ .

Фильтрационные испытания грунтов экрана верхнего водоема Днестровской ГАЭС были выполнены по четырем схемам:

фильтрация дистиллированной воды через образец грунта по восходящей ветви градиентов напора;

фильтрация дистиллированной воды через образец грунта по нисходящей ветви градиентов напора;

фильтрация дренажной воды (фильтрата) через образец грунта по восходящей ветви градиентов напора;

фильтрация воды из дренажа склона (фильтрата) через образец грунта по нисходящей ветви градиентов напора.

Обобщенные результаты испытаний коэффициента фильтрации глинистых грунтов малой пластичности при высоких градиентах напора были представлены в виде графиков зависимости скорости фильтрации  $V$  от напорного градиента  $i$  с указанием величины коэффициента фильтрации  $K_\phi$  и плотности-влажности грунтов, а также степени их водонасыщения  $S_r$ .

Было испытано четыре образца.

Для образца №1, характеризующегося плотностью сухого грунта  $1,75 \text{ г/см}^3$  и влажностью  $0,177$ , проведены два испытания с дистиллированной водой по нисходящей ветви градиентов напора (опыт 1 и опыт 4) и два испытания с дистиллированной водой по восходящей ветви градиентов напора (опыт 2 и опыт 5). При этом в опыте 4, до начала исследований зависимости скорости фильтрации от величины напорного градиента, через образец грунта было пропущено в течение 164 часов  $57,094 \text{ см}^3$  воды при градиенте 600, тем самым был выдавлен из пор грунта поровый раствор и полностью замещен дистиллированной водой.

Для образца №2, характеризующегося плотностью сухого грунта  $1,78 \text{ г/см}^3$  и влажностью  $0,177$ , проведены два испытания с фильтратом по нисходящей ветви градиентов напора (опыт 2 и опыт 5) и два испытания с фильтратом по восходящей ветви градиентов напора (опыт 3 и опыт 7). В опыте 5 образец грунта перед началом выдерживался 18 часов при градиенте 427.

Для образца №3, характеризующегося плотностью сухого грунта  $1,70 \text{ г/см}^3$  и влажностью  $0,208$ , проведены испытания по нисходящей ветви градиентов напора с дистиллированной водой (опыт 2) и с фильтратом (опыт 6), а также испытания по восходящей ветви градиентов напора как с дистиллированной водой (опыт 3), так и с фильтратом (опыт 5).

Для образца №4, характеризующегося плотностью сухого грунта  $1,71 \text{ г/см}^3$  и влажностью  $0,196$ , проведены испытания с дистиллированной водой (опыт 2) и с фильтратом (опыт 4), по нисходящей ветви градиентов напора.

Всего было проведено 14 опытов.

Опыты 1 и 2 соответствуют начальной стадии эксперимента, когда при начальных градиентах фильтрации 71 и 92,6 получены коэффициенты фильтрации  $3,5 \times 10^{-9} \text{ см/с}$  и  $3,9 \times 10^{-9} \text{ см/с}$  соответственно по нисходящей (опыт 1) и восходящей (опыт 2) ветвям градиентов напора. При установившемся режиме фильтрации образец был выдержан в течении 8 сут. По объему профильтровавшейся воды рассчитан коэффициент фильтрации, который равен  $4,7 \times 10^{-9} \text{ см/с}$ . Затем проведены повторные измерения, в результате которых получены коэффициенты фильтрации  $2,2 \times 10^{-9} \text{ см/с}$  и  $2,1 \times 10^{-9} \text{ см/с}$  соответственно по нисходящей (опыт 4) и восходящей (опыт 5) ветвям градиентов напора.

Как следует из результатов испытаний, не обнаружено существенной разницы в коэффициенте фильтрации, несмотря на

длительность эксперимента во втором этапе испытания. В то же время необходимо отметить несколько более низкие значения коэффициента фильтрации во втором этапе испытания, которые могут быть объяснены процессом набухания грунта, приводящем к снижению открытой пористости.

Следует обратить внимание на величину начального градиента фильтрации, которая может быть положительная, как в случаях опытов 1, 2, 5, так и отрицательная — опыт 4. Теоретическое объяснение этого вопроса [2] связывается с наличием в грунте осмотического потока, который, как показывают исследования [3], может совпадать с направлением фильтрационного потока либо иметь противоположное направление. В случае, когда осмотический и фильтрационный потоки не совпадают по направлению на оси абсцисс, обнаруживается начальный градиент фильтрации (опыты 1, 2, 5). Если оба потока совпадают по направлению, начальный градиент отсутствует или имеет отрицательную величину (в опыте 4 начальный градиент фильтрации отрицательный равный — 0,8). В проведенных исследованиях вопрос о наличии осмотического потока и его величине не изучался и при интерпретации фильтрационных данных начальный градиент фильтрации был принят равным нулю, что соответствует построению графика из начала координат.

Таким образом, величина коэффициента фильтрации при фильтрации дистиллированной воды через образец грунта составляет от  $2,1 \times 10^{-9}$  до  $3,9 \times 10^{-9}$  см/с. Начальный градиент фильтрации в данном случае принят равным нулю.

Величина коэффициента фильтрации в опытах на образце №2 по восходящей (опыты 3 и 7) и по нисходящей (опыты 2 и 5) ветвям градиентов напора находится в пределах от  $0,8 \times 10^{-9}$  до  $0,92 \times 10^{-9}$  см/с. Получены отрицательные начальные градиенты, что может говорить о совпадении направлений осмотического и фильтрационного потоков. Вероятно в этом находит подтверждение близость состава и концентрации солей в поровом пространстве образца и фильтрующей жидкости.

На образце №3 в начальной стадии эксперимента испытание проводилось с дистиллированной водой по нисходящей (опыт 2) и восходящей (опыт 3) ветвям градиентов напора. Получены коэффициенты фильтрации  $1,09 \times 10^{-9}$  и  $1,32 \times 10^{-9}$  см/с. После смены фильтрующей жидкости с дистиллированной воды на воду из дренажа склона при проведении испытания по восходящей (опыт 5) и нисходящей (опыт 6) ветвям градиентов напора величина коэффициента фильтрации оставалась в пределах  $1,33 + 1,36 \times 10^{-9}$  см/с.

Испытания, проведенные на образце №4 с фильтрацией дистиллированной воды (опыт 2) и воды из дренажа склона (опыт №4), когда оба опыта проведены только по нисходящей ветви градиентов напора, показали практически одинаковые результаты: коэффициент фильтрации составляет  $1,33 + 1,35 \cdot 10^{-9}$  см/с.

Обобщенный анализ изменения фильтрационных характеристик грунтов с различной плотностью сухого грунта от  $1,70$  г/см<sup>3</sup> до  $1,78$  г/см<sup>3</sup> и влажностью от  $0,177$  до  $0,208$  выполнен отдельно для опытов с дистиллированной водой (рис. 3) и с водой из дренажа склона (рис. 4).

Из рис. 3 следует, что при фильтрации через образец дистиллированной воды коэффициент фильтрации изменяется в пределах от  $1,09 \times 10^{-9}$  до  $3,9 \times 10^{-9}$  см/с. Направление изменения градиентов напора не имеет практического значения и не связаны с изменениями коэффициентов фильтрации. Аналогичный вывод следует и из результатов, изображенных на рис. 4, где сведены все испытания, проведенные с водой из дренажа склона. Коэффициент фильтрации изменяется в пределах от  $0,79 \times 10^{-9}$  до  $3,7 \times 10^{-9}$  см/с.

Исходя из полного комплекса приведенных испытаний образцов грунта, среднее значение коэффициента фильтрации  $K_f$  для испытываемого грунта может быть принято  $2,4 \cdot 10^{-9}$  см/с. Для сравнительной оценки величины расходов воды, фильтрующейся через экран площадью  $1$  м<sup>2</sup>, на рис. 5 дан график зависимости расхода воды от величины напорного градиента при значениях коэффициента фильтрации  $5 \cdot 10^{-9}$  см/с и  $1 \cdot 10^{-8}$  см/с. При градиентах фильтрации порядка 200 величина фильтрационного расхода воды через  $1$  м<sup>2</sup> экрана, выполненного из глинистого грунта, составит порядка  $2000$  см<sup>3</sup>/сут. или  $2$  л/сут.

#### Выводы

1. Для обеспечения надежной работы глинистого экрана верхнего водоема Днестровской ГАЭС при проектировании и строительстве следует учитывать факторы возможного увеличения водопроницаемости экрана и градиентов напора в нем в связи с образованием трещин, которые могут возникать в результате неравномерных деформаций основания в местах сопряжения с ним конструктивных и инженерно-геологических элементов с различными деформационными свойствами или в результате пересыхания грунта.

2. Применительно к малопластичным разностям уплотненных глинистых грунтов необходимо фильтрационные испытания проводить при высоких градиентах напора до 400 – 600 без приложения внешних нагрузок. Фильтрационные испытания рекомендуется выполнять на приборе ПФГ-1 или подобного типа.

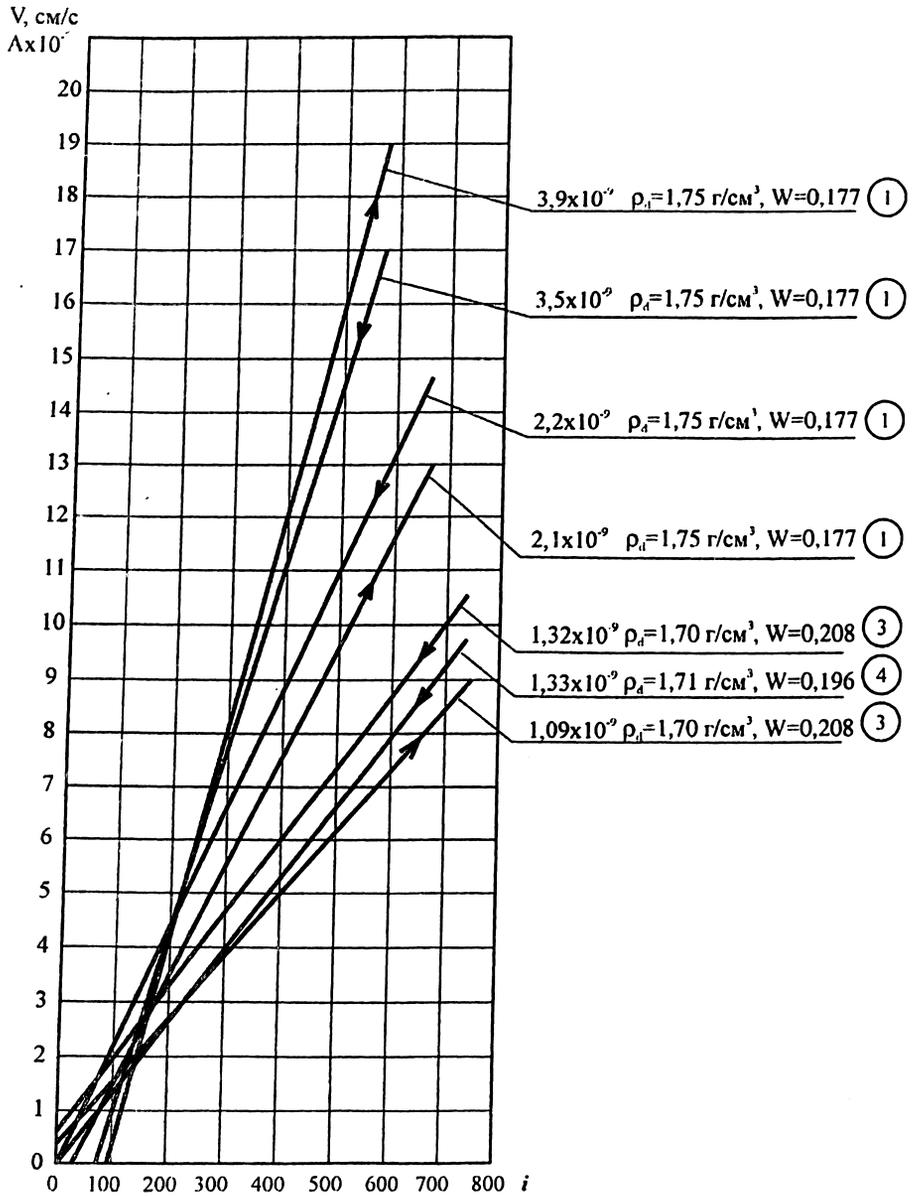


Рис. 3. Обобщенные результаты определения коэффициентов фильтрации суглинков при различной плотности сложения (опыты с дистиллированной водой).

(1), (3) — номера испытываемых образцов грунта; стрелками показаны восходящие и нисходящие ветви градиентов напора

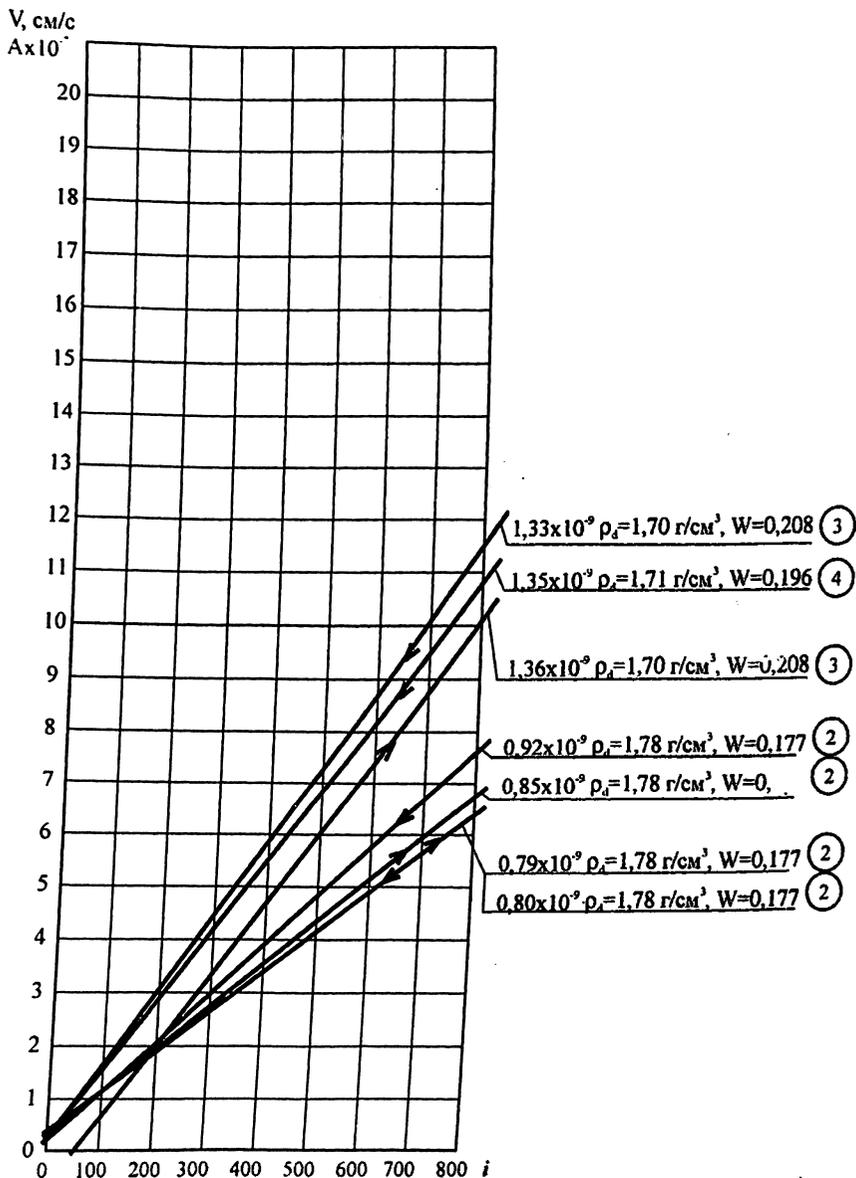


Рис. 4. Обобщенные результаты определения коэффициентов фильтрации суглинков при различной плотности сложения (опыты с водой из дренажа склона)

①, ③ — номера испытываемых образцов грунта; стрелками показаны восходящие и нисходящие ветви градиентов напора

3. Глинистые грунты, уложенные в тело опытного фрагмента противофильтрационного экрана, характеризуются коэффициентом фильтрации  $2,4 \times 10^{-8}$  см/с. В диапазоне изменения плотности сухого грунта от  $1,70$  г/см<sup>3</sup> до  $1,78$  г/см<sup>3</sup> и влажности от  $0,177$  до  $0,208$  величина коэффициента фильтрации при градиентах  $1 + 600$  изменяется от  $0,79 \cdot 10^{-9}$  до  $3,9 \times 10^{-9}$  см/с, что дает основание считать достаточно надежной оценку его фильтрационных характеристик.

4. Начальный градиент фильтрации в проведенных испытаниях обусловлен осмотическими процессами и для практических целей — в запас фильтрационной прочности экрана — его рекомендуется принимать равным нулю.

5. В результате испытаний по восходящей и нисходящим ветвям градиентов напора получены практически одинаковые коэффициенты фильтрации в опытах как с дистиллированной водой, так и с водой из дренажа склона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Недрига В.П., Аликин В.Г. Эффективность грунтовых экранов водохранилищ, располагаемых на подрабатываемых территориях. Строительство водоподпорных сооружений из грунтовых материалов. Сборник научных трудов. М.: изд. ВНИИ «ВОДГЕО». 1983.
2. Кульчицкий Л.И., Габиров Г.Ф., Ткаченко Ю.Г. Определение проницаемости глин. // «Разведка и охрана недр». 10. 1986.
3. Научно-технический отчет по теме: «Исследование водоупорных свойств глинистых грунтов и разработка технологии возведения экрана БСР Зеленчукских ГЭС». Этап 3. Экспериментальные исследования водоупорных свойств глинистых грунтов БСР при высоких градиентах напора и проектном режиме эксплуатации. НПО «ГИТЕСТ». М.: 1993.

## ИТОГИ РАБОТЫ КОНФЕРЕНЦИИ «ГИДРОЭНЕРГЕТИКА. НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ И ТЕХНОЛОГИИ»

(Санкт-Петербург, 7 – 9 декабря 2005 г.)

7 – 9 декабря 2005 г. на базе ОАО «ВНИИГ им. Б.Е.Веденева» и Международного института образовательных программ (ИМОП) при поддержке ОАО «РАО «ЕЭС России», ОАО «Федеральная гидрогенерирующая компания» (ОАО «ГидроОГК»), НП «Гидроэнергетика России» состоялась научно техническая конференция «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии». Основной целью конференции являлись обзор и анализ разработок и научных исследований в гидроэнергетике за последнее десятилетие.

На пленарном заседании были заслушаны доклады Председателя Правления ОАО «РАО «ЕЭС России» А.Б. Чубайса, Председателя правления ОАО «ГидроОГК» В.Ю. Синюгина, директоров и руководителей институтов исследовательского и проектного комплексов, ведущих преподавателей гидротехнических и энергетических вузов России, а также представителей зарубежных энергетических компаний («Электрисите де Франс», «Гидронефть и энергетика» (Норвегия) и т.д.) Работа конференции была разделена на следующие тематические секции:

1. Перспективы развития гидроэнергоресурсов России.
2. Оценка состояния и управление безопасностью гидротехнических сооружений.
3. Перспективные конструктивно-технологические решения и новые технологии при ремонте, техперевооружении и новом строительстве ГЭС.
4. Научное обоснование водохозяйственных и экологических проблем.
5. Гидросиловое оборудование.
6. Научные разработки в области возобновляемых источников энергии.
7. Математическое моделирование и информационные технологии в гидроэнергетике.

На секции было подано заявок более чем на сто докладов по перечисленной тематике. В работе конференции участвовала делегация специалистов ОАО «НИИЭС», выступивших с докладами на секционном заседании. В докладе «Повышение безопасности Саяно-Шушенской ГЭС» (авторы: Родионов В.Б., Куприянов В.П., Толошинов А.В.) приводятся результаты большого комплекса гидравлических исследований и обоснования конструкций водопропускных сооружений Саяно-Шушенской ГЭС. В док-

ладе, кроме результатов исследования дополнительного берегового водосброса, приводятся подтвержденные экспериментально рекомендации по реконструкции существующего эксплуатационного водосброса. Всесторонний анализ условий пропуска паводков через водосброс Саяно-Шушенской ГЭС позволил выявить круг оптимальных мероприятий, выполнение которых обеспечивает безопасность гидроузла и удовлетворяет требованиям современных нормативных документов.

О современных подходах в компьютерном моделировании, создании гидравлических моделей бассейнов рек и водохранилищ с целью оптимизации работы каскадов гидроэлектростанций как в штатных, так и экстремальных ситуациях говорилось в докладе *«Современные методы расчета волн прорыва и экстренных попусков как основа для оценки вероятного вреда при чрезвычайных ситуациях на гидроузлах и их каскадах»* (авторы: Беликов В.В., Прудовский А.М., Родионов В.Б., Третьюхина Е.С., Никитина Н.В.). Выполнены 11 компьютерных моделей гидроузлов, в том числе несколько гидроузлов Волжско-Камского каскада, осуществлены расчеты волн прорыва при различных сценариях аварий, произведены расчеты экстремальных попусков, получены зоны затопления в нижних бьефах и сделана оценка вероятного вреда. На базе собранных материалов возможно создание единой модели всего Волжско-Камского каскада.

В следующем докладе *«Применение численного гидравлического моделирования и ГИС-технологий при проектировании и реконструкции гидротехнических сооружений»* (авторы: Беликов В.В., Прудовский А.М., Родионов В.Б., Комаров В.А., Третьюхина Е.С., Никитина Н.В.) сделан акцент на применение численного моделирования для проектирования и реконструкции различных гидротехнических сооружений. Это вызвано, прежде всего, необходимостью расчетов параметров волны прорыва, определения зон затопления и оценки размеров вероятного вреда от аварии на сооружении на стадии проектирования гидроузла. При физическом моделировании этих процессов необходимы русловые модели большой протяженности и, соответственно, материалоемкости и стоимости.

Другое направление работ, отраженное в докладе, связано с выбором оптимальных параметров гидроузлов при их проектировании с учетом условий влияния других гидротехнических сооружений и ГЭС, если они связаны каскадом, а также с учетом степени урбанизации подтапливаемых территорий.

Конструкция ортогонального гидроагрегата Кислогубской ПЭС рассматривалась в докладе *«Новый ортогональный гидроагрегат для*

*приливных электростанций и низконапорных ГЭС»* (авторы: Историк Б.Л., Усачев И.Н., Шполянский Б.Л.). К конструкции ортогонального гидроагрегата и возможностям его применения на ПЭС и ГЭС уделяется пристальное внимание руководства РАО «ЕЭС России» и ОАО «ГидроОГК». Было принято решение о создании и испытании на Кислогубской ПЭС ортогонального гидроагрегата с диаметром колеса 5 м, имеющего перспективы для применения на Мезенской и Тугурской ПЭС. Использование поперечно-струйных ортогональных турбин на мощных ПЭС и низконапорных ГЭС вместо традиционных осевых турбин позволит значительно улучшить удельные показатели этих объектов, а также сделать их строительством экономически обоснованным и целесообразным.

Доклад Усачева И.Н. *«Приливные электростанции - новые технологии»* был посвящен возможности использования энергии приливов в России.

В течении 40 лет осуществлялся мониторинг за работой Кислогубской ПЭС и в результате было доказано, что эксплуатация приливной станции обеспечивает ее гибкую работу в энергосистеме как в пиковой, так и в базовой части графика нагрузки. В результате мониторинга было установлено, что тонкостенная железобетонная конструкция здания ПЭС находится в отличном состоянии, искусственное основание, выполненное под водой устойчиво и не имеет признаков суффозионных процессов, а защита оборудования обеспечила устойчивость против коррозии. Проводимые на Кислогубской ПЭС испытания гидросилового оборудования позволят уже в 2006 г. приступить к проектированию Мезенской ПЭС мощностью 19,2 млн. кВт на Белом море и созданию Тугурской ПЭС мощностью 8 млн.кВт на Дальнем Востоке.

Доклад *«Наплавная технология сооружения ГЭС на р. Зее»* (авторы: Усачев И.Н., Воробьев И.Н.) посвящен вопросам возведения как отдельных ГЭС, так и каскадов гидроэлектростанций наплавным способом. При использовании этого способа строительство ведется из отдельных крупных пространственных блоков модулей: машинного здания ГЭС, водосбросного сооружения и т.д., которые изготавливаются в заводских условиях промышленных предприятий, расположенных в крупных населенных пунктах с развитой инфраструктурой. Затем блоки модули сплаваются по реке к створам гидроузлов каскада, устанавливаются в заранее подготовленные котлованы в проектное положение, образуя напорный фронт гидроузла. Эта технология позволяет существенно снизить объемы строительно-монтажных работ, выполняемых в створах гидроузлов, снизить трудозатра-

ты и стоимость создания инфраструктуры в районе строительства. Использование наплавного способа возведения рассматривается на примере каскада Нижнезейских ГЭС на р. Зее.

Концепция автоматизации инструментальных наблюдений за состоянием и безопасностью гидротехнических сооружений ГЭС на основе современных технических средств диагностики, систем телекоммуникаций на базе компьютерной техники и спутниковой системы передачи данных с объекта в информационно-диагностический центр была изложена в докладе *«Автоматизация инструментальных наблюдений за состоянием гидротехнических сооружений с использованием спутниковой системы телекоммуникаций»* (авторы: Коган Е.А., Щербина В.И., Поляк Л.Е.).

В докладе отмечалось, что современный уровень развития телекоммуникационных средств удаленного доступа позволяет организовать с использованием спутниковой линии связи передачу данных непосредственно с объекта в информационно-диагностический центр. Подобная схема автоматизированного мониторинга реализована на Кислогубской ПЭС.

Доклад Щербины В.И., Бердичевского Г.Ю. *«Обеспечение безопасности ГТС каскада гидроузлов с использованием современных информационно-диагностических систем»* посвящен вопросам обеспечения постоянного контроля состояния сооружений. Для контроля состояния сооружений на каждом гидроузле должна быть установлена специальная информационно-диагностическая система, обеспечивающая сохранение базы данных с показателями приборов и результатами визуальных наблюдений, а также диагностический блок при помощи которого возможно сделать первоначальную предварительную оценку состояния сооружений и оборудования.

В сообщении *«Обеспечение безопасной эксплуатации подпорных стен гидротехнических сооружений при нарушении фильтрационного режима»* (авторы: Суриков Е.А., Иващенко И.Н., Быковский Д.В.) говорилось о том, что при нарушении работы дренажей подпорных стен опорожнение бассейна необходимо производить постепенно, в соответствии со специальной программой, предусматривающей снижение уровня воды в бассейне в зависимости от пьезометрических уровней в обратной засыпке подпорных стен или с применением дополнительных технических мероприятий по снижению фильтрационного давления. Также в докладе указывалось на широкие перспективы применения горизонтального направленного бурения для прокладки трубчатого дренажа и устройства системы лучевых дренажей. Выполненные исследования и расчеты продемонстрировали приемлемость и эффективность указанных мероприятий для условий Загорской ГАЭС.

Обсуждению некоторых тестов для уравнений Сен-Венана, а также, решение каких задач можно считать обоснованным при удовлетворительной работе этих тестов, посвящен доклад С.Я. Школьников *«Тестирование численных методов решения гидравлических задач»*. В следующем сообщении С.Я. Школьников, И.А. Секисовой *«Гидравлическое моделирование волн прорыва из гидроотвалов с учетом сухого трения»* делается акцент на особых условиях аварийных ситуаций при прорыве напорного фронта ЗШО и указывается, что основной объем выноса связан с течением неконсолидированной пульпы. Авторами построен численный метод для решения уравнений Сен-Венана с членом, учитывающим сухое трение в одномерной и плановой постановке, решен ряд модельных задач, а также указанная методика была применена на ряде конкретных объектов.

В докладе *«Исследование трещинообразования и несущей способности массивных перекрытий ГЭС и АЭС, возводимых поэтапно, и усиление перекрытий для продления срока их эксплуатации»* (авторы: Петрашень И.Р., Николаев Д.В.) отмечалось, что в результате длительных воздействий на массивные перекрытия, переменных статических, вибрационных, температурных циклических нагрузок, строительный шов — шов контакт теряет прочность. Авторами с целью определения влияния нарушенных горизонтальных швов на работу конструкции были проведены численные исследования и модельные испытания на моделях масштабов 1 : 10 и 1 : 4.

В результате исследований установлен нетиповой механизм трещинообразования, разработана расчетная схема для конструкций, возводимых поярусно, для проведения анализа численным и аналитическим методом и разработан проект усиления перекрытий АЭС РБМК.

**Руководством ОАО «ГидроОГК»** сформулированы направления деятельности проектного и научно-исследовательского комплексов на ближайшую перспективу. Эти направления связаны прежде всего с реконструкцией и увеличением надежности достраиваемых и построенных объектов, уменьшением рисков от аварий на гидротехнических сооружениях, применением новых технологий реконструкции и строительства, в частности возведение сооружений ГЭС наплавным способом, совершенствованием оборудования (дальнейшие испытания ортогонального гидроагрегата и применение его на ПЭС и МГЭС, затворов многоразового действия и т.д.), разработкой математических моделей каскадов для уменьшения ущерба от аварий и увеличения выработки на ГЭС.

**Проект решения Научно-технической конференции «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии»**

*(7 – 9 декабря 2005 г., Санкт-Петербург)*

Научно-техническая конференция «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии», организованная ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», ОАО «ГидроОГК», НП «Гидроэнергетика России» продолжает многолетние традиции проведения координационных научных совещаний по гидроэнергетике, проводившихся в 60 – 90-е годы прошлого века.

В работе конференции приняли участие около 300 представителей более 30 организаций и предприятий гидроэнергетического направления, а также ученые из Франции, Норвегии, Германии. На конференции были заслушаны около 120 докладов.

С приветственным словом к участникам конференции выступил Председатель Правления ОАО РАО «ЕЭС России» А.Б. Чубайс, который подчеркнул важность и значение научных разработок для развития гидроэнергетики России.

На конференции были награждены грамотами и премиями ОАО РАО «ЕЭС России» и ОАО «ГидроОГК» девять ветеранов-ученых и трое молодых ученых гидроэнергетиков сотрудников ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», ОАО «НИИЭС», СПбГПУ, МГСУ и МЭИ (ТУ).

Участники конференции отмечают большую подготовительную работу и высокую организацию по ее проведению.

**Конференция решила:**

рекомендовать проводить научно-технические конференции «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии» на регулярной основе;

при определении тематики будущих конференций предусмотреть возможность обсуждения на них отдельных направлений в гидроэнергетике, например общие вопросы научного обоснования развития гидроэнергетики (прогноз развития, экономика гидроэнергетики, экология и т.п.), организация и обеспечение безопасности гидротехнических сооружений, новые разработки и технологии строительных материалов (бетон, грунты, композиты и др.), производство работ при возведении гидросооружений, разработка новых конструкций и др.;

рекомендовать провести следующую конференцию в сентябре 2006 г., приурочив ее проведение к 85-летию юбилею ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева».

/Материал подготовил  
начальник НТО ОАО «НИИЭС» А.Н. Юрченко/

Содержание

*Бритвин С.О., Иващенко И.Н.* Актуальные вопросы обеспечения безопасности гидротехнических сооружений ..... 3

**I. Общие вопросы обеспечения безопасности гидротехнических сооружений ..... 9**

*Асарин А.Е.* Современные методы и технические приемы определения максимальных расчетных расходов воды проектируемых и эксплуатируемых гидроузлов ..... 9

*Радкевич Д.Б., Асарин А.Е., Рассказов Л.Н., Филиппова Е.А., Школьников С.Я., Чочия А.В., Иващенко И.Н., Орлов А.В., Троицкий А.В.* Практика декларирования безопасности гидротехнических сооружений объектов энергетики ..... 31

*Блинов И.Ф.* Практика применения «Методики определения критериев безопасности гидротехнических сооружений» РД 153-34.2-21.342-00 ... 48

*Школьников С.Я., Троицкий А.В.* Опыт применения методики укрупненной оценки ущербов при гидродинамической аварии гидротехнических сооружений ..... 58

*Чернилов А.Г., Лавров Б.А., Иващенко И.Н., Фисенко В.Ф.* Экспертно-диагностическая система D2 для оценки безопасности гидротехнических сооружений ..... 64

*Школьников С.Я., Секисова И.А.* Математическое моделирование волн разлива из золоотвалов с учетом сухого трения ..... 72

**II. Исследования и обеспечение безопасности эксплуатируемых гидротехнических сооружений ..... 82**

*Белостоцкий А.М., Рассказов Л.Н.* Численное моделирование пространственного напряженно-деформированного состояния систем «сооружение-основание» с учетом нелинейных реологических свойств грунтов ..... 82

*Блинов И.Ф., Магрук В.И., Черненко В.Н.* Организация и основные результаты натурных исследований Загорской ГАЭС ..... 98

*Суриков Е.А., Быковский Д.В., Иващенко И.Н., Блинов И.Ф.* Обеспечение устойчивости подпорных стен верхнего бассейна Загорской ГАЭС с использованием технологии горизонтального направленного бурения. .... 110

*Дидович М.Я., Суриков Е.А.* Геофильтрационная модель комплекса сооружений водоприемника верхнего бассейна Загорской ГАЭС. . 122

*Магрук В.И., Черненко В.Н., Дидович М.Я., Суриков Е.А., Быковский Д.В.* Стабилизация фильтрационного режима низовой плотины Загорской ГАЭС ..... 133

*Бесстраинов В.М.* Оценка сейсмической опасности района плотины Таль Хаш (Западная Сирия). ..... 143

*Зайцев Н.Н., Желанкин В.Г., Иващенко И.Н.* Технические решения по обеспечению безопасной эксплуатации плотины Таль Хош ..... 152

<i>Зайцев Н.Н., Суриков Е.А.</i> Разработка проекта реконструкции гидроузла Рабита Шейх, эксплуатируемого в условиях интенсивной эрозии карстующихся пород основания .....	163
<i>Фисенко В.Ф., Деев А.П.</i> Рекомендации по организации натуральных наблюдений на эксплуатируемых ГТС с учетом опыта Воткинской ГЭС .....	176
<i>Борткевич С.В., Воронин С.Г.</i> Фильтрационные исследования глинистых грунтов экрана верхнего водоема Днестровской ГАЭС при высоких градиентах напора .....	188
Итоги работы конференции «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии» .....	201

**Безопасность энергетических сооружений**  
**Сборник**

Научный редактор: Иващенко И.Н.

Технический редактор: Григорьева Т.А.

Оригинал-макет и компьютерная верстка: Мелихова А.Г.

Подписано в печать 19. 11. 2005

Формат 60x90/16. Гарнитура Таймс

Бумага офс. 1. Печать офсетная

Объем 13 п.л. Тираж 1000 экз.

Заказ № 354

Отпечатано в ООО «ГЕО-ТЭК»

г. Красноармейск, Московской области. Тел.: 584-16-23

Лицензия ИД 06483 от 19 ноября 2001 г.

ОАО «НИИЭС»

125362, г. Москва, Строительный проезд, д. 7а.