



ГИДРО- ТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Ежемесячный
научно-технический журнал

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РФ,

ОАО «РУСГИДРО»,

АССОЦИАЦИЯ «КОРПОРАЦИЯ ЕЭЭК»,

ЗАО НТФ «ЭНЕРГОПРОГРЕСС»,

НП «НТС ЕЭС»

Основан в 1930 г.

№ 7

ИЮЛЬ

2012

Содержание

Проектирование, строительство, эксплуатация

Корчевский В. Ф., Обополь А. Ю. О проектировании и строительстве Камбаратинских гидроэлектростанций на р. Нарыне в Киргизской Республике. 2

Ялтанец И. М., Иванов С. А., Казаков В. А., Ермолаев С. В. Geotube® Dewatering — технология обезвоживания при добыче и переработке сырья в горной промышленности. 13

Безопасность гидротехнических сооружений

Иващенко И. Н., Радкевич Д. Б., Иващенко К. И. Вероятностная оценка риска аварий плотин по результатам их мониторинга и обследований 22

Дискуссии

Башнин О. И. Саяно-Шушенская катастрофа – синхронный гидроакустический резонанс? 29

Берлин В. В., Муравьев О. А. Исследование резонансных явлений в напорных водоводах и отсасывающих трубах ГЭС 46

Поздравление И. Н. Усачеву 59

2 Библиография

Аргал Э. С. О книгах Л. Ф. Фурсова 60

13 Хроника

Новости гидроэнергетики и гидротехники 61

Ялтанец И. М.

VI Съезд гидромеханизаторов России 63

Шайтанов В. Я., Золотов Л. А., Лескес И. Н.

Общее собрание участников ассоциации “Гидропроект”. 65

На обложке – Богучанская ГЭС

О проектировании и строительстве Камбаратинских гидроэлектростанций на р. Нарыне в Киргизской Республике

Корчевский В. Ф., главный инженер,

Обополь А. Ю., главный инженер проекта (ООО “Гидроспецпроект”)

Рассматривается современное состояние проектирования и строительства Камбаратинских ГЭС 1 и 2, а также результаты возведения плотины ГЭС-2. Подводятся итоги первых лет ее эксплуатации, анализируются возникающие проблемы, предлагаются пути их решения.

Ключевые слова: взрывонабросная плотина, крупномасштабный взрыв, сейсмическое воздействие, регулирование стока, максимальный расход, водосбросное сооружение, заилиение водохранилища, Камбаратинские ГЭС.

Проект Камбаратинских гидроэлектростанций 1 и 2 суммарной установленной мощностью 2260 МВт и выработкой электроэнергии 6260 ГВт·ч был разработан институтом “Средазгидропроект” (г. Ташкент) и утвержден в 1988 г [1]. Плотины обеих гидроэлектростанций предполагалось возвести с помощью крупномасштабных взрывов: плотину ГЭС-2 высотой 60 м — направленным взрывом “на сброс”, а плотину ГЭС-1 высотой 275 м — путем высвобождения взрывом гравитационной энергии больших масс скальной породы, высоко поднятых над дном горного ущелья и перемещаемых в проектный профиль под действием сил тяжести, в виде обвального потока. Плотины последнего типа получили название “взрывообвальные” [2].

Строительство Камбаратинских гидроэлектростанций 1 и 2 намечалось осуществить по единому титулу, с опережающим (на 4 – 5 лет) вводом в эксплуатацию ГЭС-2. Начатое строительство ГЭС было прервано в начале 1990-х гг. После обретения Киргизской Республикой независимости права генерального проектировщика Камбаратинских ГЭС перешли к проектно-изыскательскому институту “Гидропроект” (г. Каракуль).

Важность проблемы. Проектом Камбаратинских гидроэлектростанций предусматривалось оптимальное использование водных и гидроэнергетических ресурсов рек Нарына и Сырдарьи с максимальным удовлетворением требований орошаемого земледелия и энергетики, предъявляемых прибрежными государствами. Предполагалось, что требования ирригации Узбекистана и Казахстана будут обеспечиваться путем регулирования стока р. Нарына в существующем Токтогульском водохранилище. Камбаратинские же гидроэлектростанции будут работать в режиме, компенсирующем зимнюю нехватку выработки электроэнергии нижерасположенных ГЭС Токтогульского каскада при их ра-

боте по ирригационному графику водопотребления.

Этот проект не был завершен, а после распада СССР в Узбекистане сложилось негативное отношение к его продолжению, не объяснимое с экономической точки зрения и, возможно, связанное с недооценкой важной водохозяйственной роли водохранилища Камбаратинской ГЭС-1.

В отсутствии Камбаратинских гидроэлектростанций Токтогульское водохранилище вынуждено летом удовлетворять требования ирригации, а зимой работать в энергетическом режиме. Такая нагрузка, не предусмотренная проектом его эксплуатации, может неблагоприятно отразиться на водобеспеченности земель нижерасположенных государств водопользователей, поскольку Токтогульское водохранилище в случае наступления маловодного периода будет не в состоянии осуществить возложенную на него функцию многолетнего регулирования стока. (Первоначальное наполнение Токтогульского водохранилища продолжалось 14 лет — с 1974 по 1988 г.)

Кроме того, сброс, по требованиям энергетики, большого объема воды в зимний период приводит к затоплению жилых и хозяйственных объектов Казахстана, так как пропускная способность русла в нижнем течении р. Сырдарьи ограничивается ледовыми заторами. Излишки воды поступают из Чардаринского водохранилища в Арнасайскую впадину, что лишает дельту Сырдарьи и северную часть Аральского моря столь нужной им воды.

Следует ожидать, что и в будущем, до ввода Камбаратинской ГЭС-1, отношение Киргизии к характеру эксплуатации Токтогульского водохранилища вряд ли изменится, так как республика, не располагающая сколько-нибудь существенными запасами органического топлива, испытывает острую нехватку в выработке зимней электроэнергии.

В сложившейся ситуации как Узбекистан, так и Казахстан должны быть заинтересованы в строи-

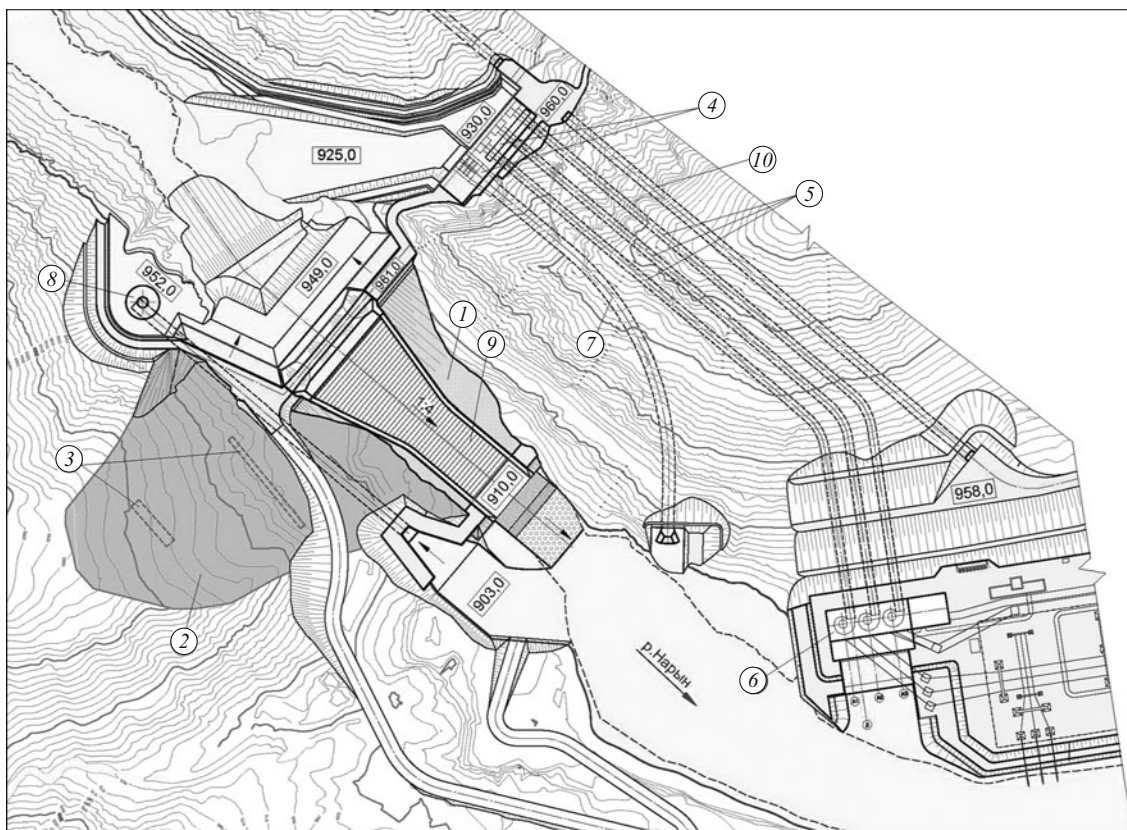


Рис. 1. План основных сооружений Камбаратинской ГЭС-2: 1 — плотина, 2 — взорванный навал породы; 3 — местоположение минных штолен; 4 — водоприемники ГЭС и СЭВ; 5 — подводящие туннели ГЭС; 6 — здание ГЭС; 7 — СЭВ; 8 — шахтный водосброс; 9 — поверхностный водосброс; 10 — транспортный туннель

тельстве Камбаратинской ГЭС-1, которая обеспечит возможность сохранения предусмотренного утвержденным проектом ирригационного режима регулирования стока р. Нарына в Токтогульском водохранилище.

Узбекистан не настаивает на запрете строительства Камбаратинской ГЭС-1. Он считает, что не надо начинать его до завершения независимой экспертизы надежности проекта и получения согласований, включающих вопросы трансграничного водопользования, от всех заинтересованных сторон.

Проблема организации независимой экспертизы, против которой не возражает и Киргизия, заключается в том, что в утвержденном проекте 1988 г. принята высокая плотина ГЭС-1, возводимая взрывом зарядов общей мощностью 220 кт. В мировой практике взрывообвальные плотины, построенные на тендерной основе, отсутствуют. Создание плотины взрывом беспрецедентного масштаба в настоящее время вряд ли может быть признано целесообразным. К такому выводу пришли как российские, так и зарубежные фирмы, в частности французская “Electricite de France” (EDF), которой товариществом в составе “Интер РАО ЕЭС” (Россия), ОАО “Электрические станции” (Киргизия) и АО “КазКуат” (Казахстан) было поручено разрабо-

тать “Обоснование инвестиций в строительство Камбаратинских ГЭС”.

В связи с этим возникла необходимость в дополнительном рассмотрении вариантов основных сооружений ГЭС-1 с традиционными типами плотин: бетонными или из местных строительных материалов. Однако эти работы не были начаты, потому что их стоимость изначально не была предусмотрена заказчиком в контракте с EDF.

В 2009 г. ООО “Гидроспецпроект” по договору с ЗАО “Корпорация Союзгидроспецстрой” выполнило часть проектных работ по Камбаратинской ГЭС-1, но уже в конце года работы были прекращены, поскольку их финансирование так и не было открыто.

Актуализация проекта ГЭС-2. В 2008 г. в связи с решением Киргизской Республики продолжить строительство Камбаратинской ГЭС-2 ООО “Гидроспецпроект” выполнило актуализацию ее проекта [3], так как с момента его утверждения прошло уже 20 лет. За это время увеличился гидрологический ряд наблюдаемых расходов р. Нарына, изменилась нормативная база проектирования, возникла необходимость в дополнительной оценке устойчивости склонов в районе строительства, в пересмотре величины пропускной способности и состава водосбросных сооружений, в ревизии и за-

мене устаревшего электротехнического оборудования ГЭС. Уточненная компоновка основных сооружений ГЭС-2 приведена на рис. 1.

К моменту возобновления строительства была закончена проходка минных штолен крупномасштабного взрыва (КМВ) для возведения плотины, выполнен значительный объем работ по напорно-станционному узлу и строительно-эксплуатационному водосбросу (СЭВ).

Высотное положение порога входного портала СЭВ, на 25 м превышающего отметку русла реки, не позволяло осуществить перекрытие р. Нарына обычным способом — без применения направленного взрыва “на сброс”. В случае строительства плотины традиционного типа (бетонной или из местных строительных материалов) для перекрытия реки без использования взрыва потребовалось бы проложить новый строительный туннель на низких отметках и возвести ограждающую перемычку высотой, равной половине проектной высоты плотины, что значительно увеличило бы сроки строительства. Сооружение одного только строительного туннеля заняло бы не менее трех лет.

Согласно действующей карте сейсмического районирования район строительства ГЭС-2 относится к 9-бальной зоне землетрясений с магнитудой 7. В непосредственной близости от низовой бровки плотины русло р. Нарына пересекает тектонический разлом II порядка “Южный”, по которому фиксируются современные подвижки. В этих условиях взрывонабросная плотина, тело которой формируется под воздействием огромных сжимающих усилий, имеет определенные преимущества по сравнению с плотиной традиционного типа, так как обладает большим запасом прочности и устойчивости по отношению к максимальным сейсмическим нагрузкам. Эти обстоятельства и обусловили целесообразность сохранения первоначального проектного решения по конструкции и технологии строительства плотины ГЭС-2, которое позволяло не только произвести перекрытие р. Нарына, но и одновременно возвести (полностью или частично) основное тело плотины. Поэтому в актуализированном проекте, помимо других вопросов, был разработан проект организации работ по подготовке и проведению КМВ.

Схема и параметры КМВ были приняты в соответствии с ранее разработанным проектом, выполненным с участием ряда специализированных проектных и научно-исследовательских организаций на основе проведения значительного объема натурных и лабораторных исследований. Кроме изучения уже построенных взрывом плотин и дамб (Медо, Байпазинская, Ак-Су и др.) были детально исследованы опытные плотины Бурлыкя и Учтерек, возведенные специально для этой цели на притоках

р. Нарына. Результаты этих исследований позволили разработать методику прогноза геотехнических и фильтрационно-суффозионных свойств тела взрывонабросных плотин [4].

Моделирование профиля взорванного навала пород в вакуумной камере ИФЗ АН СССР (ныне Институт динамики геосферы РАН) показало возможность создания взрывом двух зарядов (основного и вспомогательного) общей мощностью 2860 т, навала породы высотой 56 – 60 м без использования (намечавшегося ранее) одного из вспомогательных зарядов, наиболее приближенного к руслу реки.

Изменения коснулись также типа взрывчатых веществ (ВВ). В связи со сложностями приобретения, транспортировки через государственные границы и хранения штатных ВВ, которые исключали возможность выполнения КМВ в установленные Правительством Киргизии директивные сроки, граммонит 79/21 был заменен на приготавливаемую на месте взрывчатку из смеси пористой аммиачной селитры и дизельного топлива. Полевые контрольные испытания, выполненные ООО НТФ “Взрывтехнология”, показали энергетическую эквивалентность ее штатному ВВ.

Следует отметить, что создание взрывом навала породы является только первым этапом строительства плотины, после которого необходимо дополнительно выполнить определенный комплекс работ для получения надежного и маловодопроницаемого инженерного сооружения. Этот этап включает также переключение расходов р. Нарына в строительно-эксплуатационный водосброс. При расходе реки в момент взрыва $200 \text{ м}^3/\text{с}$ уровень воды в верхнем бьефе может подняться до отметки 930,0 м, поэтому минимальная отметка гребня взорванного навала породы должна быть не ниже 935,0 м.

В случае, если бы гребень навала оказался ниже отметки 930,0 м, возникала бы опасность его размыва в результате поверхностного перелива воды с катастрофическими последствиями. А если бы гребень навала превысил отметку 960,0 м, взорванная порода могла бы перекрыть подводящий канал водоприемников ГЭС и СЭВ. По этой причине нельзя было выполнить взрыв с запасом мощности, что, кроме того, увеличило бы опасность разрушения уже построенных сооружений гидроузла от повышенного сейсмического воздействия.

При проектировании Камбаратинской ГЭС-2 принималось во внимание, что возводимая с помощью уникального крупномасштабного взрыва плотина является экспериментальным объектом. На формирование профиля взорванного навала породы влияет большое количество природных и техногенных факторов, которые не могут быть полностью учтены при проектировании КМВ. Об этом



Рис. 2. Крупномасштабный взрыв для возведения плотины

свидетельствует опыт уже проведенных уникальных взрывов, в результате которых, несмотря на выполненные расчеты и исследования, имели место как недобор высоты навала, так и превышение его проектных значений [5].

Сразу же после выполнения взрыва и определения геометрии взорванного навала породы должны были выполняться:

- досыпка плотины до проектного профиля;
- устройство экрана и понура из полимерной пленки в верхней, наиболее водопроницаемой части гребня;
- пригрузка их защитным слоем породы, устойчивым к волновым воздействиям;
- планировка и крепление низового откоса плотины;
- увеличение фильтрационной прочности плотины путем кольматации (замыва) ее тела (ниже уровня понура) мелкозернистыми материалами, в качестве которых предполагалось использовать отложения наносов в зоне выклинивания Токтогульского водохранилища.

Возведение плотины ГЭС-2. Подготовка и проведение КМВ выполнялись ЗАО “Корпорация Союзгидроспецстрой”. Взрыв был произведен 22 декабря 2009 г (рис. 2). Высота взорванного навала породы в русле, а также общий его объем оказались меньше ожидаемых значений. Отметка гребня навала составила 930,0 м и в течение нескольких суток была повышена до минимальной расчетной отметки 935,0 м механизированной отсыпкой породы (рис. 3). Р. Нарын была перекрыта, и ее расходы начали поступать в нижний бьеф через СЭВ. Все по-

строенные до взрыва объекты ГЭС, населенные пункты, коммуникации водоснабжения и электро-снабжения повреждений не получили. В результате были созданы условия для последующей достройки плотины досыпкой из непрофильных объемов взорванной породы, залегающей на правом берегу створного участка.

С учетом сложившихся после взрыва условий, в выданной ООО “Гидроспецпроект” рабочей документации конструкция плотины была существенно изменена. Появилась возможность выполнить профиль плотины более обжатым по сравнению с прогнозным контуром взорванного навала породы. Вместо требуемых объемов выемки при планировке взорванного навала грунта потребовался несколько меньший объем досыпки в новый проект-

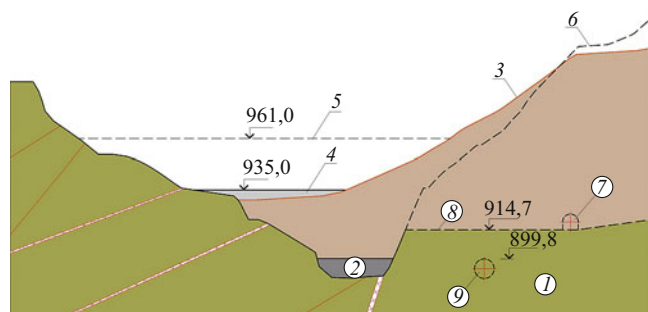


Рис. 3. Результаты крупномасштабного взрыва: 1 — переслаивание песчаников, алевролитов и аргиллитов; 2 — русловой аллювий; 3 — поверхность взорванного навала породы; 4 — механизированная досыпка породы; 5 — проектное положение гребня плотины; 6 — поверхность земли до взрыва; 7 — минная штольня; 8 — проектное положение подошвы воронки выброса; 9 — проектное положение отводящего туннеля шахтно-го водосброса

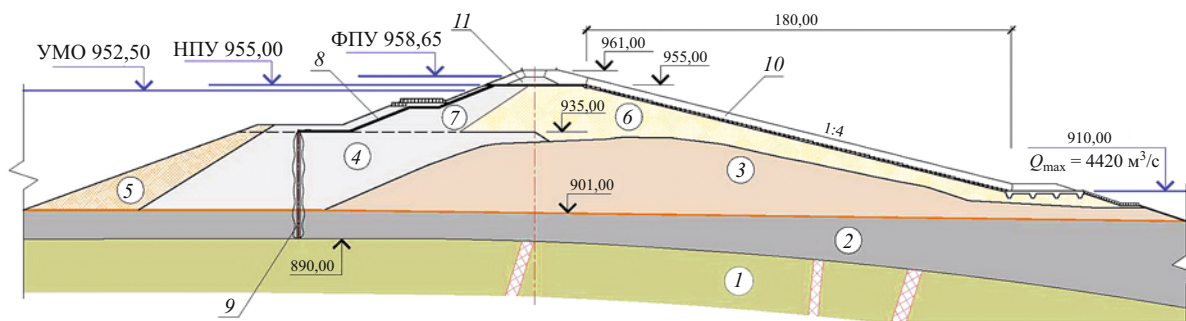


Рис. 4. Конструкция плотины: 1 — переслаивание песчаников, алевролитов и аргиллитов; 2 — русловой аллювий; 3 — взорванный навал породы; 4 — галечник, отсыпанный в воду; 5 — суглинок, отсыпанный в воду; 6 — каменная наброска (механизированная отсыпка); 7 — галечник (механизированная отсыпка); 8 — экран из пленки ПВХ; 9 — инъекционная завеса; 10 — поверхностный водосбор; 11 — плавкая вставка



Рис. 5. Достройка плотины (март 2010 г.)

ный профиль плотины. На верхнем откосе плотины был предусмотрен полный противофильтрационный контур, включающий экран из полимерной пленки, замкнутый, на отметке 935,0 м, на буробетонную “стену в грунте”, сопрягающуюся со скальным основанием. Благодаря этому оказалось возможным отказаться от дорогостоящих мероприятий по кольматации тела навала. Конструкция плотины на конечном этапе ее строительства приведена на рис. 4.

Достройка плотины до необходимого на данном этапе проектного профиля была завершена в короткий срок, до наступления паводкового периода в июне. Возведение плотины показано на рис. 5.

В действительности, вместо буробетонной “стены в грунте” была выполнена более дешевая инъекционная завеса, а для защиты верхнего откоса от

волновых воздействий использованы сборные железобетонные плиты. К концу августа был введен в эксплуатацию первый гидроагрегат ГЭС.

Наблюдения за фильтрацией в теле плотины, выполнявшиеся в пяти пьезометрических створах, показали, что при уровне воды в верхнем бьефе 951,6 м фильтрационный поток полностью располагается в теле навала, образованного взрывом и не затрагивает отсыпанную механизмами часть плотины. Расход фильтрации через плотину, который согласно расчетам должен был составить до кольматации ее тела 15 м³/с, а после — 5 м³/с, в действительности не превысил первую сотню л/с.

Сравнение физических объемов работ по достройке плотины после проведения КМВ, предусмотренных в утвержденном проекте и в рабочих чертежах, учитывающих фактически сложившиеся по-

сле взрыва условия, показывает, что сколько-нибудь существенного изменения стоимости строительства от перехода на новую конструкцию плотины ожидать не следует.

Что же касается причины недостаточного сброса породы, то на этот счет существует несколько взаимоисключающих друг друга версий. По версии, выдвинутой на заседании бюро Научного совета РАН по проблеме “Народнохозяйственное использование взрыва” (протокол № 1 от 12.01.2010 г), причина кроется в несоответствии показателя простреливаемости грунта модели фактической структуре и физическим характеристикам взрываемого массива. По другой версии причиной является пониженная энергетическая эффективность использованных ВВ относительно граммонта 79/21 [6]. Еще одна версия предполагает влияние структурных геологических особенностей взрываемого скального массива, не установленных в период разработки проекта.

Окончательный анализ результатов взрыва представляется чрезвычайно важным для дальнейшего совершенствования методики проектирования КМВ и может быть выполнен только после установления действительного значения показателя простреливаемости грунта и определения фактической конфигурации воронок выброса.

Расчетные расходы паводков. В утвержденном проекте 1988 г. основные сооружения ГЭС-2 были рассчитаны на пропуск паводкового расхода 2630 м³/с с вероятностью превышения 0,5 % как для гидроузла III класса. Через СЭВ предполагалось пропускать 1790 м³/с и через все три гидроагрегата ГЭС — 840 м³/с. При этом для взрывообвальной плотины ГЭС-1 была экономически оправдана большая трансформирующая призма водохранилища. Превышение в 18 м отметки ФПУ над НПУ позволяло осуществить срезку паводкового расхода с 4220 до 2630 м³/с, т.е. до расчетного сбросного расхода ГЭС-2.

В актуализированном проекте 2008 г. на основании действующего в Российской Федерации СНиП 33 – 01 – 2003 основные сооружения ГЭС-2 были отнесены ко II классу. Соответственно были изменены значения вероятностей превышения максимальных расходов для всех расчетных случаев эксплуатации ГЭС.

По сравнению с проектом 1988 г. в результате расчетов по удлиненному (включая 2007 г.) ряду наблюдаемых расходов были увеличены значения максимальных расходов р. Нарына для равных вероятностей их превышения (табл. 1).

Кроме того, был определен среднесуточный расход р. Нарына по методике вероятного максимального паводка (probable maximum flood — PMF), который составил 5500 м³/с. Эта норма но-

сит рекомендательный характер и применяется для поверочного расчетного случая независимо от класса сооружения. Однако в современных условиях целесообразно использовать именно такой подход к определению максимальных сбросных расходов, имея в виду повышение как надежности сооружения, так и вероятности получения заемных средств от международных финансовых организаций для завершения строительства ГЭС.

Следует также учитывать, что ниже по течению р. Нарына располагается каскад из пяти действующих ГЭС, при проектировании и строительстве которых такая норма не применялась и их водосбросные сооружения, естественно, не были рассчитаны на пропуск расхода PMF. Поэтому функция защиты этих ГЭС от катастрофических паводков с целью повышения надежности их эксплуатации возлагается на Камбаратинскую ГЭС-1.

В случае строительства ГЭС-1 с традиционным типом плотины — бетонной или из местных строительных материалов — значительное повышение отметки гребня плотины и создание трансформирующей призмы водохранилища, достаточной для срезки вероятного максимального паводка, не могут быть экономически оправданы. Для этой цели придется использовать часть полезной емкости водохранилища, а максимальный сбросной расход ГЭС-1 ограничить величиной 4420 м³/с вероятностью превышения 0,01 % с гарантийной поправкой. Такой расход, с учетом дополнительной боковой приточности, Токтогульский гидроузел I класса обязан принять независимо от того, будет или не будет построена Камбаратинская ГЭС-1.

Расчеты трансформации паводковой волны, выполненные без учета пропускной способности гидроагрегатов ГЭС-1, показали, что сбросной расход не превысит 4420 м³/с, если уровень водохранилища перед началом паводка будет находиться на 23 м ниже отметки НПУ. При этом максимальное превышение уровня ФПУ над НПУ составит 6,6 м, а высота плотины традиционного типа может быть снижена до 265 м.

Т а б л и ц а 1

Q _{ср.} макс., м ³ /с	C _v	C _s	Вероятность превышения максимальных расходов P, %						
			0,01*	0,1	0,5	1,0	3,0	5,0	10,0
Проект 1988 г.									
1294	0,28	4C _v	4220	3110	2630	2420	2110	1970	1770
Актуализированный проект 2008 г.									
1311	0,29	4C _v	4420	3210	2720	2480	2170	2010	1800

* С гарантийной поправкой.

После прохождения пика паводка водохранилище ГЭС-1 будет заполнено до отметки НПУ к октябрю, т.е. к началу его плановой сработки по требованиям энергосистемы, даже в условиях маловодного года.

По мере увеличения числа гидроагрегатов ГЭС, участвующих в пропуске паводка, глубина предпаводковой сработки водохранилища уменьшается и, с учетом полной пропускной способности всех четырех гидроагрегатов, не превысит 5 м.

Водосбросные сооружения ГЭС-2. Было принято, что до полного завершения строительства основные сооружения ГЭС-2 находятся в состоянии временной эксплуатации, продолжительность которой от момента возведения плотины взрывом до пуска последнего третьего гидроагрегата составляет 2 года. Период постоянной эксплуатации ГЭС-2 делится на два этапа: до и после ввода ГЭС-1.

По сравнению с проектом 1988 г. пропускную способность сооружений ГЭС-2 необходимо было увеличить почти вдвое. Поскольку требования к ее увеличению возрастают поэтапно, с существенным разрывом по времени, оказалось целесообразным (во избежание омертвления капиталовложений) предусмотреть два дополнительных водосбросных сооружения, вводимых по мере необходимости.

В состав водосбросных сооружений ГЭС-2 помимо СЭВ, проектирование которого было выполнено в [1], дополнительно были включены:

- шахтный водосброс на правом берегу;
- поверхностный водосброс по телу плотины.

Чтобы исключить необходимость применения дорогостоящих металлических конструкций и обеспечить автоматическую работу этих сооружений, их водосливные пороги располагались на отметке НПУ, а расчетные расходы предполагалось пропускать при форсированном уровне верхнего бьефа.

Шахтный водосброс. В состав сооружений шахтного водосброса входят:

- кольцевая водосливная воронка диаметром 32 м;
- сопрягающая шахта высотой 62 м и диаметром 10 м;
- узел закрутки потока;
- отводящий туннель диаметром 10 м и протяженностью 330 м;
- концевое сооружение.

Конструкция шахтного водосброса была рассмотрена в двух вариантах, отличающихся способом гашения энергии сбросного потока. В 1-м варианте для этой цели использовался вертикальный

Т а б л и ц а 2

Характер эксплуатации	Временная		Постоянная			
			Без ГЭС-1		С ГЭС-1	
Этапы эксплуатации	I	II	III		IV	
Период эксплуатации, лет	1	2	> 10		Постоянно	
Расчетные случаи	-	-	Основной	Поверочный	Основной	Поверочный
Вероятность превышения макс. расходов, %	3	3	1,0	0,1	0,1	PMF
Расчетный расход, м ³ /с	2170	2170	2480	3210	3210	4420***
В том числе через сооружения:						
СЭВ	2170*	1890**	1980	2060	2060	2090
Гидроагрегат ГЭС	-	280	280	280	280	280
Шахтный водосброс	-	-	220	870	870	1000
Водосброс на плотине	-	-	-	-	-	1050
Отметки уровня воды, м:						
в верхнем бьефе	957,10	955,00	956,30	958,30	958,30	958,65
в нижнем бьефе	906,90	906,40	907,10	908,20	908,20	910,00

* Укороченные дефлекторы.

** Штатные дефлекторы.

*** С учётом трансформации в водохранилище ГЭС-1.

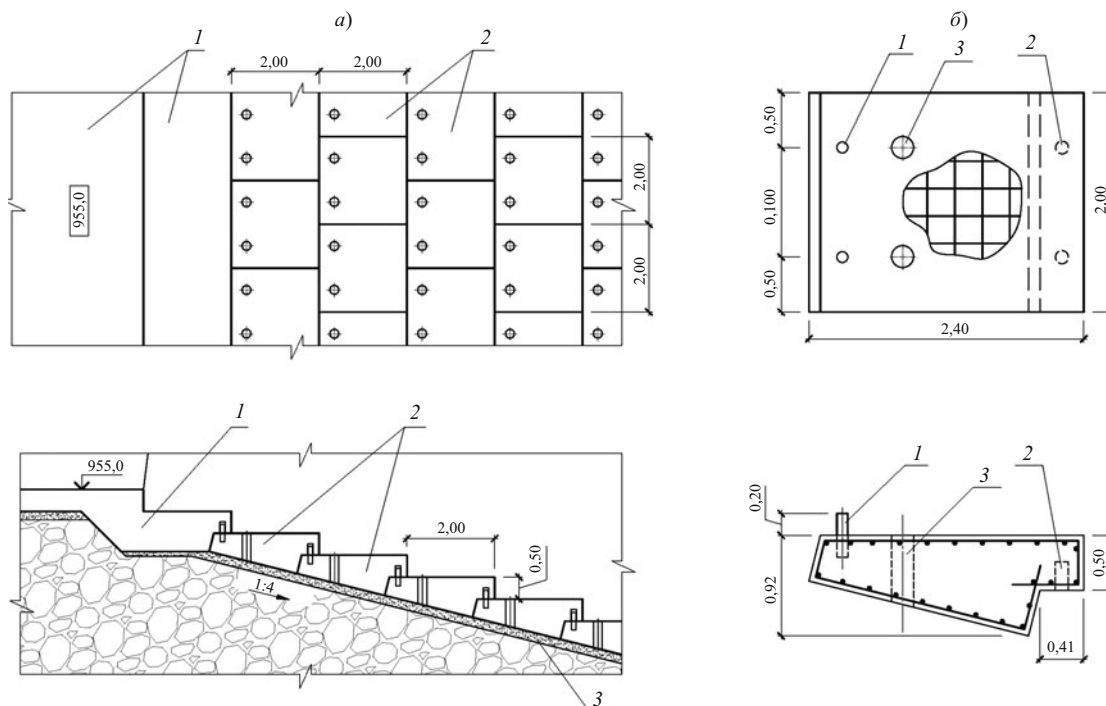


Рис. 7. Ступенчатый быстроток по телу плотины: *a* — раскладка плит: 1 — монолитный бетон; 2 — железобетонные плиты; 3 — обратный фильтр; *б* — конструкция плиты: 1 — анкерный штырь $d = 100$ мм; 2 — отверстие для анкерного штыря $d = 120$ мм; 3 — дренажные отверстия $d = 200$ мм

Основным назначением консольного сброса является организация поверхностного сопряжения бьефов, обеспечивающего минимальное воздействие сбросного потока на дно реки ниже плотины.

Горизонтальная плита консольного сброса, в которую упираются плиты ступенчатого быстротока, располагается на отметке 910,0 м. Чтобы она могла противостоять сдвигающим гидродинамическим нагрузкам, предусматривается вовлечение в работу грунта основания. Это достигается путем устройства железобетонных ребер жесткости, расположенных поперек и вдоль потока, арматура которых связана с опирающимися на них железобетонными плитами.

Пропуск расхода через поверхностный водосброс начинается после размыва плавкой вставки на водосливе, когда уровень воды в нижнем бьефе приблизится к отметке 910,0 м и глубина воды в русле превысит 10 м.

Крепление откоса плотины ниже консольного сброса связками бетонных блоков остается таким же, как это предусматривалось в ранее утвержденном проекте.

Т а б л и ц а 3

Период эксплуатации, лет	Вероятность превышения, %	Расчетный расход, $\text{м}^3/\text{с}$
3 – 5	2,0	2320
6 – 10	1,0	2480

Пропуск паводков. В соответствии со СНиП 33-01-2003 в зависимости от этапа и характера эксплуатации был предусмотрен следующий порядок пропуска расчетных паводков через сооружения ГЭС-2 (табл. 2).

Согласно требованиям ОАО “Электрические станции” (Киргизская Республика), исходя из условий работы ГЭС-2 в энергосистеме и вероятности аварийных ситуаций, в пропуске паводковых расходов может участвовать только один из трех ее гидроагрегатов с расходом $280 \text{ м}^3/\text{с}$.

Начиная с 2010 г. ГЭС-2 находится в состоянии временной эксплуатации. Однако до настоящего времени 2-й и 3-й гидроагрегаты в строй не введены, в связи с чем расчетная продолжительность ее временной эксплуатации должна быть увеличена. Соответственно должны быть уточнены расчетные вероятности превышения и величины максимальных расходов (табл. 3).

В период с 3-го по 5-й год временной эксплуатации паводок с расходом $2320 \text{ м}^3/\text{с}$ может быть пропущен через СЭВ и один гидроагрегат ГЭС. Вместе с тем наличие только одного действующего гидроагрегата (вместо трех) снижает вероятность его участия в пропуске паводка. Поэтому до наступления паводкового периода в 2012 г. необходимо обеспечить возможность временного пропуска дополнительного расхода через недостроенные водоподводящие сооружения 3-го гидроагрегата.

Начиная с шестого года временной эксплуатации существующих водопропускных сооружений

гидроузла будет недостаточно для безаварийного пропуска расчётного паводка 2480 м³/с. Он может быть пропущен через один гидроагрегат и СЭВ только при уровне воды в водохранилище, превышающем отметку гребня плотины.

Отсюда следует, что после пяти лет временной эксплуатации, т.е. к 2015 г., необходим ввод еще одного предусмотренного проектом водосбросного сооружения — шахтного водосброса, который в условиях временной эксплуатации должен будет пропускать 220 м³/с, а в случае ввода ГЭС-2 в постоянную эксплуатацию — 870 м³/с (поверочный случай). В оставшиеся три года должно быть выполнено проектирование и строительство шахтного водосброса, который обеспечит надежность последующей эксплуатации ГЭС.

Ввод в эксплуатацию на этом этапе именно шахтного, а не поверхностного водосброса по телу плотины обосновывается следующими соображениями.

Осадочные деформации тела плотины из каменной наброски будут продолжаться еще длительное время. Деформация поверхности гибкого ступенчатого быстроточа из-за неравномерных осадок основания может привести к свалу потока, местной концентрации гидродинамических нагрузок и в конечном счете к разрушению не только водослива, но и самой плотины. Поэтому ввод в эксплуатацию поверхностного водосброса на плотине ГЭС-2 в актуализированном проекте отнесен на более отдаленный срок — к моменту завершения строительства Камбаратинской ГЭС-1 — ввиду удовлетворения требований СНиП 33 – 01 – 2003, диктующих необходимость увеличения пропускной способности водосбросных сооружений при строительстве выше по течению гидроузла более высокого класса.

В ближайшее время необходимо организовать регулярные геодезические наблюдения за высотными и плановыми деформациями тела плотины, что даст возможность в будущем оценить готовность основания для строительства на нем поверхностного водосброса.

Водохранилище. Полный объем водохранилища ГЭС-2 не превышает 70 млн. м³, а полезный, обеспечивающий суточное регулирование мощности ГЭС, составляет 7,5 млн. м³.

Среднегодовой объем взвешенных наносов оценивается в 12,6 млн. м³. Основную массу его составляют частицы диаметром менее 0,25 мм. Сток влекомых наносов равен 0,53 млн. м³ в год. Средний диаметр частиц составляет 30 мм, максимальный достигает 100 мм.

Согласно расчетам, выполненным для средних водных условий, полное заиление водохранилища с потерей его регулирующей способности произойдет через 5 – 7 лет эксплуатации. В многоводных

условиях этот период сократится. В результате ГЭС не сможет работать в зимний, наиболее напряженный по нагрузкам энергосистемы, период года, так как бытовые расходы реки в декабре не превышают 100 – 120 м³/с. Поэтому одной из основных задач эксплуатации Камбаратинской ГЭС-2 является сохранение полезной емкости водохранилища.

В актуализированном проекте рассмотрены несколько режимов работы ГЭС, предлагающих в период повышенной мутности потока (май — июль месяцы) снижать уровень водохранилища, что позволит продлить срок использования его полезной емкости (табл. 4).

В первые два года эксплуатации ГЭС-2 (2010 и 2011 гг.) пропуск паводков осуществлялся при пониженных уровнях воды в верхнем бьефе на отметках 945,0 – 947,0 м, что благоприятно скажется на продлении срока службы полезной емкости водохранилища. Рекомендуется и в дальнейшем придерживаться этой тактики, при которой возрастает доля заиления мертвого объема в общем объеме заиления водохранилища. По мере заиления полезной емкости водохранилища уровень его мертвого объема может постепенно понижаться от проектной отметки 952,5 м вплоть до отметок 950,0 – 947,0 м.

После того как бар, сформированный отложениями наносов, подойдет к створу плотины, увеличится их транзит в нижний бьеф гидроузла. При этом мутность потока будет близка к бытовой. Исходя из особенностей режима работы обделка СЭВ должна обладать повышенной стойкостью к абразивному истиранию и ударному воздействию взвешенными и влекомыми наносами. В таких же неблагоприятных условиях будут работать и турбины ГЭС.

Кардинально проблема поступления наносов в водохранилище ГЭС-2 может быть решена только после начала строительства Камбаратинской ГЭС-1 и перекрытия р. Нарына в ее створе верховой ограждающей перемычкой с отводом воды в строительный туннель. При высоте подпора 40 м относительно бытовых горизонтов воды в реке перед перемычкой

Т а б л и ц а 4

Уровень верхнего бьефа, м	Период эксплуатации, лет							
	Проект	5	7	8	10	11	13	14
	Полезный объем водохранилища, млн. м ³							
955,0	7,5	4,9	1,8	0,5	-	-	-	-
950,0	7,5	6,5	-	5,3	2,4	0,3	-	-
947,0	7,5	6,7	-	6,0	5,2	-	2,2	0,2

кой образуется емкость объемом более 60 млн. м³, которая будет аккумулировать твердый сток в течение еще 5 лет, что позволит сохранить регулируемую способность водохранилища ГЭС-2 до ввода в эксплуатацию ГЭС-1.

Если строительство Камбаратинской ГЭС-1 не будет начато в обозримой перспективе, то потребуются производить глубокую сработку водохранилища ГЭС-2 с целью его промыва для восстановления регулирующей способности. В связи с этим представляется целесообразным уже сейчас начать регулярные наблюдения за динамикой заиления водохранилища и гранулометрическим составом наносов. Результаты таких исследований в будущем дадут возможность более обоснованно разработать проектные рекомендации по осуществлению режима промывок.

Выводы

1. Строительство Камбаратинской ГЭС-1 обеспечивает оптимальное и наиболее полное использование водных и гидроэнергетических ресурсов рек Нарына и Сырдарьи в интересах экономики всех прибрежных государств.

Помимо основной функции Камбаратинских гидроэлектростанций, являющихся сезонными компенсаторами энергосистемы Киргизской Республики, в задачи, решаемые строительством ГЭС-1, входят защита от вероятного максимального паводка (РМФ) нижерасположенных действующих ГЭС и предохранение полезной емкости водохранилища ГЭС-2 от заиления.

2. Вопросы финансирования для возобновления строительства Камбаратинской ГЭС-1 не могут обсуждаться до принятия обоснованных проектных решений по типу и конструкции плотины, оценки надежности ее эксплуатации, а также согласования условий трансграничного водопользования со все-

ми заинтересованными сторонами. Поэтому прежде всего необходимо изыскать возможность завершить разработку “Обоснования инвестиций в строительство Камбаратинской ГЭС-1”.

3. Наличие в настоящее время только одного действующего гидроагрегата ГЭС-2 (вместо трех) снижает вероятность его участия в пропуске паводка. До наступления паводкового периода 2012 г. следует обеспечить возможность пропуска дополнительного расхода через водоподводящие сооружения 3-го гидроагрегата. К 2015 г. для надежной эксплуатации ГЭС-2 необходим ввод шахтного водосброса. В ближайшие три года должно быть выполнено его проектирование и строительство.

Список литературы

1. *Камбаратинские ГЭС № 1 и № 2 на р. Нарын. Проект / Средизгидропроект. Ташкент, 1988.*
2. *Корчевский В. Ф., Муратова М. Х. Возведение плотин обрушением // Гидротехническое строительство. 1991. № 3. С. 6 – 11.*
3. *Камбаратинская ГЭС-2 на р. Нарын в Кыргызской Республике: Актуализация проекта / ООО “Гидроспецпроект”. М., 2008.*
4. *Муратова М. Х., Корчевский В. Ф., Петров Г. Н. Расчет уплотнения грунтов взрывонабросных плотин // Гидротехническое строительство. 1991. № 3. С. 11 – 15.*
5. *Корчевский В. Ф., Петров Г. Н. Проектирование и исследование взрывонабросных плотин. — М.: Энергоатомиздат, 1989.*
6. *Шуйфер М. И., Аргал Э. С. Создание плотины Камбаратинской ГЭС-2 крупномасштабным взрывом: анализ опыта и уроки проектирования // Гидротехническое строительство. 2011. № 12. С. 2 – 10.*
7. *Гордиенко П. И. Железобетонно-земляные водосливные плотины // Труды МИСИ им. В. В. Куйбышева. 1970. № 61. Вып. II.*
8. *Гринчук А. С., Правдивец Ю. П., Шехтман Н. В. Испытание крепления грунтовых откосов, допускающих перелив воды больших удельных расходов // Гидротехническое строительство. 1977. № 4.*

Geotube® Dewatering — технология обезвоживания при добыче и переработке сырья в горной промышленности

Ялтанец И. М. доктор техн. наук (МГГУ),
Иванов С. А., генеральный директор (ООО “НПО Гольфстрим”),
Казаков В. А., инженер (МГГУ),
Ермолаев С. В., главный инженер (ООО “Адмир Евразия”)

Рассматривается применение технологии Geotube, которая заключается в гравитационном обезвоживании суспензий в контейнерах Geotube, изготовленных из тканевого материала высокой прочности.

Ключевые слова: технология Geotube, контейнеры Geotube, сферы применения.

Вопросами технологии обезвоживания в России занимается компания “Адмир Евразия”. Накопленная обширная информация и практический опыт позволяют специалистам компании находить оптимальные инженерные решения для каждого объекта.

Технология Geotube® — процесс гравитационного обезвоживания суспензий в контейнерах Geotube®, изготовленных из тканевого геотекстильного материала высокой прочности. В зависимости от задач проекта, объемов обезвоживаемого материала и имеющейся в распоряжении производственной площадки могут применяться контейнеры различных размеров — до 1800 м³ обезвоженного материала в одном контейнере. Системы Geotube® могут быть смонтированы даже на базе самосвалов и перевезены куда потребуется. Это одна из самых гибких технологий обезвоживания, а поэтому одно из самых эффективных решений на рынке. Уменьшение объема может достигать 90 % с итоговым высоким содержанием сухого остатка.

Технологию Geotube® широко применяют в зарубежных странах: Швеции (обезвоживание почвы, загрязненной ртутью), Финляндии (очистка отстойника Каскинен), США (обезвоживание кислотосодержащих сточных вод обогатительного комбината, обезвоживание поточного шлама, очистка отстойника на ферме), Франции (очистка сточных вод), Голландии (обезвоживание в промышленности) и др.

Разнообразные по гранулометрическому составу грунты, минеральные и органические отходы после обезвоживания в контейнере Geotube® представляют собой тугопластичный или сыпучий материал, удобный для дальнейшей планировки, погрузки, транспортировки или складирования, включая захоронение непосредственно по месту обезвоживания без вскрытия контейнера.

Контейнеры Geotube®, заполненные обезвоженным материалом, являются высокопрочными конструкциями, используемыми в строительстве различных грунтовых сооружений, устойчивых к ветровой и водной эрозии, на водных объектах, поли-

гонах, отвалах, в ландшафтном дизайне и других областях.

Технология Geotube® является в настоящее время одной из самых многофункциональных и эффективных технологий обезвоживания в мире. Сферами ее применения являются следующие:

1) очистка поверхностных водоемов от донных отложений: обезвоживание озерных и речных илов, загрязненных промышленными и коммунальными сбросами, водным транспортом, обезвоживание экологически чистых сапропелей для реализации в качестве удобрений; санитарное обслуживание рыбоводческих хозяйств;

2) расчистка резервуаров, шламонакопителей, иловых карт: обезвоживание шламовой пульпы для вывозки отхода к местам размещения и утилизации, обезвоживание шламовой пульпы для захоронения по месту производства работ;

3) отраслевое применение:
горнодобывающая промышленность: обезвоживание сырья и хвостов производства;

коммунальное хозяйство: обезвоживание водопроводного осадка и осадка сточных вод из песколовок и иловых карт;

топливно-энергетический комплекс: обезвоживание золы уноса и шлама; гражданское строительство: строительство дамб, защита мостовых конструкций, укрепление береговой полосы и предотвращение овражной эрозии, противопаводковые конструкции, магистральное строительство на заболоченной территории, ландшафтное строительство из илов и тонкодисперсных грунтов.

С целью очищения окружающей среды отходы, содержащиеся в водоемах, могут быть легко извлечены и обезвожены при помощи технологии Geotube® Dewatering. Это можно сделать прямо на месте нахождения отходов или в непосредственной близости от него с применением резервуара для обезвоживания, где контейнеры Geotube® укладываются один на один в целях экономии места. Контейнеры Geotube® изготавливаются различных размеров. Они эффективно задерживают даже опас-



Рис. 1. Процесс обезвоживания суспензии



Рис. 2. Заполнение контейнеров (мешков) Geotube® гидросмесью

ные вещества, существенно сокращая их объем и тем самым позволяя экономить больше средства на утилизации.

В горной промышленности сточные воды обогащательного производства (хвосты, флотации), угольный шлам и другие типы осадка могут быть отработаны с помощью экономичной технологии Geotube® Dewatering. Так как контейнеры Geotube® изготавливаются различных размеров, их легко расположить между существующими конструкциями, а потом убрать по окончании обезвоживания. Технология Geotube® Dewatering — более экономичная альтернатива механическим способам производства работ. Она позволяет сократить расходы на утилизацию за счет уплотнения твердого осадка при очень низких текущих затратах на обслуживание.

Отходы могут закачиваться непосредственно с производства, или, если используется очиститель/сгуститель, отходы сгущенного продукта могут направляться в контейнер Geotube®, что позво-

лит избежать использования дорогостоящего механического оборудования для обезвоживания. Мешки Geotube® могут использоваться для улавливания мелкодисперсных, илистых и глинистых веществ, содержащихся в хвостах флотации, после чего очищенную воду можно направить в резервуары или напрямую в водоем. Мешки Geotube® способны отделять и отфильтровывать мелкие фракции и производить утилизацию без экскавации и транспортировки. В некоторых случаях применяются специальные полимеры для хлопьеобразования, чтобы улучшить задержание твердых частиц и качество отфильтрованной воды.

Контейнеры Geotube® также могут быть использованы для строительства дамб и защитных берм из обезвоженных отходов производства.

Отходы электростанций, такие как зольная пыль и шлам, бывает трудно вывозить и обрабатывать. Однако простая и недорогая технология Geotube® Dewatering позволяет предприятиям лег-

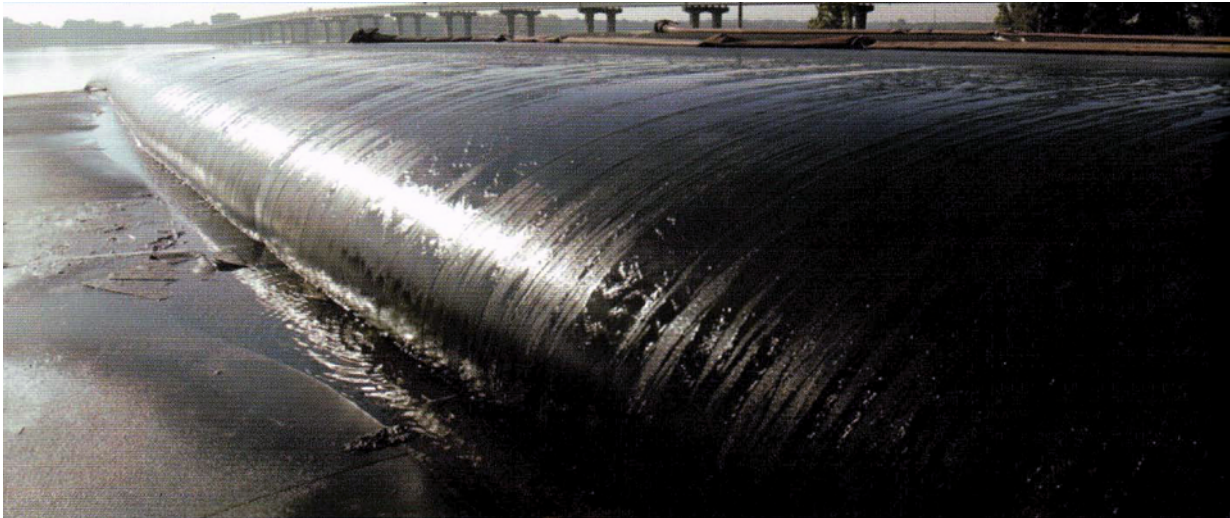


Рис. 3. Просачивание воды из контейнеров Geotube®



Рис. 4. Отгружаемый твердый материал из контейнера Geotube®

ко организовать хранение и вывоз таких отходов. Эта технология не требует больших первоначальных вложений, поэтому всегда можно подобрать необходимые объемы.

Технология Geotube® Dewatering надежно удерживает зольную пыль, предотвращая загрязнение атмосферы, происходящее при хранении золы в кучах на открытых площадках. Зола, обезвоженная в Geotube®, может использоваться впоследствии в качестве материала для отсыпки слоев основания в дорожном строительстве, а также в качестве защитных берм вокруг отстойников для увеличения их емкости. В большинстве случаев нет необходимости добавлять полимер в летучую золу, что делает процесс особенно простым и экономичным.

Отдельные поочередные этапы процесса обезвоживания суспензий в геотекстильных контейнерах Geotube® приведены на рис. 1 – 4.

Опытно-промышленные испытания обезвоживания шлама Раменского горно-обогатительного комбината

С целью обоснования технической целесообразности применения технологии и контейнеров Geotube® для повышения вмещающей емкости накопителей отходов обогащения кварцевого песка Раменского горно-обогатительного комбината, увеличения объема и качества воды в бессточной системе водоснабжения комбината, а также доведения жидких отходов (хвостов обогащения) до транспортабельного состояния с максимальным снижением объема утилизируемого отхода компанией ООО “Адмир Евразия” проведены опытно-промышленные испытания (ОПИ). Результатами ОПИ были заинтересованы ученые Московского государственного горного университета (МГГУ), которые занимаются вопросами изыскания вариантов обезвоживания добываемого сапропеля плавучими землесосными снарядами в содружестве с ООО “НПО Гольфстрим”.

Раменский горно-обогатительный комбинат (РГОК) находится на территории Раменского района Московской области, вблизи села Еганово. Хвостовое хозяйство РГОК, предназначенное для размещения жидких отходов (хвостов) обогащения кварцевого песка, расположено в непосредственной близости от обогатительной фабрики — не более 0,4 км.

Шлам обогащения кварцевого песка, размещаемый в хвостовом хозяйстве, самоуплотняется до залежи влажностью не ниже 68 % более чем за трое суток. Однако территории хвостового хозяйства не

достаточно для размещения всего образующегося за это время шлама. По этой причине предприятие РГОК заинтересовалось применением дополнительных методов обезвоживания, которые бы позволили решить проблему размещения производственных отходов.

ОПИ проводили с 8 по 12 августа 2011 г., на них присутствовали представители администрации РГОКа, руководство ООО “НПО Гольфстрим” (генеральный директор С. А. Иванов, зам. генерального директора С. М. Шгин), научные сотрудники МГГУ (доктор техн. наук И. М. Ялтанец, инженер В. А. Казаков).

В отчете о результатах ОПИ для шлама РГОК сделаны следующие выводы.

1. Шлам РГОК может быть обезвожен до влажности не выше 65 % в пределах суток с момента прекращения закачки; в режиме консолидации шламового тела за период не более календарного года при наличии фактора зимнего промораживания и оттаивания остаточная влажность шлама в контейнерах при “сухой” укладке (без подтопления основания — наличие капиллярного дренажа) составит порядка 40 % ($00\% \pm 5\%$ с. в.) по результатам лабораторного анализа проб шлама (моделирование зимнего промораживания и оттаивания), проведенного в сентябре 2011 г.

2. Эффективность задержания шлама в контейнере составляет $\geq 99,95\%$.

3. Обезвоживание шлама РКОГ в контейнерах Geotube® не представляет технических сложностей. Не требуется специальной подготовки персонала для обслуживания процесса обезвоживания и компактного складирования шламов в контейнерах Geotube®. Технологическое сопровождение может осуществляться разнорабочими и рабочими низкой квалификации под надзором одного подготовленного инженера-технолога.

4. Для обезвоживания шлама РГОК необходимо использовать флокулянт, оптимальная доза которого составляет 0,35 кг/т с. в.

5. Нарушение дозировки флокулянта не влечет существенных негативных последствий — фильтрующая способность контейнера Geotube® быстро восстанавливается, необратимой кольматации не происходит.

6. Анионный флокулянт отечественного производства “Праестол 2540” показал эффективность в тестах и в натуральных условиях эксплуатации при обезвоживании шлама РГОК.

7. Оптимальный режим заполнения контейнеров Geotube® шламом включает в себя три фазы: первичная закачка с подачей шлама в количестве 80 – 85 % от максимального вмещающего объема;

1-я подкачка шлама через 3 – 5 суток после окончания первичной закачки в количестве 15 % от максимального вмещающего объема;

2-я подкачка шлама не позднее 14 суток после окончания 1-й подкачки для максимального использования вмещающей емкости контейнера.

8. Возможно безостановочное заполнение контейнера Geotube® с использованием 95 % максимального вмещающего объема.

9. Подтверждена возможность высокопроизводительной закачки шлама в контейнер Geotube® — в ходе испытаний нагрузка на контейнер составляла порядка $60 \text{ м}^3/\text{ч}$, или, в приведении к удельной нагрузке на площадь фильтрации, до $1,2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$.

Таким образом, технология Geotube® обладает всеми необходимыми техническими признаками и технологическими преимуществами использования для компактного складирования шлама.

По производству работ имеется ряд необходимых рекомендаций.

1. В рамках ОПИ была продемонстрирована схема подключения контейнеров Geotube® к стационарному напорному пульпопроводу подачи пульпы от земснаряда к карте намыва при помощи гибкого рукава. Для заполнения контейнеров Geotube® предпочтительно использовать плоские рукава диаметром 100 – 150 мм.

2. Шлам можно подавать в контейнеры Geotube® по пульпопроводу непосредственно от земснаряда. При заполнении необходимо, чтобы скорость подачи шлама была достаточно высокой для избежания быстрого формирования плохо размываемых отложений шлама в точке подключения контейнера к пульпопроводу. Оптимальная гидравлическая нагрузка на один контейнер:

50 – 100 $\text{м}^3/\text{ч}$ для небольших контейнеров (периметр рукава 10,0 и 13,7 м);

200 – 400 $\text{м}^3/\text{ч}$ для крупных контейнеров Geotube® (периметр рукава 18,3 и 27,4 м).

3. В ходе ОПИ произведены вариации рабочей дозы флокулянта как целенаправленно, так и в результате технических сбоев:

1) отечественный анионный флокулянт “Праестол 2540” показал свою эффективность для обезвоживания шлама РГОК. Оптимальная доза флокулянта для обезвоживания шлама РГОК — 0,3 – 0,35 кг/т с. в.;

2) передозировка флокулянта не оказывает существенного влияния на водоотдающие свойства шлама, кольматации фильтрующей ткани в результате передозировки флокулянта не происходит;

3) недостаточность дозировки или временное прекращение подачи флокулянта приводит к снижению удерживающей способности контейнера



Рис. 5. Состав станции приготовления и дозирования флокулянта для кондиционирования шлама

(проскок твердой фазы шлама сквозь геотекстильную оболочку контейнера), при возобновлении оптимального режима дозировки контейнер возвращается в штатный режим работы;

4) эффективное обезвоживание (в данном случае эквивалентно эффективному задержанию) шлама песков при дозе менее 0,2 кг/т с. в. маловероятно.

4. В процессе заполнения контейнера Geotube® шлам быстро отдает свободную воду до влажности $\approx 60 - 62\%$. В течение суток выходит 90 – 95 % воды, содержащейся в пульпе. Дальнейшее отделение влаги, представляющей собой капиллярную (вторичную) воду, происходит в пределах 30 дней.

На стадии вторичной консолидации шлама, при которой происходит выделение тонкокапиллярной (третичной) влаги, от обезвоженного шлама отделяется не более 1,5 – 2 % воды от ее исходного содержания в шламовой пульпе в течение первого месяца. Дополнительное отделение воды возможно только в результате промораживания и оттаивания.

По результатам лабораторного анализа (моделирование цикла промораживания и оттаивания), проведенного в сентябре 2011 г., из шлама получено шламовое тело с содержанием твердой фазы 57 %. Однако в абсолютном выражении это количество воды не превышает 3 – 5 % от исходного содержания воды в шламовой пульпе. В то же время по отношению к шламовому телу до промораживания объем тела после схода “талой” (выкристаллизовавшейся) воды сокращается на 20 – 30 %.

Основное оборудование, материалы и сооружения технологического комплекса Geotube®, принятые для обезвоживания шламов РГОК (рис. 5 – 12)

1. Геотекстильные контейнеры Geotube®, модель GT 500 D — 1 ед.:



Рис. 6. Запорная арматура на рукавах подачи кондиционированной пульпы

периметр рукава 10 м, длина 5 м;
тип подключения — GeoPort®;
масса незаполненного контейнера — 28 кг;
размер контейнера в разложенном состоянии — 5 × 5 м, в максимально заполненном состоянии — 4,25 × 4,25 м;

максимальная высота подъема при заполнении — 1,80 м;

номинальный вмещающий объем — 25 м³.

2. Станция приготовления и дозирования флокулянта (СПДФ), в том числе:

два растворных бака с рабочим объемом 1 м³ каждый (цилиндрический рабочий объем $\varnothing 1,13 \times h 1,18$ м);

лопастная низкооборотная (60 об/мин) электро-мешалка 0,37 кВт;

насос-дозатор — плунжерный насос “Seko”; 0,55 кВт;

электросиловой щит для вкл/откл лопастной мешалки растворного бака и насос-дозатора;



Рис. 7. Исходная разводка подающих коммуникаций — запитка контейнера от берегового трубопровода земснаряда



Рис. 8. Запорная арматура на рукавах подачи кондиционированной пульпы

гибкий шланг подачи оборотной (технической) воды на СПДФ (dy 25 ≈ 10 м);
фитинги и запорная арматура.

3. *Коленчатый миксер* — гидравлический смеситель dy 100.

4. *Трубные коммуникации, фитинги и запорная арматура:*

штатный стационарный напорный пульпопровод Ø500 с давлением в точке подключения порядка 4 ± 1 атм.;

подающий пульпопровод: патрубок на штатном пульпопроводе с задвижкой и плоским рукавом dy 100;

магистральный трубопровод кондиционированного шлама (сталь dy 100, $L = 6$ м);

распределительное устройство на магистральном трубопроводе для подачи кондиционированной шламовой пульпы в контейнеры и на контрольный сброс (dy 100);

питающие плоские рукава (dy 100; 6 м);



Рис. 10. Контейнер Geotube® на момент прекращения закачки (12.08.2011)



Рис. 9. Ввод питающего рукава в контейнер

запорные устройства (шаровой кран) для переключения потоков шламовой пульпы;
сбросной рукав для контроля качества кондиционированной пульпы (dy 100; 6 м).

5. *Дренажная площадка:*

спланированное естественное супесчаное основание (намывной пляж) — 7×7 м;

отвод фильтрата через водосбросной трубопровод и далее по рельефу пляжа;

приемник фильтрата — накопитель жидких отходов обогащения кварцевого песка.

Водоснабжение для приготовления рабочего раствора флокулянта производилось посредством бензиновой мотопомпы производительностью до $7 \text{ м}^3/\text{ч}$ по гибкому шлангу диаметром 25 мм, длиной 10 м). Водозабор осуществлялся из накопителя жидких отходов обогащения кварцевого песка.

Забор шламовой пульпы проходил из патрубка dy 100, установленного на стационарном пульпопроводе dy 500 подачи шлама от земснаряда, расположенного в накопителе жидких отходов обогащения кварцевого песка к карте намыва, проложенном





Рис. 11. Контейнер Geotube® на промежуточных стадиях консолидации



Рис. 12. Контейнер Geotube® на стадии глубокой консолидации (30.09.2011)

в непосредственной близости от места проведения ОПИ. Следует отметить, что для более качественного смешения исходной пульпы с флокулянтom требуется ее разбавление. Степень разбавления определяется в ходе наладки технологического комплекса. В ходе проведения ОПИ влажность исходной пульпы на начальном этапе составляла 91 – 93 %. Для улучшения взаимодействия исходной пульпы с флокулянтom влажность была повышена до 96 – 97 %.

Гранулометрический анализ натурального шлама был выполнен из отобранного 12 августа 2011 г. образца из трубопровода подачи в контейнер до точки ввода реагента. Результаты анализа приведены в табл. 1.

Внешний вид шлама подтверждает его тонкодисперсный состав: суспензия не склонна к расслаиванию в течение многих часов. После ввода флокулянта расслоение наступает практически мгновенно: за 10 – 15 с в лабораторном сосуде образуется хорошо структурированный хлопок, кото-

рый хорошо отдает воду и легко сгущается. Расход анионного флокулянта для кондиционирования шлама РГОК ($\approx 0,35$ кг/т с. в.) близок к предельному значению для тонкодисперсных глин однородного состава; это также указывает на то, что шлам в основе своей есть аллювиальная глина, в которой зернистая фракция представлена минорными включениями.

Т а б л и ц а 1

Размер частиц, мкм	% содержания
0 – 0,5	3,99
0,5 – 1	6,98
1 – 5	43,37
5 – 10	26,17
10 – 50	19,04
50 – 100	0,45

Т а б л и ц а 2

Дата замеров	Ширина, м	Длина, м	Высота, м
30.09.2011	4,7	4,7	0,4

Кондиционирование тонкодисперсных суспензий, в частности шламов РГОК, полимерным флокулянтom является обязательным условием осуществления интенсивного процесса обезвоживания как на аппаратах, так и в геотекстильных контейнерах. Флокулянты “Праестол” производителя “Ашленд Евразия” ранее на Раменском ГОКе не применялись. По завершении монтажных работ к 14:00 8 августа 2011 г. было проведено пробное тестирование флокулянта “Праестол 2540”. Оно показало, что “Праестол 2540” эффективно вступает во взаимодействие со шламом. Оптимальная дозировка составила 0,35 кг/т с. в. Необходимо отметить, что для шлама РГОК ярко выражена предельно допустимая минимальная доза флокулянта (0,2 кг/т с. в.), ниже которой обработанный полимером шлам сохраняет гелеподобную структуру, не склонную к интенсивной водоотдаче.

К концу рабочего дня 8 августа 2011 г. при помощи СПДФ был подготовлен рабочий раствор флокулянта “Праестол 2540” с концентрацией 0,5 % (5 кг/м³) в объеме 1 м³.

Фактический расход флокулянта в ходе производства работ составил 0,4 кг/т с. в. при явной передозировке флокулянта из-за нестабильности концентрации подаваемой земснарядом пульпы.

Заполнение контейнера шламом проводилось в течение одного рабочего дня с технологическими перерывами, связанными с приготовлением раствора флокулянта и технологическими остановками в подаче шлама по достижению контейнера максимальной высоты. После заполнения контейнера шламом к 16:00 12 августа 2011 г. шламовое тело вошло в режим консолидации. На момент прекра-

щения заправки было получено шламовое тело объемом порядка 28 м³, максимальная высота тела по центру составляла 190 см. После цикла обезвоживания в течение одного календарного месяца высота шламового тела снизилась до 40 см (табл. 2).

Дополнительная информация о технологии Geotube®

Geotube® — технологический процесс гравитационного обезвоживания разнообразных по происхождению суспензий (пульпа, шлам, осадок, ил) в контейнерах Geotube®, которые изготовлены из тканого геотекстильного (полипропилен) материала Geolon® высокой прочности с уникальными фильтрационными характеристиками и удерживающей способностью, что обеспечивает беспрецедентную производительность без значимых капитальных затрат — получение до 1800 м³ обезвоженного материала в одном контейнере. Производительность и требования к составу пульпы определяют земснаряд, насос, пульпопровод, доступная площадь для размещения комплекса, но не контейнеры Geotube®, что принципиально отличает эту технологию от аппаратных методов обезвоживания.

Длина контейнера Geotube®: от 5 до 60 п. м с шагом 5,0 п. м для контейнеров GT 500 D P27,4 м; от 5 до 100 п.м. с шагом 5,0 п. м для контейнеров GT 500 D P10,0 м.

Принцип действия технологии Geotube®: заполнить контейнер (заторцованный с двух сторон рукав) из фильтрующей ткани водной суспензией и дожидаться, пока через поры выйдет вся вода, которая может отделиться от твердых частиц. При заполнении контейнера зернистой суспензией (песком) свободная вода отходит практически мгновенно — полностью в пределах календарных суток. Для быстрого и полного выхода влаги из тонкодисперсных суспензий, к которым относятся илы,

Т а б л и ц а 3

Типоразмеры контейнеров Geotube® GT 500 D, поставляемые на территорию РФ

Периметр контейнера Geotube®, м		Фланцевое подключение GeoPort®		Подключение через тканый рукав Filling Funnel®		
максимальный вмещающий объем, м ³ /п.м.	максимальная высота заполнения, м	ширина при максимальном заполнении, м	максимальный вмещающий объем, м ³ /п.м.	максимальная высота заполнения, м	ширина при максимальном заполнении, м	
10,0	6,0	2,0	4,25	5,6	1,8	4,25
13,7	9,7	2,2	6,05	8,7	1,9	6,05
18,3	14,5	2,3	8,30	13,0	2,0	8,30
27,4	24,4	2,4	12,70	22,7	2,2	12,70

осадки, шламы, их обрабатывают кондиционирующим реагентом — флокулянт.

Разнообразные по гранулометрическому составу грунты, минеральные и органические отходы после обезвоживания в контейнере Geotube® представляют собой плотное (тугопластичное) тело размером до 2,4 × 12,7 × 60 м, которое удобно для планировки, погрузки, транспортировки или складирования, включая захоронение непосредственно по месту обезвоживания без вскрытия контейнера. Грунтовое тело, сформированное в контейнере Geotube®, не способно принимать воду извне, но беспрепятственно отдает влагу.

Технологию Geotube® можно применять в промышленных и полевых условиях эксплуатации без ограничений в части воздействия факторов окружающей среды: температура от + 60 до – 40 °С без укрытия от инсоляции (ультрафиолета); в сухую и дождливую погоду.

Контейнеры Geotube®, заполненные обезвоженным материалом, являются высокопрочными и в ряде случаев незаменимыми крупномерными конструкциями для строительства грунтовых сооружений, устойчивых к ветровой и водной эрозии: на водных объектах, оврагах, полигонах, отвалах, в ландшафтном дизайне и т.д.

Технология Geotube® отличается от технологии налива и естественной сушки на иловых картах следующим:

1. Резкое сокращение площадей промышленной площадки по сравнению с использованием карт налива. Практикуемые в процессах гидромеханизации карты намыва пригодны только для намыва песка: все тонкодисперсные частицы, т.е. собственно ил, поступают обратно в процесс с возвратными водами. Технология Geotube® обеспечивает эффективность задержания твердофазных частиц в контейнере на уровне 99,55 – 99,8 %.

2. Несоизмеримо более высокая санитарная гигиена и эстетика производства работ.

3. Оперативное разворачивание технологического комплекса Geotube® и столь же оперативное сворачивание технологической обвязки. Оставшиеся на консолидацию (выдержку вылеживанием) контейнеры Geotube® не нарушают внешний вид территории.

4. Устойчивость контейнеров Geotube® ко всем механическим включениям, подверженным гидротранспорту по пульпопроводу. Абразивный износ, засоры и поломки из-за подачи растительного и бытового мусора, иных включений — неотъемлемые атрибуты эксплуатации обезвоживающего оборудования, что для контейнеров Geotube® принципиально исключено.

5. Специальной подготовки персонала для обслуживания процесса обезвоживания и компактного складирования шламов в контейнерах Geotube® не требуется. Технологическое сопровождение может осуществляться разнорабочими и рабочими низкой квалификации под надзором одного подготовленного инженера-технолога.

6. Устойчивость грунта, обезвоженного в контейнерах Geotube®, к ветровой и водной эрозии. Отсутствие эффекта аккумуляции атмосферных осадков — неотъемлемый атрибут хранения механически обезвоженных осадков в залежи.

7. Возможность конструирования из отложений малых и средних ландшафтных форм по месту обезвоживания, что невозможно осуществить из механически обезвоженных донных отложений, склонных к оплыванию и размыву.

8. Компания, использующая технологию Geotube® для оказания услуг по обезвоживанию шлама, не несет капитальных затрат в обезвоживающее оборудование: осуществляется закупка одноразового обезвоживающего оборудования, т.е. контейнеров Geotube®, для конкретного объекта и объема работ, в том числе, на средства прямого заказчика.

9. Производительность обезвоживающего комплекса из контейнеров Geotube® всегда будет соответствовать той производительности, которая нужна или может быть обеспечена средствами гидромеханизации.

Выводы

Технологию Geotube® Dewatering можно успешно применять не только в горной промышленности, но и в гидротехническом строительстве: при расчистках отводящих и подводящих каналов, рек в целях уменьшения площадей складирования отходов; также для предотвращения ущерба от штормов, защиты окружающей среды, строительства различных гидросооружений и даже постройки искусственных островов. Контейнеры Geotube® также могут быть использованы для строительства дамб и защитных берм из обезвоженных отходов производства. Технология Geotube® экономична, долговечна, проста при монтаже и эксплуатации, что по праву делает ее одной из самых многофункциональных и эффективных технологий обезвоживания в мире.

Список литературы

1. *Tencate Geotube®*. Обезвоживание промышленных отходов. Tencate Geosynthet. Industrial Fabrics. Grass.
2. *АДМИРЕВРАЗИЯ*. Геосинтетика и экологические технологии. www.admir-ea.ru.

Вероятностная оценка риска аварий плотин по результатам их мониторинга и обследований

Иващенко И. Н. доктор техн. наук (ООО “НИИЭС”),
Радкевич Д. Б., инженер, Иващенко К. И., кандидат техн. наук
(НТЦ “Безопасность гидротехнических сооружений”)

Рассматривается вероятностная оценка риска аварий плотин по результатам их мониторинга и обследований.

Ключевые слова: методика оценки уровня безопасности и риска аварии эксплуатируемых плотин, статистический анализ результатов обследований плотин, роль страхования в обеспечении безопасности плотин.

В настоящее время накоплен значительный опыт применения Федерального закона № 117-ФЗ “О безопасности гидротехнических сооружений”, принятого в 1997 г. Разработаны процедуры контроля и оценки состояния плотин, которые включают следующие этапы: периодические комиссионные обследования плотин, разработку и экспертизу деклараций безопасности и критериев безопасности, оценку ущерба от возможной аварии плотины. Эффективным средством обеспечения безопасности плотин является страхование рисков, поэтому важным этапом в сфере обеспечения безопасности плотин явилось принятие Федеральных законов № 225-ФЗ “Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте” и № 226-ФЗ “О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с принятием Федерального закона “Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте”.

Важными условиями реализации требований указанных законов применительно к гидротехническим водоподпорным сооружениям (далее — плотинам) являются: объективная оценка состояния и уровня безопасности эксплуатируемых плотин с последующим определением “риска” аварии; обоснованная и “прозрачная”, т.е. логичная и чёткая, процедура назначения страховых платежей в зависимости от состояния и уровня безопасности плотины. Страховые суммы, определенные из указанных условий, не могут превышать размера финансового обеспечения гражданской ответственности, устанавливаемого в соответствии с требованиями Федерального закона “О безопасности гидротехнических сооружений”.

Методика оценки уровня безопасности и риска аварии эксплуатируемых плотин

1. Факторы, определяющие возможность аварии плотины в процессе эксплуатации. В процессе эксплуатации ухудшается состояние плотины и, соответственно, возрастает риск аварии (под риском далее понимается вероятность события, которое может причинить вред). Возможными причинами этого процесса являются: изменение свойств материалов плотины и грунтов (пород) основания; увеличение уровня возможных природных воздействий (в том числе, из-за их неточного определения на стадии проекта); нарушение правил эксплуатации; человеческий фактор (низкая квалификация персонала) и т.д. При оценке риска аварии необходимо учитывать уровень готовности эксплуатирующей организации к предупреждению, локализации и ликвидации чрезвычайной ситуации, которая может произойти в результате аварии. Традиционные системы мониторинга сооружений и оснований позволяют получить важную количественную оценку состояния плотины. Однако многие факторы безопасности не имеют четких количественных показателей и могут быть качественно оценены на экспертной основе.

Специальные правила разработаны для анализа и учета исходной (неопределенной) информации качественного характера [1, 2, 3], включая данные визуальных наблюдений и иных экспертных оценок состояния сооружения. Некоторые понятия и положения теории нечётких множеств, а также лингвистический подход были применены для обработки неопределённостей. Федеральный закон “О безопасности гидротехнических сооружений” и действующие в России документы технического регулирования требуют учитывать при оценке уровня безопасности количественную информацию о состоянии сооружения, получаемую по данным инструментальных наблюдений, а также качествен-

ную информацию. Фактор безопасности “уровень безопасности сооружения” использован в качестве лингвистической переменной и характеризуется значениями “нормальный”, “неудовлетворительный” (потенциально опасный) и “аварийный”.

Уровень безопасности сооружения диагностируется как “нормальный”, если выполнены основные требования проекта, нормативных документов и правил, а отклонения от указанных требований могут быть оперативно устранены при техническом обслуживании плотины. “Неудовлетворительный” (потенциально опасный) уровень безопасности имеет место, когда сооружение не полностью отвечает требованиям проекта, нормативных документов и правил, но его дальнейшая эксплуатация не приводит к непосредственной угрозе развития аварийной ситуации; однако при этом для выполнения указанных требований необходимо выполнение поверочных расчётов, специальных обследований и исследований, а также значительного объема ремонтных работ. “Аварийный” уровень безопасности сооружения диагностируется при возникновении угрозы прорыва напорного фронта и необходимости осуществления оперативных мер по предупреждению аварии (сработка водохранилища и другие мероприятия).

2. Методика детерминированной оценки риска аварии. Для диагностики состояния и оценки уровня безопасности сооружений введен специальный показатель — индекс I [1, 2, 3]. Индекс I определяет отклонение состояния эксплуатируемого гидротехнического сооружения от требований нормативных документов и проекта и в детерминированной форме характеризует риск аварий [1, 4]. По аналогии с известными предложениями ICOLD [7] для определения индекса I введена количественная шкала экспертных оценок индекса I от 0 до 6. Значения индекса I , равные 3 и 5, соответствуют граничным значениям критериев безопасности для трёх упомянутых выше уровней безопасности сооружений. При этом все доступные количественные и качественные показатели (в том числе полученные на экспертной основе) приводятся к единой шкале. В пределах каждого диапазона изменения индекса I (от 0 до 3, от 3 до 5 и от 5 до 6) используется следующая формула [1, 2, 3]:

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

где I_i — индексная оценка количественных и качественных показателей (как правило, диагностических показателей [4] уровня безопасности сооружения, по которым устанавливаются критерии безопасности), соответствующих границам диапазона,

в котором находится значение I_i ; q — параметр (обычно назначается на экспертной основе в диапазоне от 0,1 до 0,15), применение которого (в случае приближения нескольких индексных оценок к I_{\max}) позволяет, в соответствии с идеологией теории нечётких множеств, получать оценки, соответствующие более опасному состоянию сооружения; \prod_i^n —

символ математической операции (произведения).

Вывод уравнения (1) приведен в работе [3].

Применение уравнения (1) позволяет учитывать все оценки индекса I в пределах каждого диапазона и при этом получать в итоге более высокие оценки индекса I . В этом смысле формула (1), выведенная на основе использования одной из формул теории нечётких множеств, действует аналогично известной Байесовской оценке вероятности.

3. Методика вероятностной оценки риска аварии. Существенным преимуществом применения для оценки уровня безопасности плотины единого показателя в форме индекса I является возможность последующей оценки риска аварии не только в детерминированной, но и в вероятностной форме. Как известно, вероятность аварии является комплексной характеристикой, позволяющей оценивать состояние сооружения и его безопасность в наиболее полной и объективной форме. Вероятностная оценка риска необходима также и для обоснования размера страховых платежей.

Вероятность аварии может быть представлена в виде суммы

$$p = p_1 + p_2, \quad (2)$$

где p_1 — вероятность аварии плотины, определяемая на стадии проектирования плотины, исходя из требований нормативных документов и на основании имеющейся информации о параметрах воздействий и свойствах материалов плотины и пород основания; p_2 — величина, характеризующая увеличение вероятности аварии в процессе эксплуатации (далее — вероятность аварии p_2), связанная с практически неизбежным несовпадением (степень такого несовпадения носит случайный характер) природных условий створа, физико-механических свойств строительных материалов и грунтов оснований, условий строительства и эксплуатации с данными, использованными в проекте. В настоящее время разработано много способов определения вероятности p_1 [5, 6, 8]. Методика определения вероятности p_2 менее разработана. Из-за сравнительно небольшого количества плотин и малого числа аварий отсутствует представительная статистика аварий, а в ряде случаев и достаточная достоверность результатов анализа причин аварий. На осно-

ве имеющейся статистики аварий невозможно установить зависимость вероятности аварии от состояния плотины, установленного в период обследования. Предлагаемая в данной статье методика определения вероятности p_2 основана на использовании статистического анализа результатов обследования плотин в процессе их эксплуатации.

Факторы, которые приводят к увеличению вероятности аварии плотины в процессе эксплуатации, могут быть незаметными (или незамеченными) как при плановых комиссионных обследованиях, так и в процессе регулярных осмотров сооружений, которые с большей или меньшей регулярностью ведутся службами эксплуатации. Несмотря на постоянное развитие и высокий уровень современных систем мониторинга сооружений, указанные факторы также могут быть не выявлены. Этими обстоятельствами, а также различием мнений экспертов, участвующих в обследованиях, определяется случайная изменчивость индекса I , введенного для оценки состояния сооружений.

Статистика аварий гидротехнических сооружений России (как и мировая статистика) в основном имеет дело с сооружениями, большая часть которых построена в последние 40 – 50 лет. Эти статистические данные являются недостаточно представительными, в том числе из-за статистической неоднородности объектов выборки (различия в природных условиях и конструктивных особенностях сооружений, в свойствах строительных материалов и в других важных характеристиках). Вместе с тем, очевидна связь уровня безопасности сооружения и характеризующего его индекса I с вероятностью аварии, поэтому вероятность аварии плотины в стадии эксплуатации может быть определена на основе статистической обработки результатов комиссионных обследований, представленных в форме индекса I . Каждое обследование (или индивидуальное мнение независимого эксперта) рассматривается как независимое статистическое испытание (случайное событие), а его результат представляется в числовой форме — в виде индекса I . Функция распределения индекса I для конкретного сооружения используется для дальнейшего прогноза вероятности аварии. Оценка параметров функции распределения осуществляется на основе статистической обработки результатов обследования (или обследований и экспертиз), представленных в форме индекса I .

Статистический анализ результатов обследований плотин

Статистический анализ результатов обследований ряда плотин России выполнен для решения следующих основных задач: определения вида

функции распределения индекса I , получения оценок параметров функции распределения, формулирования рекомендаций по оценке вероятности аварии плотин на основе их обследований в процессе эксплуатации.

1. Определение вида функции распределения индекса I . Сводная выборка индекса I составлена для 173 объектов: высота плотин варьирует от 4 до 82 м, срок эксплуатации — от 2 до 68 лет. В выборку включены объекты, по которым исходные данные были доступны в объеме, достаточном для оценки индекса I . При формировании сводной выборки наряду с актами обследований использованы оценки состояния плотин, приведенные в декларациях безопасности и экспертных заключениях.

Примеры принятых по результатам обследований оценок индекса I в зависимости от характеристик состояния плотин представлены в табл. 1.

Обобщение результатов обследований ряда плотин России, представленное, в частности, в табл. 1, показывает, что на основе единого показателя в форме индекса I возможны содержательные оценки нарушений, повреждений, отклонений от требований проекта, норм и правил в процессе эксплуатации. Индекс I является объективной характеристикой изменения состояния плотины и уровня её безопасности. Следует отметить, что представленный в таблице перечень нарушений, повреждений, отклонений от требований проекта, норм и правил не является исчерпывающим. Используемая при формировании табл. 1 сводная выборка результатов обследований не включает, например, изменений параметров природных воздействий (сейсмических, гидрологических, ветроволновых, температурных). Однако факторы безопасности, приведенные в табл. 1, могут быть использованы при обследованиях конкретных плотин для оценки их состояния и уровня безопасности, а также как основа для составления более полного перечня факторов безопасности.

Первоначальные оценки индекса I скорректированы в процессе подготовки исходных данных для статистического анализа. При этом использована методика парных сравнений объектов. Детальный статистический анализ выполнен для выборки, в состав которой включены значения индекса I , полученные для 130 водоподпорных сооружений первого и второго классов, входящих в комплексы сооружений гидравлических и тепловых электростанций России (грунтовые и бетонные плотины, а также ограждающие дамбы крупных золошлакоотвалов). Все эти сооружения относятся к “большим плотинам” в соответствии с классификацией ICOLD. В ходе анализа использованы программы статистической обработки данных из состава Microsoft Excel 2003. Результаты анализа представлены на рисунке.

Оценки индекса I	Нарушения, повреждения, отклонения от требований проекта, норм и правил, обнаруженные при обследованиях
2	Локальные деформации гребня и откосов грунтовых плотин, в том числе связанные с инфильтрацией и уплотнением грунта. Засорение водоотводящих канав и дренажных лотков грунтовых плотин. Ограничение пропускной способности водосбросов из-за препятствий в нижнем бьефе. Местные повреждения креплений отводящего канала и монолитных стенок водосбросов, в том числе отдельные неглубокие раковины с частично оголенной арматурой, фильтрационные протечки в обход закладных частей затворов. Невыполнение части предписаний комиссий, в том числе в части уточнения расчётных расходов паводков, параметров сейсмических воздействий и др. Нарушения планов ремонтов. Неполная комплектация технической документации
3	Достижение одним или несколькими диагностическими показателями критерия безопасности К1. Необходимость ремонта дренажной системы. Неравномерная осадка и пониженные отметки гребня грунтовых плотин и дамб, повреждения и частичные разрушения крепления откосов. Локальные разрушения бетона водосливных граней, разрушение поверхностного слоя бетона в зоне переменного уровня воды. Коррозия металлоконструкций затворов водосливной плотины. Пониженная надёжность механического и электрического оборудования, отсутствие или неработоспособность резервных источников питания подъемных устройств затворов, снижение прочности и недопустимая вибрация технологических люков и крышек турбин в напорных водоводах гидроэлектростанций
3,5	Достижение оценки одного или нескольких диагностических показателей индекса I = 3,5. Отказ дренажной системы, локальные выходы фильтрационных вод на низовых откосах грунтовых плотин и ограждающих дамб ЗШО, сопровождаемые неорганизованным отводом фильтрующей воды. Нарушение проектного заложения откосов, дамб. Низкая сдвиговая устойчивость грунтовой пригрузки экрана плотины. Недостаточное превышение гребня грунтовой плотины или её противофильтрационного элемента над уровнем воды при форсированном подпорном уровне. Образование трещин, сколов, глубоких раковин, разрушение бетона, обнажение арматуры бычков и водобоя водопропускных сооружений. Выходы воды по вертикальным трещинам, строительным и температурным швам на низовой грани бетонных плотин. Низкая эффективность цементационной завесы в основании плотины. Образование воронок размыва в нижнем бьефе водосброса. Необходимость ремонта затворов, поврежденных бычков, устоев и других конструкций водосброса, водосливных граней бетонного водослива, замены или реконструкции механического оборудования водослива. Необходимость замены электрооборудования подъемных механизмов затворов водосливной плотины, необходимость ремонта подкрановых и подъездных путей. Ограничение максимального расхода водосливной плотины из-за ненадежной работы боновых заграждений и образования заломов
4	Достижение оценки одного или нескольких диагностических показателей индекса I = 4. Выход из строя (или отсутствие) дренажной системы, сосредоточенный выход фильтрационных вод на низовой откос, Недостаточная устойчивость откосов, развитие процессов разрушения гребня и откосов грунтовых плотин и ЗШО с образованием многочисленных продольных и поперечных трещин, локальных обрушений и оползней. Волновая переработка верхового откоса плотин. Недостаточное (ниже проектного) превышение гребня плотины над НПУ. Пропуск поверочного расхода при форсировке уровня водохранилища до отметок, превышающих отметку ФПУ. Наличие многочисленных повреждений, связанных с пропуском нерасчётного паводка и превышением поверочного расчётного расхода: локальные размывы низового откоса плотин, образование трещин, проломов понура и рисбермы плотины. Выработка ресурса и необходимость замены подъёмных механизмов затворов. Ограничение максимального расхода водосливной плотины в связи с частичным выходом из строя конструктивных элементов водосливов и водовыпусков
4,5	Достижение оценки одного или нескольких диагностических показателей индекса I = 4,5. Выходы фильтрационных вод на низовых откосах грунтовых плотин и ограждающих дамб ЗШО, сопровождаемые суффозией, протечки воды в бортовых примыканиях плотин. Интенсивные осадки основания и гребня грунтовых и бетонных плотин. Оседание земной поверхности, в том числе из-за наличия горных выработок, весьма значительная осадка гребня земляной плотины. Нарушение проектного заложения, оползание откосов грунтовых плотин и дамб на участках протяжённостью до нескольких десятков метров, в том числе с частичным захватом гребня. Ограничение максимального расхода водосливной плотины из-за разрушений поверхности водослива с обнажением рабочей арматуры, пониженной работоспособности, частичного выхода из строя, в том числе из-за засорения топляками, и необходимости замены основных и аварийно-ремонтных затворов и их механического и электрического оборудования. Несоответствие пропускной способности водопропускных сооружений требованиям современных нормативных документов

Оценки индекса I	Нарушения, повреждения, отклонения от требований проекта, норм и правил, обнаруженные при обследованиях
5	Достижение одним или несколькими диагностическими показателями критерия безопасности K2. Повышение водопроницаемости противофильтрационных элементов в теле и основании плотин, повышение поверхности депрессии выше проектного положения, рост градиентов фильтрационного давления на входе в дренаж, повышение фильтрационных расходов с тенденцией к дальнейшему росту. Выходы фильтрационных вод на низовых откосах грунтовых плотин и дамб при отсутствии или неэффективной работе дренажных устройств, увеличение интенсивности суффозионных процессов. Отсутствие стабилизации или увеличение интенсивности осадки основания и гребня грунтовых и бетонных плотин. Низкая отметка гребня плотины или верха противофильтрационного элемента (превышение над уровнем верхнего бьефа существенно ниже проектного значения). Угроза прорыва напорного фронта, необходимость понижения уровня верхнего бьефа. Переувлажнение и промерзание низового откоса, образование наледей в местах выходов фильтрационных вод, появление опасности обрушения масс промороженного грунта с угрозой потери устойчивости низового откоса. Увеличенная по сравнению с проектом крутизна откосов дамб, развитие продольных и поперечных трещин на гребне и откосах дамб, локальное оползание откосов грунтовых плотин и дамб частичный размыв гребня и откосов на одном или нескольких участках. Выход из строя водосбросных и водопропускных сооружений, затворов и их механического и электрического оборудования, снижение пропускной способности сооружений по условиям состояния берегов и креплений русла в нижнем бьефе, недопустимых размывов dna вблизи сооружений, повреждение водопропускных сооружений, затворов и их механического и электрического оборудования либо резкое снижение пропускной способности сооружений нижнего бьефа (в том числе из-за их разрушения) или русел рек

Примечания.

- а) любое из перечисленных в таблице 1 нарушений и повреждений оценивается индексом I, представленным в первом столбце таблицы, а их совместный учёт приводит к увеличению интегральной оценки индекса I в соответствии с формулой (1);
- б) при определении индекса I учитываются и более мелкие повреждения и отклонения, если их индексные оценки находятся в пределах соответствующего диапазона;
- в) неблагоприятные изменения характеристик гидрологических, сейсмических, ветроволновых и температурных воздействий, свойств материалов плотин или пород оснований, а также отсутствие критериев безопасности или результатов мониторинга плотины (в том числе вследствие отсутствия или неработоспособности системы КИА, предусмотренной проектом) приводят к оценке “неудовлетворительный уровень безопасности” (индекс I > 3). Эта оценка может быть изменена экспертизой только после выполнения поверочных расчетов и специальных исследований, ремонтных и организационных мероприятий;
- г) в таблице приведены средние значения индекса I, в ходе обследований и экспертиз возможны значительные расхождения экспертов в оценках состояния плотины — это обстоятельство также определяет случайный характер индекса I.

Сопоставление гистограммы относительных частот индекса I и теоретического графика нормального закона свидетельствует об их хорошем соответствии — критерий согласия Пирсона удовлетворяется с большим запасом: “экспериментальное” значение

(т.е. полученное на основе статистической обработки выборки индекса I) $X^2 = 5,99$ значительно меньше критического значения $(X^2)_{кр} = 16,92$ (уровень значимости 5 % при девяти степенях свободы). Аналогичные результаты получены для выборки I большего объема ($n = 173$). Полученные результаты дают основание предполагать применимость нормального закона распределения индекса I и для каждой конкретной плотины.

Т а б л и ц а 2

Математическое ожидание индекса I	Объём выборки n	Стандартное отклонение индекса I	Вероятность наступления аварийного состояния p_2
1,43	28	0,75	$2 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-6}$
2,74	88	0,52	$3 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-5}$
3,96	37	0,49	$7 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-2}$

Примечания.

- а) представлены вычисленные в соответствии с нормальным законом вероятности того, что индекс I превысит значение 5, т.е. границу между “неудовлетворительным” и “аварийным” уровнями безопасности плотин;
- б) диапазон представленных вероятностей соответствует доверительной вероятности 95 %;
- в) представлены оценки вероятности наступления аварии за весь период эксплуатации сооружения, предшествующий обследованию. Эти данные могут использоваться для ориентировочных оценок.

2. Оценка параметров функции распределения. Для получения предварительных оценок параметров функции распределения индекса I из состава ранее рассмотренной выборки для “больших” плотин сформированы выборки для нескольких диапазонов индекса I: менее 2 ($n = 28$); от 2 до 3,5 ($n = 88$); от 3,5 до 5 ($n = 37$). Имеющаяся практика экспертных оценок индекса I, выполняемых для какой либо конкретной плотины, показывает, что в этих диапазонах могут варьировать оценки отдельных экспертов. Результаты статистической обработки указанных выборок представлены в табл. 2.

3. Рекомендации по оценке вероятности аварии. Могут быть сформулированы следующие рекомендации по практическому применению пред-

ставленной методики оценки вероятности аварии плотин p_2 на основе их обследований в процессе эксплуатации:

при вычислениях вероятности наступления аварии на начальном этапе среднее значение индекса I используется как параметр нормального закона. Это значение должно быть получено в результате обследования в виде согласованной оценки независимых квалифицированных экспертов. При вычислениях вероятности p_2 могут быть использованы значения стандартного отклонения, представленные в табл. 2 (для соответствующих средних значений индекса I). Годовая вероятность p_2 определяется путём деления вычисленной вероятности на срок эксплуатации сооружения;

на тех сооружениях из состава гидроузла, уровень безопасности которых оценен как “неудовлетворительный”, должны быть проведены дополнительные обследования и независимые экспертизы. По их результатам уточняется оценка параметров нормального закона: математического ожидания индекса I и его стандартного отклонения, после чего рассчитывается вероятность аварии плотины p_2 . В случае необходимости вносятся уточнения в декларацию безопасности, при этом не требуется пересмотра декларации и оценок вреда, причиняемого в результате аварии.

Роль страхования в обеспечении безопасности плотин

Необходимыми условиями практического применения процедуры страхования гражданской ответственности владельцев плотин является наличие:

правовой основы страхования;

методики оценки уровня безопасности плотин и вероятности их аварий;

обоснованной и “прозрачной” процедуры назначения страховых платежей, увязанных с уровнем безопасности эксплуатируемого сооружения [1];

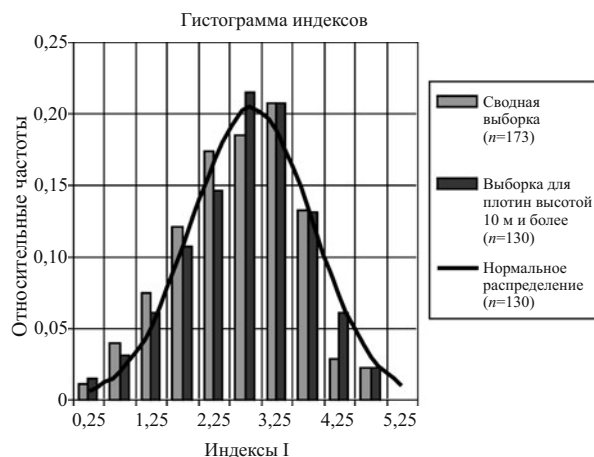
методики определения сумм страхового покрытия [9].

В настоящее время такие условия в основном созданы.

Страхование гражданской ответственности собственников плотин (или эксплуатирующих организаций) играет очень важную роль в обеспечении безопасности плотин при условии полной корреляции методов оценки риска аварий, применяемых при технической эксплуатации плотин и в процессе страхования этого риска.

Выводы

1. Методика оценки состояния и уровня безопасности эксплуатируемых плотин в форме индек-



Результаты анализа

са I апробирована 10-летней практикой на многих плотинах России. Достоинства применяемой методики являются: а) возможность совместного учёта количественных показателей (на основе данных инструментальных измерений и визуальных наблюдений), получаемых в результате мониторинга плотин, и качественных (на основе экспертных заключений) оценок состояния и уровня безопасности плотин с использованием критериев безопасности; б) возможность вычисления вероятности аварии на основе результатов мониторинга и обследований конкретного объекта, представленных в форме индекса I .

2. Выполненный в работе детальный статистический анализ выборки индексов I для 130 “больших” (по классификации ICOLD) плотин России показал применимость нормального закона распределения индекса I . Необходимые для определения вероятности аварии p_2 оценки параметров нормального закона должны быть получены в результате обследования и соответствующей оценки состояния конкретной плотины в форме индекса I . Необходимы также дальнейшая систематизация, обобщение и статистический анализ данных обследований на основе изложенной методики с целью уточнения приведенных в табл. 1 рекомендаций по оценке состояния и уровня безопасности плотин в форме индекса I , а также уточнения оценок параметров нормального закона, представленных в табл. 2.

3. Накопленный опыт показывает возможность совершенствования организационной процедуры оценки технического состояния и уровня безопасности плотин. Так, более частые (чаще чем раз в пять лет) обследования плотины (и, соответственно, процедуры разработки и экспертизы деклараций безопасности и критериев безопасности) целесообразно проводить только для тех сооружений, уровень безопасности которых был признан “неудовлетворительным” (потенциально опасным)

или “аварийным”. Необходима чёткая и “прозрачная” процедура назначения страховых платежей при страховании гражданской ответственности владельцев (эксплуатирующих организаций) плотин за последствия возможных аварий.

4. Необходимыми элементами процедуры обоснования и назначения страховых платежей являются: а) учёт уровня безопасности эксплуатируемой плотины с использованием критериев безопасности и как количественных (в том числе по данным инструментальных наблюдений), так и качественных (в том числе визуальных, экспертных) оценок; б) представление результатов такого учета в вероятностной форме.

5. Разработанные методики оценок ущербов от возможных аварий плотин и накопленный многолетний опыт их успешного применения возможно использовать для определения размеров страхового покрытия при страховании гражданской ответственности.

Авторы выражают признательность М. А. Гончарову (НИУ “Высшая школа экономики”), который принимал активное участие в статистической обработке и анализе результатов обследований плотин.

Список литературы

1. *Ivashchenko I., Radkevich D., Orlov A., Troitsky A.* Financial support of civil responsibility for damages caused by dam failure // Proceed. Congr. ICOLD, Montreal, 2003.
2. *Золотов Л. А., Иващенко И. Н., Радкевич Д. Б.* Оперативная количественная оценка уровня безопасности эксплуатируемых гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 1997. № 2.
3. *Ivashchenko K. I., Lavrov D. B., Chernilov A. G., Ivashchenko I. N.* Expert system: the management of dam safety in operation // Proceed. Int. Conf. & Exhib. Ljubljana, 2008.
4. *Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений.* — М. НИИЭС, 2000.
5. *Стефанюшин Д. В., Шульман С. Г.* Проблемы надёжности гидротехнических сооружений. — СПб.: ВНИИГ им Б. Е. Веденеева, 2001.
6. *Рекомендации по оценке надёжности гидротехнических сооружений:* П-842-86 / Гидропроект. М., 1986.
7. *Automated observation for the safety control of dams* // Bulletin 41 ICOLD. — Paris: ICOLD, 1982.
8. *СТО 70238424.27.140.026-2009* Гидроэлектростанции. Оценка и прогнозирование рисков возникновения аварий гидротехнических сооружений. Нормы и требования. — М.: НП “ИНВЭЛ”, 2009.
9. *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* (утв. приказом МЧС РФ и Минэнерго РФ от 29.12.2003. № 776 / 508).

Саяно-Шушенская катастрофа — синхронный гидроакустический резонанс?

Башнин О. И., гл. специалист по ГЭС научно-исследовательского отдела (ООО “Ракурс-инжиниринг”), доктор техн. наук

Рассматриваются две модели распространения акустических волн в водоводах ГЭС с радиально-осевыми турбинами. Приводятся передаточные функции динамической системы “напорный трубопровод — турбина — отсасывающая труба” при возмущении давления за турбиной. Выполнение критерия Найквиста для упомянутой системы говорит о ее устойчивости при любых открытиях регулирующего органа. Анализ аналитических зависимостей частотных характеристик от параметров, характеризующих волновые свойства частей водовода, позволяют выделить диапазоны частот, в которых возможно появление резонанса, а также оценить его высоту. В заключение приведена частотная характеристика водовода Саяно-Шушенской ГЭС, на которой выделено три резонанса в ультразвуковом акустическом диапазоне. Разработана и исследована математическая модель процесса. Приведены осциллограммы пульсаций давления при возмущениях давления в последней трети отсасывающей трубы. Результаты исследования сопоставлены с опубликованными данными натурных испытаний.

Ключевые слова: гидротурбина, напорный трубопровод, отсасывающая труба, пульсации давления, резонанс, частотная характеристика, математическая модель.

Авария агрегата № 2 Саяно-Шушенской ГЭС (СШГЭС) породила не одну гипотезу о физической природе явлений, приведших к усталостному разрушению шпилек крепления крышки турбины и подъему ротора агрегата. Причиной катастрофы большинство специалистов считает вызванные нестационарностью потока пульсации давления в проточной части турбины и, как следствие, приведший к усталостным разрушениям высокий уровень вибрации узлов агрегата [1, 2]. Из правдоподобных причин следует упомянуть также версии неисправности приводов лопаток направляющего аппарата [3]. Однако анализ осциллограмм динамических процессов в момент аварии показывает, что никаких сбоя в работе системы автоматического управления турбиной не было. Наиболее парадоксальным из объяснений причин аварии агрегата № 2 является предположение о развитии расходящегося колебательного процесса в водоводе ГЭС [4].

В предлагаемой вниманию читателей статье обсуждается проблема устойчивости и резонансных свойств трубопроводов радиально-осевых агрегатов. Заранее следует оговориться, что о неустойчивости водовода как динамического звена речи быть не может, потому что неустойчивость трубопровода автоматически привела бы к неустойчивости всех контуров регулирования гидравлической турбины и, следовательно, к неконтролируемым перемещениям регулирующих органов. Ниже речь пойдет о резонансных явлениях в водоводах, выявленных при исследованиях динамики энергообмена между волновыми процессами в напорном трубопроводе и отсасывающей трубе радиально-осевой турбины. Эти явления могли существенно повлиять на истощение прочности крепежных деталей крышки турбины при циклических нагрузках.

Известно, что поток воды в гидроэнергетических установках является аккумулятором кинетической энергии. В переходных процессах эта кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию давления. Упругость стенок трубопровода и сжимаемость воды приводят к появлению распространяющихся по ним ударных волн. Этот процесс описывается волновым уравнением, история исследования которого применительно к течению жидкости по трубам восходит к Н. Е. Жуковскому [5]. Явление гидравлического удара не только влияет на выбор структуры системы управления агрегатами, но и, в силу волнового характера, способствует распространению возникающих на выходе из турбины пульсаций давления по всему водяному тракту агрегата.

Изучению пульсаций давления в водоводах радиально-осевых и поворотно-лопастных турбин посвящено большое количество работ, например [6, 7]. В этих работах рассматриваются пульсации давления в отсасывающих трубах турбин без анализа распространения их по водоводам ГЭС.

Экспериментальные данные [17], полученные при натурных исследованиях агрегатов Саяно-Шушенской ГЭС в середине 90-х гг. XX века, записи сейсмографами колебаний тела плотины при аварии агрегата № 2 в августе 2009 г. свидетельствуют о том, что пульсации давления в отсасывающей трубе турбины могут приводить к развитию в водоводах ГЭС гидроакустического резонанса. Одно из первых исследований в этой области было выполнено в Сибирском отделении РАН [4]. В его основу были положены результаты аналогичных работ по устойчивости трубопроводов насосных установок и представления о водоводе как

о полуволновом резонаторе. Авария на СШГЭС придала новый импульс возрождению интереса к исследованию гидроакустического резонанса в водоводах ГЭС. 4 сентября 2009 г. в СО РАН была создана рабочая группа по анализу процессов, происходящих на СШГЭС, и разработке для нее системы мониторинга.

В одной из последних работ [8] обобщены результаты исследований образования и распространения пульсаций в водяном тракте турбины. Приведем основной вывод этой публикации: “Гидроакустический резонанс в тракте гидроагрегата является следствием формирования под рабочим колесом крупномасштабной когерентной вихревой структуры, излучающей узкополосный инфразвук, и наличием четвертьволнового резонатора — напорного канала и улитки”. Большой теоретический и практический интерес для изучения явления распространения волн давления в водяном тракте турбины представляет экспериментальное и теоретическое исследование вихревых потоков [9, 10], в которых показано, что пульсации давления в отсасывающей трубе неоднородны по азимуту.

Таким образом, современные представления о гидроакустическом резонансе базируются на следующей модели:

- подводящий напорный трубопровод является четвертьволновым резонатором;
- вихревое течение в отсасывающей трубе является генератором узкополосного акустического шума;
- между напорным трубопроводом и отсасывающей трубой расположены решетки профилей рабочего колеса и направляющего аппарата турбины, которые частично пропускают в резонатор акустический шум, генерируемый в вихревом шнуре, а частично отражают его обратно;
- проникающие в резонатор волны акустического шума усиливаются.

Эти представления отражают физическую картину развития гидроакустического резонанса в водоводах турбины с некоторым приближением. Известно, что четвертьволновый резонатор образуется из трубопровода, один конец которого открыт, а второй конец заглушен. Если рассматривать с этой точки зрения динамическую систему “отсасывающая труба – турбина – напорный трубопровод”, то роли в ней могут распределяться одним из двух способов:

- отсасывающая труба является, как упоминалась ранее, генератором акустического шума, турбина – элементом отвода энергии от рассматриваемой динамической системы в сеть, а напорный трубопровод регулятором отвода энергии акустического шума в электрическую сеть;
- отсасывающая труба и напорный трубопровод являются регуляторами отвода энергии периодических акустических возмущений в электрическую сеть, а турбина, как и в предыдущем случае, является элементом, через который он осуществляется.

При синхронных колебаниях давления перед и за турбиной (сохранения перепада давления на турбине), расход через нее не будет изменяться, не будет изменяться и мощность, передаваемая потребителям. Таким образом, создается ситуация, характеризуемая отсутствием передачи энергии колебаний в электрическую сеть и отсутствием изменений расхода в сечениях примыкания напорного трубопровода и отсасывающей трубы к турбине. Отсутствие изменения расхода эквивалентно постановке заглушки именно на периодическую составляющую изменения давления и превращению напорного трубопровода, одного или совместно с отсасывающей трубой, в четверть-волновые резонаторы. В процессе экспериментального исследования и эксплуатации агрегатов СШ ГЭС имели место проявления синхронного резонанса обоих типов.

Наличие колебательных звеньев с близкими резонансными частотами в динамической структуре водовода СШ ГЭС неизбежно должно было привести к синхронным резонансам в соответствии с общими принципами синхронизации, обзор которых приводится в [11].

Статическая расходная характеристика радиально-осевой турбины. Расход воды через радиально-осевую турбину и отводимая потребителям мощность зависят от перепада давления на ней (действующего напора) и частоты вращения ротора. Аналитических выражений для статических расходных характеристик турбин не существует. Используемая в исследованиях систем управления форма записи расходной характеристики является результатом преобразования именованных координат, в которых построена универсальная характеристика, в соответствующих им, но представленных в относительных единицах основных режимных параметрах. Эта процедура описана, например, в [12, 13].

Пусть в качестве условных единиц для переменных состояния объекта управления гидравлической турбины приняты величины, соответствующие основному расчетному режиму: Q_{nom} — расход через турбину; H_{nom} — напор; Y_{max} — максимальный конструктивный ход главного сервомотора; a_0, max — открытие в свету, соответствующее Y_{max} ; n_{nom} — число оборотов, соответствующее синхронной частоте вращения. На универсальной характеристике номинальному режиму соответствует точка с координатами:

$$\left(n'_{I/nom} = \frac{n_{nom}}{\sqrt{H_{nom}}}; \quad Q'_{I/nom} = \frac{Q_{nom}}{\sqrt{H_{nom}}} \right). \quad \text{Перестроим}$$

универсальную характеристику, введя новые координатные оси: абсцисс — $\frac{n'_I}{n'_{I/nom}}$ и ординат — $\frac{Q'_I}{Q'_{I/nom}}$.

В записи уравнений движения объекта управления используются следующие относительные единицы: для расхода — $q = Q(t)/Q_{nom}$; для отклонения давления — $h = \frac{H(t) - H_{nom}}{H_{nom}}$ и для отклонения частоты вращения $v = \frac{n(t) - n_{nom}}{n_{nom}}$. На универсальной

характеристике расходная функция агрегата представлена как однопараметрическое семейство кривых, являющихся зависимостями приведенного расхода от приведенных оборотов при постоянном открытии в свету a_{0i} . При расчете систем управления гидравлических турбин используется зависимость хода главных сервомоторов от величины открытия в свету $Y = Y(a_0)$.

Итак, в соответствии с изложенным выше, имеем: на оси абсцисс откладывается величина

$$\frac{n'_I}{n'_{I/nom}} = \frac{n(t) \cdot \sqrt{H_{nom}}}{\sqrt{H(t)} \cdot n_{nom}} = \frac{n_{nom} + n(t) - n_{nom}}{n_{nom}} \cdot \left(\frac{\sqrt{H_{nom} + H(t) - H_{nom}}}{\sqrt{H_{nom}}} \right)^{-1} = \frac{1 + v}{\sqrt{1 + h}};$$

на оси ординат — величина

$$\frac{Q'_I}{Q'_{I/nom}} = \frac{Q(t) \cdot \sqrt{H_{nom}}}{\sqrt{H(t)} \cdot Q_{nom}} = \frac{Q(t)}{Q_{nom}} \cdot \left(\frac{\sqrt{H_{nom} + H(t) - H_{nom}}}{\sqrt{H_{nom}}} \right)^{-1} = \frac{q}{\sqrt{1 + h}}.$$

В качестве параметра, характеризующего постоянство открытия, используется величина относительного смещения сервомотора от полностью закрытого состояния

$$y_i = \frac{Y(a_{0i})}{Y_{max}}.$$

Таким образом, относительная приведенная расходная характеристика — это однопараметрическое семейство графиков $\frac{q}{\sqrt{1+h}} = q_0 \left(\frac{1+v}{\sqrt{1+h}} \mid y_i \right)$, получаемое из универсальной характеристики модели путем замены переменных при переходе от приведенных единиц к относительным. На рис. 1 представлена относительная приведенная расходная характеристика турбины СШГЭС, полученная из универсальной характеристики.

В соответствии с этой характеристикой для заданных: относительного положения сервомотора y , относительного статического отклонения напора от номинального h_{st} при номинальной частоте вращения $v = 0$ величина относительного расхода может быть определена по формуле

$$q = \sqrt{1 + h_{st}} \cdot q_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1 + h_{st}}}, y \right).$$

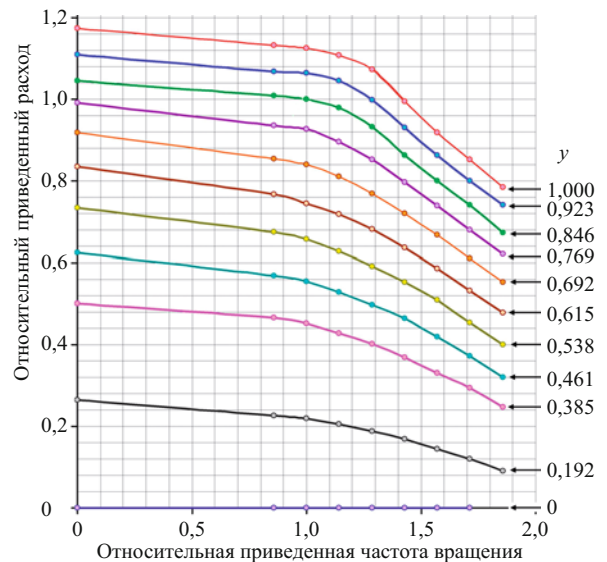


Рис. 1. Относительная приведенная расходная характеристика радиально-осевой турбины (Саяно-Шушенская ГЭС)

Если считать, что эта зависимость верна и для динамических отклонений перепада на турбине, то для малых колебаний его h при $y = y_0 = \text{const}$ и синхронной частоте вращения $\nu = 0$ можно, заменив $(1 + h_{st})$ на $(1 + h_{st} + h)$, получить выражение для приближенной оценки отклонений расхода, вызванных колебаниями давления:

$$\Delta q \cong \frac{1}{2 \cdot (1 + h_{st})} \cdot \left(\sqrt{1 + h_{st}} \cdot q_0 \left(y_0, \frac{1}{\sqrt{1 + h_{st}}} \right) - \frac{\partial \left[q_0 \left(y_0, \frac{1}{\sqrt{1 + h_{st}}} \right) \right]}{\partial \left[\frac{1}{\sqrt{1 + h_{st}}} \right]} \right) \cdot h.$$

Кроме того, из рис. 1 следует, что при близких к единице значениях $1/(1 + h_{st})$, а это имеет место в нормальных режимах эксплуатации, с достаточной степенью точности можно считать

$$\Delta q(t) = \frac{1}{2} \cdot \left\{ q(y_0, h_{st}) - \frac{\partial \left[q_0 \left(y_0, \frac{1}{\sqrt{1 + h_{st}}} \right) \right]}{\partial \left[\frac{1}{\sqrt{1 + h_{st}}} \right]} \right\} \cdot h(t),$$

где $q(y_0, h_{st})$ — расход в рассматриваемом установившемся режиме.

Величина $\frac{\partial \left[q_0 \left(y_0, \frac{1}{\sqrt{1 + h_{st}}} \right) \right]}{\partial \left[\frac{1}{\sqrt{1 + h_{st}}} \right]}$ уменьшается пропорционально $q_0 \left(y_0, \frac{1}{\sqrt{1 + h_{st}}} \right)$ и обычно вносит по-

правку порядка 10 %, поэтому будем считать $\Delta q = 0,5q(y_0, h_{st})h$ и для малых отклонений перепада записывать полученное соотношение в виде

$$\Delta q = K_{h-q} h, \quad (1)$$

где K_{h-q} коэффициент зависимости отклонения расхода от перепада на турбине, величина этого коэффициента всегда больше нуля и равна нулю при полностью закрытом направляющем аппарате.

Приведенная в [4] “стационарная характеристика турбины”, отражающая потери давления в водоводе турбины, может быть учтена путем коррекции коэффициента K_{h-q} . Для этого достаточно рассмотреть выражение $\Delta q = K_{h-q}(h(t) - K_L \Delta q)$, где коэффициент K_L определяет зависимость потерь давления в трубопроводе от отклонения расхода, учитывая и изменение картины поля скоростей за турбиной. Нетрудно видеть, что скорректированное таким образом значение коэффициента зависимости приращения расхода от приращения напора будет вычисляться по формуле

$$K_{h-q}^b = \frac{K_{h-q}}{1 + K_{h-q} K_L}.$$

Следует заметить, что потери в трубопроводе методически правильно учитывать в уравнениях, описывающих движение воды в водоводе, а не приписывать их турбине. Поскольку далее потери по длине в трубопроводах не будут учитываться, то и смысла коррекции характеристики турбины учетом потерь в водоводах нет. В дальнейшем изложении всегда будет использоваться только величина K_{h-q} .

Описание процесса гидравлического удара волновыми уравнениями в напорной части водовода и в отсасывающей трубе. На рис. 2 представлена типовая схема водовода радиально-осевой турбины приплотинной ГЭС. Он состоит из напорного участка, как правило, постоянного сечения, собственно турбины и отсасывающей трубы. Длина напорного участка водовода у этого типа ГЭС несколько больше дей-

ствующего напора. Отсасывающая труба — короткий участок водовода с плавно изменяющимся вдоль хода потока по площади и форме сечением. Турбина — самый сложный элемент системы, состоящий из спирали, камеры рабочего колеса и ротора турбины. В дальнейшем принята следующая модель процесса распространения ударных волн: водовод является соединением двух простых трубопроводов, связанных элементом нулевой протяженности с расходной характеристикой турбины. Этот элемент частично пропускает волны из напорного трубопровода в отсасывающую трубу и обратно, а частично отражает их, образуя три связанных кольца для их распространения [14].

Таким образом, начальная модель для изучения гидроакустических особенностей водовода радиально-осевой турбины получается при дополнении описания процесса распространения продольной ударной волны в напорной части водовода аналогичными уравнениями, считающимися верными и для волновых явлений в отсасывающей трубе. В качестве общего граничного условия, связывающего процессы распространения ударных волн в обеих частях водовода, служит зависимость расхода через турбину от отклонений давлений в сечениях примыкания их к турбине.

Процесс распространения продольных ударных волн в простом однониточном трубопроводе при отсутствии потерь на трение описывается волновым уравнением [15]

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{2h_w}{a} \cdot \frac{\partial q}{\partial t} &= 0; \\ \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{1}{2h_w a} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} &= 0; \end{aligned} \quad (2)$$

где переменные h и q — относительные отклонения давления и расхода от их значений в стационарном режиме в расположенном на расстоянии x , м, от верхнего бьефа сечении трубопровода; a , м/с — скорость распространения ударной волны; h_w — безразмерная ударная характеристика, вычисляемая по формуле

$$h_w = \frac{aQ_0}{2gFH_0} = \frac{T_w}{T_r}, \quad (3)$$

где $T_r = \frac{2L}{a}$ — “фаза” упругого гидравлического удара, равная удвоенному времени пробега ударной волны

от начала до конца трубопровода; $T_w = \frac{LQ_0}{gFH_0}$ — постоянная времени водовода.

В приведенных выше коэффициентах уравнения используются параметры трубопровода: L — длина трубопровода, м; F — площадь поперечного сечения трубопровода, м²; Q_0 — расход воды, м³/с, принятый за условную единицу (обычно номинальный); H_0 — напор, м вод. ст., принятый за условную единицу (обычно номинальный); g — ускорение свободного падения, м/с².

В практике исследования систем регулирования гидравлическими турбинами используется решение уравнения (2) при следующих начальных и граничных условиях. Для напорного участка водовода $h(0, x) = q(0, x) \equiv 0$ для всех $0 \leq x \leq L_h$ (начальное условие) и $h(t, 0) \equiv 0$ на промежутке времени $[0, \infty)$ (граничное условие верхнего бьефа) ищется решение, удовлетворяющее граничному условию $q(t, L) = K_{h-q}h(t, L)$ (линеаризованная зависимость отклонения расхода через турбину от отклонения давления перед турбиной).

В изложенной постановке задачи связь между лапласовыми изображениями отклонений расхода через турбину и давления перед ней выражается формулой [18]

$$W_h(s, L_h) = \frac{H(s, L_h)}{Q(s, L_h)} = -2h_{wh} \cdot th \frac{T_{rh}s}{2}, \quad (4)$$

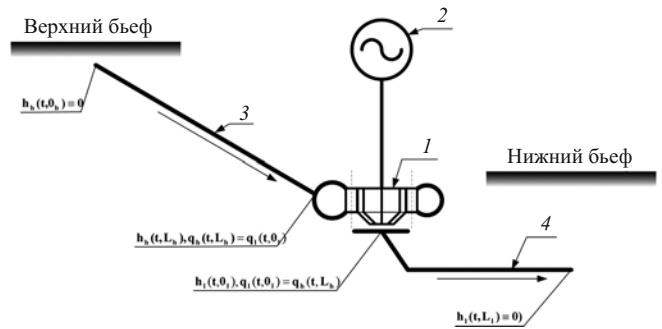


Рис. 2. Схема водовода радиально-осевой турбины:

1 — турбина; 2 — генератор; 3 — напорный участок водовода; 4 — отсасывающая труба

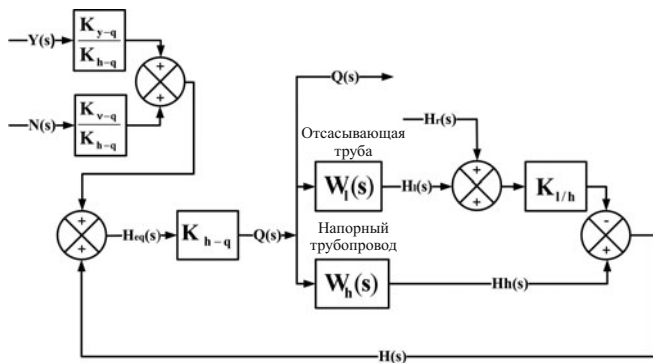


Рис. 3. Структурная схема водовода радиально-осевой турбины

где $W_h(s, L_h)$ — передаточная функция трубопровода; $H(s, L_h)$ — изображение отклонения давления от его значения в установившемся статическом режиме; $Q(s, L_h)$ — изображение отклонения расхода от его значения в установившемся статическом режиме в сечении подсоединения трубопровода к турбине.

Аналогично (4) можно записать передаточную функцию, характеризующую связь между отклонением давления на входе в отсасывающую трубу и расходом через турбину:

$$W_l(s, 0_l) = \frac{H(s, 0_l)}{Q(s, 0_l)} = 2h_{wl} \cdot th \frac{T_{rl}s}{2}. \quad (5)$$

Знак плюс в выражении передаточной функции появляется при замене нулевого граничного условия в начале трубопровода точно таким же, но для его конца (нижний бьеф).

Выше и в дальнейшем индекс “ h ” присваивается всем величинам, относящимся к напорной части водовода, а “ l ” — всем величинам, относящимся к отсасывающей трубе. Так как речь идет о расходах и давлениях в сечениях перед турбиной и на выходе из рабочего колеса, то указание на линейную координату сечения в обозначении переменных и функций будет опускаться.

Граничное условие, объединяющее напорную часть водовода и отсасывающую трубу, выражает эквивалентность статической и динамической расходной характеристики турбины

$$q_h(t) = q_l(t) = K_{h-q}(h_h(t) - h_l(t)). \quad (6)$$

На рис. 3 представлена структурная схема, отражающая связи между переменными в напорной части трубопровода и отсасывающей трубе.

Для определения величины отклонения расхода от установившегося режима используется зависимость

$$Q(s) = K_{h-q}H_{eq}(s), \quad (7)$$

где $H_{eq}(s)$ — воздействие по отклонению перепада, эквивалентное одновременному действию трех факторов: отклонению регулирующего органа $Y(s)$, отклонению частоты вращения $N(s)$, отклонению частоты вращения и отклонению давлений перед и за турбиной $H_{l-h}(s) = H_h(s) - K_{l/h}H_l(s)$ от установившихся значений.

Заметим, что смысл коэффициента $K_{l/h} \geq 1$ будет выявлен в вычислительном эксперименте и в обсуждении его результатов (см. ниже).

K_{h-q} , K_{y-q} , K_{v-q} — коэффициенты передачи от отклонений давлений, положения сервомотора регулирующего органа и частоты вращения к отклонению расхода при малых колебаниях.

В соответствии с (6): $Q(s) = Q_h(s) = Q_l(s)$.

Передаточные функции трубопровода радиально-осевой турбины и устойчивость системы “напорный трубопровод-турбина-отсасывающая труба”. Пусть возмущающее воздействие, генерируемое в отсасывающей трубе, эквивалентруется приложенным на выходе из рабочего колеса возмущением давления $H_r(s)$ (рис. 3), тогда изображения основных переменных будут определяться выражениями:

для отклонения давления перед турбиной

$$H_h(s) = - \frac{K_{h-q} \cdot K_{l/h} \cdot W_h(s)}{1 - K_{h-q} \cdot (W_h(s) - K_{l/h} \cdot W_l(s))} \cdot H_r(s); \quad (8)$$

для отклонения давления за турбиной (реакция отсасывающей трубы на возмущение)

$$H_l(s) = - \frac{K_{h-q} \cdot K_{l/h} \cdot W_l(s)}{1 - K_{h-q} \cdot (W_h(s) - K_{l/h} \cdot W_l(s))} \cdot H_r(s); \quad (9)$$

для полного отклонения давления за турбиной (реакция отсасывающей трубы плюс само возмущение)

$$H_{l+r}(s) = \frac{1 - K_{h-q} \cdot W_h(s)}{1 - K_{h-q} \cdot (W_h(s) - K_{l/h} \cdot W_l(s))} \cdot H_r(s); \quad (10)$$

для отклонения перепада давления на турбине

$$H_{h-l}(s) = -\frac{K_{l/h}}{1 - K_{h-q} \cdot (W_h(s) - K_{l/h} \cdot W_l(s))} \cdot H_r(s). \quad (11)$$

Заметим, что величина $K_{h-q} > 0$, если направляющий аппарат турбины открыт. При этих условиях исследуем устойчивость системы, представленной на структурной схеме рис. 3, учитывая, что $W_h(s) = -2h_{wh} \cdot th \frac{sT_{rh}}{2}$ и $W_l(s) = 2h_{wl} \cdot th \frac{sT_{rl}}{2}$.

Рассмотрим знаменатель одного из выражений (8), (9) или (10), обозначив его

$$1 + W_o(s) = 1 + K_{h-q} \cdot \left(2h_{wh} \cdot th \frac{sT_{rh}}{2} + K_{l/h} \cdot 2h_{wl} \cdot th \frac{sT_{rl}}{2} \right). \quad (12)$$

Нетрудно видеть, что (12) — знаменатель замкнутой отрицательной единичной обратной связи системы, передаточная функция которой в разомкнутом состоянии имеет вид

$$W_o(s) = K_{h-q} \cdot \left(2h_{wh} \cdot th \frac{sT_{rh}}{2} + K_{l/h} \cdot 2h_{wl} \cdot th \frac{sT_{rl}}{2} \right).$$

Динамическая система с передаточной мероморфной функцией разомкнутой цепи $W_o(s)$ после охвата ее единичной обратной связью будет асимптотически устойчива, если образу правой полуплоскости “s” в плоскости “w” не принадлежит точка $(-1, 0 \cdot j)$ [16]. Предварительно рассмотрим отображение, осуществляемое функцией $W(s) = h_{wh} \cdot th \frac{sT_{rh}}{2}$ из “s” в “w”.

На рис. 4. показано отображение функций $th \left(\frac{sT_r}{2} \right)$ полосы правой полуплоскости “s”, ограниченной лучами $(\text{Im} = \frac{\pi}{T_r}, \text{Re} \in (0, \infty))$, $(\text{Im} = -\frac{\pi}{T_r}, \text{Re} \in (0, \infty))$ и отрезком $(\text{Im} = -\frac{\pi}{T_r}, \text{Re} = \frac{\pi}{T_r})$, на плоскость “w”. В силу периодичности функция $th \left(\frac{sT_r}{2} \right)$ будет отображать каждую из полос, принадлежащую правой полуплоскости “s” и ограниченную лучами $(\text{Im} = \frac{(2k+1)\pi}{T_r}, \text{Re} \in (0, \infty))$, $(\text{Im} = \frac{(2(k+1)+1)\pi}{T_r}, \text{Re} \in (0, \infty))$ и отрезком $(\text{Im} = \frac{(2k+1)\pi}{T_r}, \text{Re} = \frac{(2(k+1)+1)\pi}{T_r})$, на всю правую полуплоскость “w”. Следовательно, образ полуплоскости “s” на “w” не будет содержать точку с координатами $(-1, 0 \cdot j)$. Значит, система с передаточной функцией $W(s) = h_{wh} \cdot th \frac{sT_{rh}}{2}$ в разомкнутом состоянии не имеет корней в правой полуплоскости “s”, и поэтому будет асимптотически устойчива. Так как

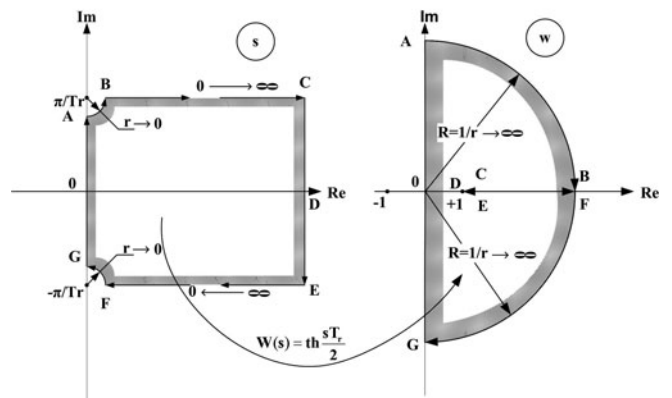


Рис. 4. Отображение полосы правой полуплоскости s на плоскость w , осуществляемое передаточной функцией $W(s) = th \frac{sT_r}{2}$

частотная характеристика $W(j\omega) = j \cdot \frac{\omega T_{rh}}{2}$ имеет реальную часть, равную нулю, то будет устойчива и система с передаточной функцией $W_k(s) = K \cdot th \frac{sT_{rh}}{2}$, при любом $K > 0$.

Необходимо отметить, что $W_0(s)$ принадлежит тому же классу функций, что и $W_k(s) = K \cdot th \frac{sT_r}{2}$. Обе функции на конечной части комплексной плоскости имеют конечное число полюсов первого порядка, которые отделимы. Все полюсы их расположены на мнимой оси. Справа от нее функции являются аналитическими. На открытых отрезках мнимой оси между полюсами $W_0(s)$ ее производная положительна. Правую полуплоскость s можно разрезать на полосы различной ширины, верхней и нижней границами которых являются исходящие из полюсов лучи, параллельные вещественной оси и стремящиеся к ∞ вдоль ее положительного направления. Слева полосы ограничены соединяющими соседние полюсы отрезками мнимой оси. Каждая из таких полос отображается функцией $W_0(s)$ в правую полуплоскость плоскости w . Следовательно, для положительных значений K_{h-q} приведенная на рис. 3 структурная схема, соответствующая сложному трубопроводу радиально-осевой турбины, будет асимптотически устойчива.

Если отношение $\frac{T_{rl}}{T_{rh}}$ — дробь, числитель и знаменатель которой не имеющие общих делителей целые нечетные числа, то при некоторых $s_k = j\omega_k$, полюсы $th \frac{T_{rl}j\omega_k}{2}$ и $th \frac{T_{rh}j\omega_k}{2}$ будут совпадать. Пусть $\frac{T_{rl}}{2n+1} = \frac{T_{rh}}{2m+1} = \tau_r$. Каждый раз, когда $\tau_r \omega_k = (2p+1)\pi$, величины $\frac{T_{rl}\omega_k}{2}$ и $\frac{T_{rh}\omega_k}{2}$ будут являться одновременно полюсами функций $th \frac{T_{rl}S}{2}$ и $th \frac{T_{rh}S}{2}$ соответственно. Но в окрестности точки $s_k = j\omega_k = j \frac{2p+1}{\omega_k} \pi$ функция $W_0(s)$ имеет такую же асимптотику, как и

$$D(\omega) = j \cdot 2 \cdot K_{h-q} \cdot \left(\frac{2h_{wh}}{T_{rh}\omega_k - (2m+1) \cdot (2p+1) \cdot \pi} + K_{l/h} \cdot \frac{2h_{wl}}{T_{rl}\omega_k - (2n+1) \cdot (2p+1) \cdot \pi} \right) =$$

$$= j \cdot \frac{4 \cdot K_{h-q} \cdot (h_{wh} \cdot (2n+1) + K_{l/h} \cdot h_{wl} \cdot (2m+1))}{(2n+1) \cdot (2m+1) \cdot (\tau_r \cdot \omega_k - (2p+1) \cdot \pi)},$$

т.е. имеет полюс первого порядка. Следовательно, совпадение полюсов слагаемых рассматриваемой функции не приводит к изменению порядка полюса и нарушению свойства отображения: правая полуплоскость s будет отображаться в правую полуплоскость “ w ”.

Частотные характеристики трубопровода радиально-осевой турбины при возмущении, примененном к выходу турбины. Асимптотическая устойчивость рассматриваемой динамической системы позволяет говорить о ее частотных характеристиках. После замены в (8) – (11) комплексной переменной s на $j\omega$ и записи их в элементарных тригонометрических функциях получим следующие формулы для вычисления частотных характеристик:

$$V_h(j\omega) = \frac{H_h(j\omega)}{H_r(j\omega)} = - \frac{j \cdot K_{l/h} \cdot K_{h-q} \cdot 2h_{wh} \cdot \text{tg} \frac{\omega T_{rh}}{2}}{1 + j \cdot 2K_{h-q} \cdot \left(h_{wh} \cdot \text{tg} \frac{\omega T_{rh}}{2} + K_{l/h} \cdot h_{wl} \cdot \text{tg} \frac{\omega T_{rl}}{2} \right)}; \quad (13)$$

$$V_{l+r}(j\omega) = \frac{H_l(j\omega) + H_r(j\omega)}{H_r(j\omega)} = \frac{1 - j \cdot K_{h-q} \cdot 2h_{wh} \cdot \text{tg} \frac{\omega T_{rh}}{2}}{1 + j \cdot 2K_{h-q} \cdot \left(h_{wh} \cdot \text{tg} \frac{\omega T_{rh}}{2} + K_{l/h} \cdot h_{wl} \cdot \text{tg} \frac{\omega T_{rl}}{2} \right)}; \quad (14)$$

$$V_{h-l}(j\omega) = \frac{H_h(j\omega) - H_l(j\omega)}{H_r(j\omega)} = - \frac{K_{l/h}}{1 + j \cdot 2K_{h-q} \cdot \left(h_{Wh} \cdot \operatorname{tg} \frac{\omega T_{rh}}{2} + K_{l/h} \cdot h_{Wl} \cdot \operatorname{tg} \frac{\omega T_{rl}}{2} \right)}. \quad (15)$$

Заметим, что частотные характеристики (13) – (15) имеют одинаковый знаменатель, мнимая часть которого может при некоторых значениях $\omega = \omega_k$ обращаться в нуль. При этом $|V_h|$ и $|V_{l+r}|$ могут принимать большие значения. Модуль $|V_{h-l}|$, от величины которого зависит демпфирование колебаний перепада, принимает ограниченное значение — не большее $K_{l/h}$. Для этих значений частот формируются граничные условия связи между отклонениями давления перед и за турбиной, близкие к таковым при закрытом направляющем аппарате (граничное условие тупика $q(t, l) \equiv 0$ при $t \in [0, \infty)$), с той разницей, что в случае простого, одностороннего трубопровода резонансные пики частотной характеристики трубопровода не ограничены по высоте. Таким образом, можно говорить о том, что влияние волнового процесса в отсасывающей трубе на резонансные свойства водовода радиально-осевой турбины заключается в кажущемся уменьшении открытия, т.е. в уменьшении рассеяния энергии колебаний на некоторых частотах $\omega = \omega_k$, называемых далее частотами синхронного резонанса. Эти частоты близки к частотам гармоник четвертьволновых резонансов напорного трубопровода и отсасывающей трубы.

Определение этих частот не представляет аналитических трудностей при $h_{Wh} = h_{Wl}$ и $K_{l/h} = 1$. Если $h_{Wh} \neq h_{Wl}$, то можно ограничиться построением графика мнимой части знаменателя для определения частот, на которых она обращается в нуль.

Для предварительного определения частот синхронного резонанса можно воспользоваться следующими приближенными оценками как самих частот, так и высот резонансных пиков.

Пусть в первом случае ω_1 и ω_2 таковы, что $\operatorname{tg} \frac{\omega T_{rh}}{2} \rightarrow \infty$ при $\omega \rightarrow \omega_1$ и $\operatorname{tg} \frac{\omega T_{rl}}{2} \rightarrow \infty$ при $\omega \rightarrow \omega_2$, причем для определенности $\omega_2 > \omega_1$, и в промежутке (ω_1, ω_2) есть точка $(\omega_1 + \omega)$, такая, что

$$h_{Wh} \cdot \operatorname{tg} \frac{(\omega_1 + \varepsilon) T_{rh}}{2} + K_{l/h} \cdot h_{Wl} \cdot \operatorname{tg} \frac{(\omega_2 - (\omega_2 - \omega_1 - \varepsilon)) T_{rl}}{2} = 0. \quad (15)$$

Соответствующая этому случаю ситуация изображена на рис. 5.

Так как в окрестности особых точек тангенсы могут быть приближенно вычислены по формуле $\operatorname{tg} \left[\frac{(2N+1) \cdot \pi}{2} + \delta \right] \cong -\frac{1}{\delta}$, то (12) может быть заменено приближенным равенством

$$\left[-\frac{2h_{Wh}}{\varepsilon T_{rh}} + \frac{2h_{Wl} \cdot K_{l/h}}{(\omega_2 - \omega_1 - \varepsilon) T_{rl}} \right] = 0, \quad \text{которое позволяет}$$

вычислить величину ε и приближенное значение пика резонансного всплеска амплитудной характеристики:

$$A(\omega_1 + \varepsilon) = \frac{2(T_{rl} \cdot h_{Wh} + K_{l/h} \cdot T_{rh} \cdot h_{Wl})}{T_{rl} \cdot T_{rh} \cdot (\omega_2 - \omega_1)}. \quad (16)$$

Это наиболее неприятный случай появления синхронного резонанса, высота пика которого на частотной характеристике сильно зависит от разности $(\omega_2 - \omega_1)$.

Другая ситуация появления резонансных пиков представлена на рис.6.

При $T_{rh} > T_{rl}$ возможно возникновение резонансного пика, если $\operatorname{tg} \frac{\omega T_{rh}}{2} \rightarrow 0$ при $\omega \rightarrow \omega_1$, а

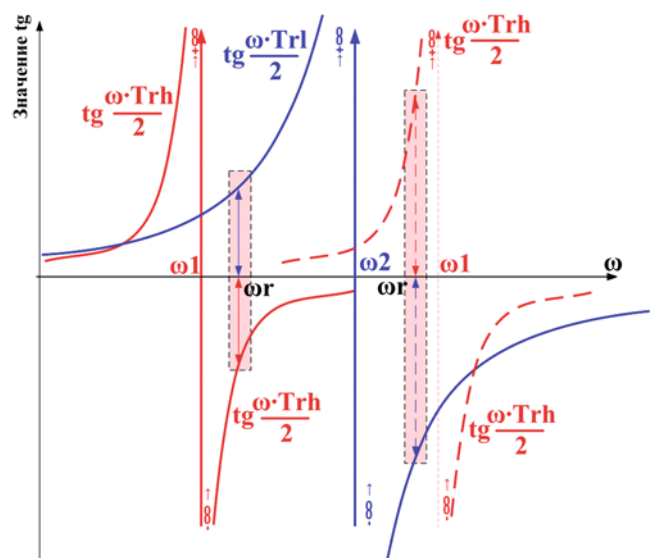


Рис. 5. Взаимное расположение мнимых частей частотных характеристик напорной части водовода (красный цвет) и отсасывающей трубы (синий цвет), при котором явление квазитупикового резонанса объясняется близостью их полюсов

$\operatorname{tg} \frac{\omega T_{rl}}{2} \rightarrow \infty$ при $\omega \rightarrow \omega_2$. В этом случае уравнение (12) может быть заменено приближенным соотношением $h_{Wh} T_{rh} \cdot \varepsilon + \frac{4 \cdot h_{Wl} \cdot K_{l/h}}{(\omega_2 - \omega_1 - \varepsilon) \cdot T_{rl}} = 0$.

Получившееся квадратное уравнение доставляет два решения ω_1 и ω_2 :

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2 = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2}\right)^2 + \frac{4 \cdot h_{Wl} \cdot K_{l/h}}{h_{Wh} T_{rh} T_{rl}}}. \quad (17)$$

При малых значениях $(\omega_2 - \omega_1)$ высота резонансного пика амплитудной частотной характеристики будет зависеть от соотношений параметров напорной части водовода и отсасывающей трубы. Если рассматривать случай $(\omega_2 - \omega_1) \rightarrow 0$, то нетрудно убедиться, что $\varepsilon_1, \varepsilon_2 = \pm \sqrt{\frac{4 \cdot K_{l/h} \cdot h_{Wl}}{h_{Wh} T_{rh} T_{rl}}}$, а высота резонансного

$$\text{пика } A \approx \sqrt{\frac{K_{l/h} \cdot h_{Wh} h_{Wl} T_{rh}}{T_{rl}}}.$$

Т.е. в этом случае на высоту резонансного пика существенное влияние может оказать величина ударной характеристики и отношение фаз гидравлического удара напорной части водовода и отсасывающей трубы.

Приведенные выкладки показывают, что в гидротурбинных установках с радиально-осевыми турбинами при близости частот гармоник четвертьволновых резонансов напорного водовода и отсасывающей трубы возможна синхронизация волновых процессов в них. При этом в силу синхронности прихода волн к турбине как со стороны напорного трубопровода, так и со стороны отсасывающей трубы прекращается как передача энергии колебаний в электрическую сеть, так и подпитка резонаторов от энергии потока воды. Подпитка резонирующих элементов осуществляется от пульсаций давления, возникающих в вихревом шнуре за турбиной.

Вычислительный эксперимент. Обсуждение его результатов. Рассмотрим, как можно использовать изложенные выше результаты на примере анализа экспериментальных данных, полученных при испытаниях агрегата № 10 Саяно-Шушенской ГЭС, и сейсмограммы, записанной в момент аварии агрегата №2. Данные о параметрах трубопровода — длине напорной части и отсасывающей трубы, а также скорость

распространения ударной волны в них приведены в [4]. Оговоримся, что кроме допущений, принятых при рассмотрении задачи в общем виде, влияние на точность полученных результатов оказывает и точность исходных данных.

Итак, параметры водовода: длина напорного трубопровода $L_h = 241$ м, длина отсасывающей трубы $L_l = 28$ м, скорость распространения ударной волны $a = 1350$ м/с, постоянная времени водовода для напора 218 м и номинальной мощности $T_W = 1,243$ с (данные ЛМЗ филиала “Силовых машин”); ударные характеристики напорной части водовода и отсасывающей трубы считаются одинаковыми $h_{Wh} = h_{Wl} = 3,7$, коэффициент принят $K_{l/h} = 1$.

Фаза гидравлического удара напорной части $T_{rh} = 0,357$ с.

Фаза гидравлического удара отсасывающей трубы $T_{rl} = 0,0415$ с.

Расчетные режимы по расходу $q_0 = 1$ (100 % от номинального) и $q_0 = 0,7$ (70 % от номинального).

Коэффициенты, характеризующие зависимость расхода от перепада на турбине: $K_{h-q} = 0,5$ для $q(y_0, h_{st}) = 1$ и $K_{h-q} = 0,35$ для $q(y_0, h_{st}) = 0,7$.

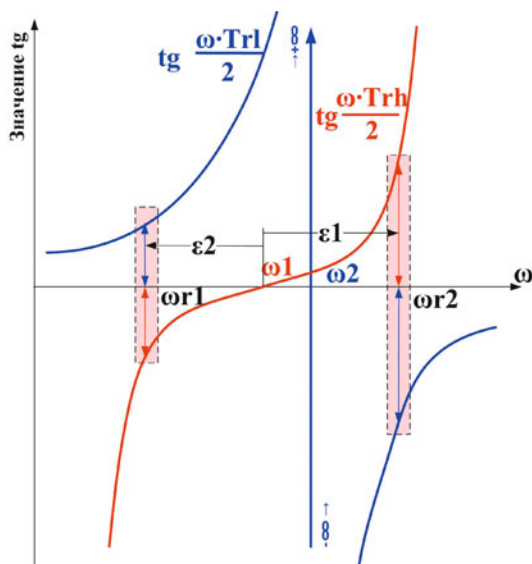


Рис. 6. Взаимное расположение мнимых частей частотных характеристик напорной части водовода (красный цвет) и отсасывающей трубы (синий цвет), при котором явление квазитупикового резонанса объясняется близостью полюса частотной характеристики отсасывающей трубы и нуля частотной характеристики напорной части

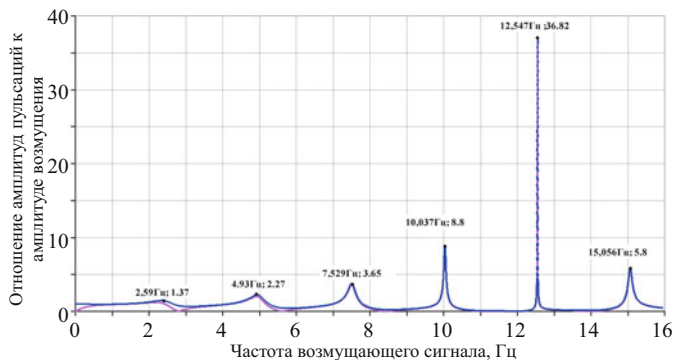


Рис. 7. Амплитудные частотные характеристики водовода при синусоидальном входном воздействии, приложенном к выходу турбины:

малиновый цвет — для давления перед турбиной; синий цвет — для полного давления (возмущение плюс реакция отсасывающей трубы) за турбиной

Для водовода СШГЭС подозрительные на возможность возникновения синхронного резонанса частоты водовода рассчитываются по формуле $f_k = \frac{k}{T_{rh} + T_{rl}}$, где $k = 0, 1, 2, \dots$. Ниже приведен ряд частот этого типа для водовода Саяно-Шушенской ГЭС при $k = 1, \dots, 9 \rightarrow f_k = 2,50; 5,02; 7,53; 10,04; 12,55; 15,06, \dots$

На рис. 7 приведены частотные характеристики, построенные по зависимостям (13) и (14) для $q_0 = 0,7$. Над каждым резонансным пиком проставлено число, указывающее частоту резонанса и высоту пика.

На частоте 12,55 Гц водовод имеет жесткий синхронный резонанс, близкий по частоте к девятой резонансной гармонике напорного трубопровода и к частоте четвертьволнового резонанса отсасывающей трубы. Высота резонансного пика достигает 36, а это значит, что возмущение давления, равное 1 % от номинального напора, на частоте резонанса приведет к пульсациям давления, равным трети номинального напора.

Этот пример показывает, что рассматриваемый без учета влияния нестационарных явлений в отсасывающей трубе процесс распространения ударных волн только в напорном трубопроводе не дает правильного представления о резонансных явлениях в водоводе агрегата в целом.

Возникает вопрос: мог ли появиться резонанс, вызванный описанной синхронизацией резонансных колебаний в водоводах СШГЭС? Одним из источников возбуждения гидракустического резонанса является кавитационный жгут, формирующийся в отсасывающей трубе в не рекомендуемых для длительной эксплуатации режимах. Для ответа на этот вопрос был проведен вычислительный эксперимент на математической модели, структурная схема которой изображена на рис. 8. Модель выполнена в соответствии с методикой, изложенной в [14]. Ввод возмущения в модели возможен путем изменения открытия направляющего аппарата, а также формированием импульсов давления в любом сечении отсасывающей трубы и непосредственно за турбиной. В качестве тестовой задачи для модели служила задача закрытия сервомотора с постоянной скоростью, равной максимальной скорости движения сервомотора СШГЭС. Решение тестовой задачи приведено на рис. 9.

Вид переходного процесса и величина повышения давления соответствуют параметрам водовода и времени закрытия при изменении расхода по линейному закону. Составляющая динамического увеличения перепада давления на турбине при линейном закрытии составила приблизительно 15 % от действующего напора, что хорошо согласуется с экспериментальными данными [17, рис. 3.32, стр. 248]. На осциллограмме хорошо видно слабое демпфиро-

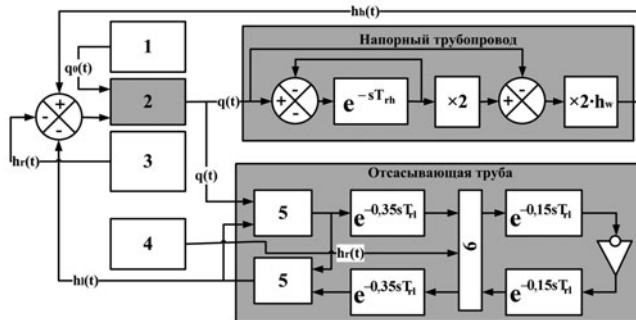


Рис. 8. Структурная схема математической модели для изучения интерференционного резонанса в водоводе радиально-осевой турбины (Саяно-Шушенская ГЭС):

1, 2, и 4 — блоки формирования возмущающих воздействий; А и A^{-1} — матрицы прямого и обратного преобразований естественных переменных (отклонения напора и расхода) в волны Д'Аламбера

Значение расхода в статике и динамических отклонений перепада на турбине, давлений перед и за турбиной

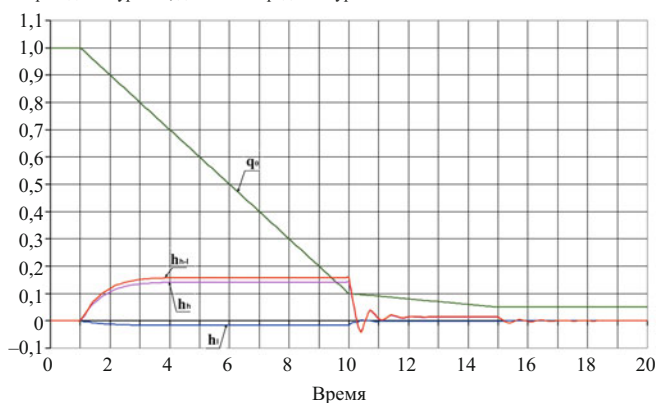


Рис. 9. Осциллограмма процесса закрытия регулирующих органов с линейным изменением статического расхода

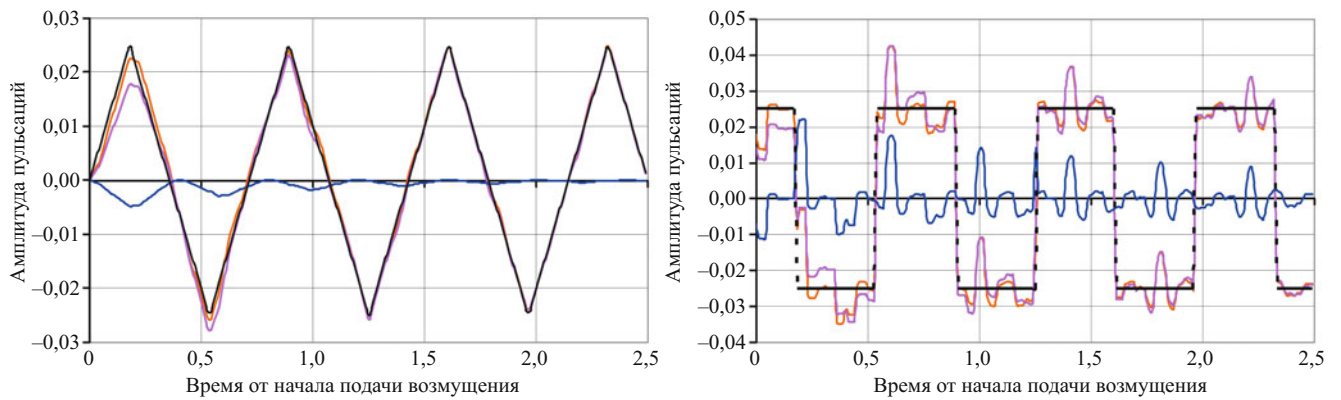


Рис. 10. Осциллограмма пульсаций давления в водоводе при треугольной и прямоугольной формах импульсов возмущения давления за турбиной. Давление перед турбиной (малиновый цвет), за турбиной (оранжевый цвет); возмущение давления, приложенное за турбиной (черный цвет); реакция отсасывающей трубы на возмущение (синий цвет).

ние колебаний четвертьволнового резонанса напорного трубопровода при малых открытиях (конечное открытие 5 % максимального).

Заметим, что математическая модель простого трубопровода многократно проверена сопоставлением результатов расчета и эксперимента при исследовании водоводов ковшовых турбин. Ее свойства достаточно хорошо изучены, и она может быть использована как инструмент для идентификации возмущений по виду переходного процесса отклонения давления в сечении направляющего аппарата. Напорный трубопровод агрегата СШГЭС без каких-либо оговорок на всем протяжении имеет постоянную площадь сечения неизменной формы и слабо изогнут, поэтому рассматриваемая ниже особенность реакции простого трубопровода на периодические сигналы определенных частот и гармонического состава будет присуща и ему. Эту особенность можно использовать для оценки достоверности некоторых результатов натурных испытаний. В чем заключается эта особенность? Знаменатель передаточной функции напорной части трубопровода (8) имеет бесконечное число полюсов на мнимой оси. Все полюсы расположены в точках $j\left(\frac{T_{rh}\omega_k}{2}\right) = (2k + 1)\frac{\pi}{2}$, где k — любое целое число из промежутка $(-\infty, +\infty)$. На этих частотах, образу-

ющих ряд нечетных гармоник, первая из которых имеет частоту $\omega_1 = \frac{\pi}{2T_{rh}}$, усиление по отношению к возму-

щению на выходе из турбины равно единице, а на частотах кратных ω усиление равно нулю. Поэтому в режиме установившегося возмущенного движения под воздействием приложенных к входу в отсасывающую трубу периодических пульсаций давления, частота первой гармоники которых равна ω_1 , перед входом в турбину будут наблюдаться пульсации, форма которых определяется суммой нечетных гармоник возмущения. Все четные гармоники возмущения, просуммированные с реакцией на них отсасывающей трубы, определяют перепад давления на турбине и колебания расхода. Таким образом, если периодический сигнал возмущения содержит гармонические составляющие, частоты которых совпадают с резонансными частотами передаточной функции (3) напорного участка трубопровода, то с течением времени влияние этих гармонических составляющих на изменение расхода будет полностью скомпенсировано колебаниями давления на входе в турбину. На осциллограммах рис. 10 представлены графики начала процессов при подаче на выход турбины возмущений, содержащих гармоники четвертьволнового резонанса. Частота приложенного возмущения $\omega_1 = \pi/T_{rh} = 8,8 \text{ с}^{-1} = 1,4 \text{ Гц}$, $q_0 = 1$.

Так как пульсация давления треугольной формы не содержит четных гармоник, то в конечном итоге (рис. 10) давление перед турбиной в точности повторяет его изменение на входе в отсасывающую трубу. При этом пульсации расхода постепенно становятся равными нулю, и вызванный отклонениями расхода переходный процесс в отсасывающей трубе с течением времени затухает. Перепад давления на турбине также становится равным нулю, а пульсации давления за турбиной в точности совпадают с возмущением. Нет четных гармоник и в прямоугольных импульсах с заполнением $D = 0,5$. Соответствующая реакция напорного участка водовода на возмущение в виде прямоугольных импульсов на входе в отсасывающую трубу приведена на рис. 10 (справа).

На рис. 11 представлены графики пульсаций давления в тракте водовода под действием приложенного к выходу турбины возмущения по давлению пилообразной формы при $q_0 = 1$.

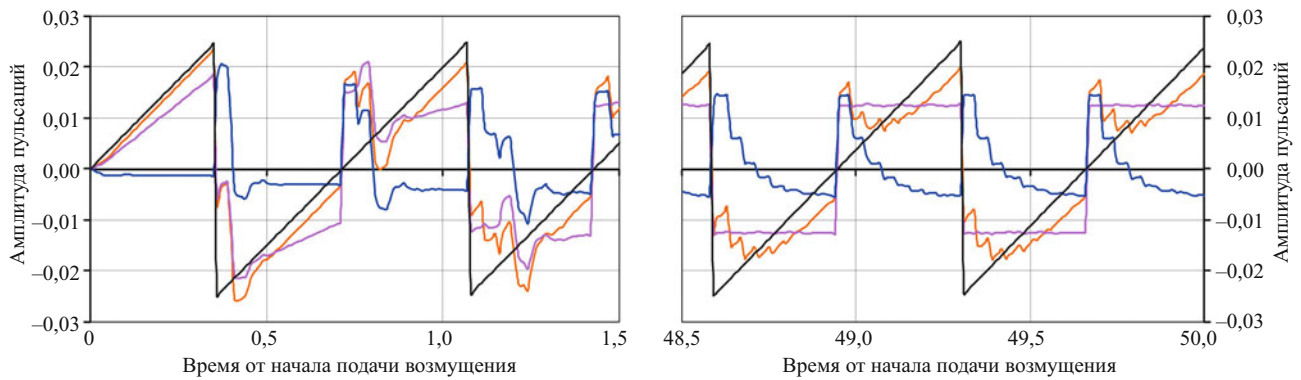


Рис. 11. Осциллограмма пульсаций давления в водоводе при пилообразной форме импульсов возмущения давления за турбиной с частотой первой гармоники четвертьволнового резонанса. Давление перед турбиной (малиновый цвет), за турбиной (оранжевый цвет); возмущение давления, приложенное за турбиной (черный цвет); реакция отсасывающей трубы на возмущение (синий цвет)

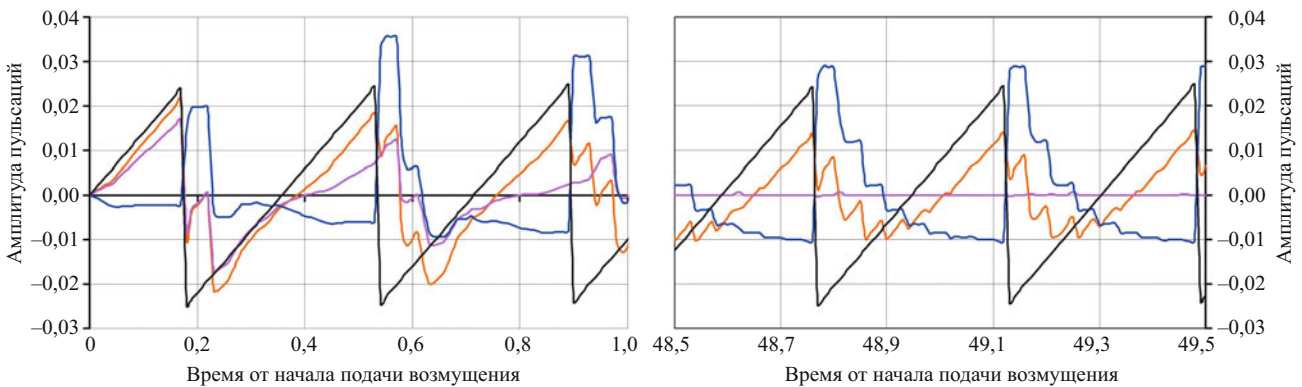


Рис. 12. Осциллограмма пульсаций давления в водоводе при пилообразной форме импульсов возмущения давления за турбиной с частотой второй гармоники четвертьволнового резонанса. Давление перед турбиной (малиновый цвет), за турбиной (оранжевый цвет); возмущение давления, приложенное за турбиной (черный цвет); реакция отсасывающей трубы на возмущение (синий цвет)

Известно, что возмущение такой формы разлагается в ряд Фурье, который содержит все гармоники с весовыми коэффициентами обратно пропорциональными их номерам. Если просуммировать отдельно нечетные и четные гармоники этого ряда Фурье, то получится два периодических колебания: меандр с амплитудой, равной половине амплитуды исходного сигнала (сумма нечетных гармоник), частота которого совпадает с частотой исходного, и пилообразная пульсация удвоенной частоты с амплитудой, также равной половине амплитуды исходного сигнала. Видно (рис. 11, справа), что с течением времени напорному участку трубопровода как своеобразной следящей системе, имеющей на резонансных частотах единичное усиление нечетных гармоник и равное нулю усиление четных, удается выделить и скомпенсировать влияние на перепад давления только нечетных гармоник. Если возмущение содержит только четные гармоники (пилообразное возмущение частоты 2,8 Гц) (рис. 12), то после затухания, вызванного подачей возмущения переходного процесса, в напорном трубопроводе не наблюдается пульсаций давления.

Пусть зависимость перепада давления на турбине симметрично зависит от отклонений давления перед и за турбиной: $h_{l-h} = h_h - K_{l/h} \cdot h_l$ и $K_{l/h} = 1$.

Из формул (12) и (13) следует, что $|V_h(j\omega)| \leq 1$ и $\left| \frac{V_h(j\omega)}{V_{l+r}(j\omega)} \right| \leq 1$, если возмущение приложено к выходу

турбины. Оценим приведенные в [17] экспериментальные данные о пульсациях давления в спиральной камере и на входе в отсасывающую трубу. Рассмотрим, например, фрагмент записи пульсаций давления в водоводе агрегата № 10 СШГЭС [17, рис. 3.31, стр. 246]. В описании опыта говорится, что пульсации происходят на частоте 1,39 – 1,45 Гц, т.е. как раз на частоте, близкой к первой резонансной частоте характеристики разомкнутого напорного водовода. Как видно из осциллограммы, пульсация давления перед спиральной камерой намного больше пульсации на выходе из турбины. Но пульсации на входе в спиральную камеру имеют ярко выраженную треугольную форму. Следовательно, пульсации на выходе потока из турбины должны иметь близкую к треугольной форму и по амплитуде быть сравнимыми с пульсациями в спиральной камере. На осциллограмме отклонения давления на входе в отсасывающую трубу по амплиту-

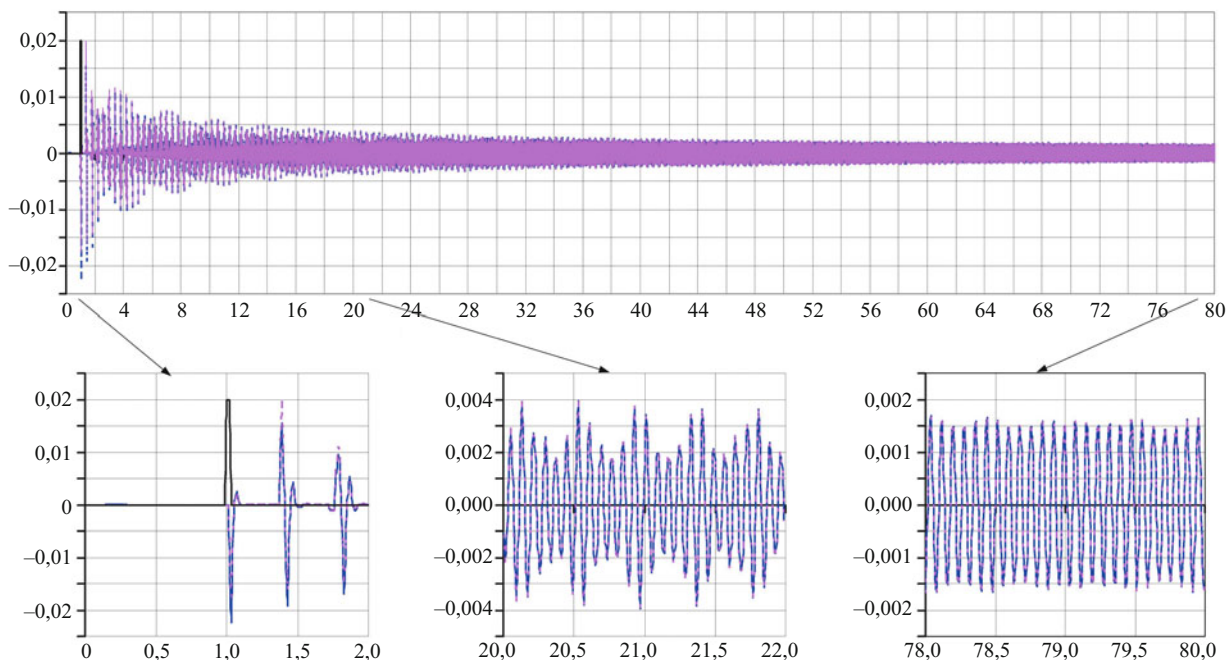


Рис. 13. Синхронизация волновых процессов в напорном трубопроводе (малиновый цвет) и в отсасывающей трубе (синий цвет) при возбуждении одиночным импульсом (черный цвет)

де значительно меньше, чем пульсации перед турбиной. А ведь пульсации за турбиной являются суммой реакции отсасывающей трубы на возмущение и самим возмущением. Чем это можно объяснить? Согласно [9] в режиме большой нагрузки при работе в заоптимальной области непосредственно за турбиной образуется мощная вихревая структура с азимутальными волнами давления. Эта структура является генератором инфразвукового излучения, поэтому процесс распространения продольных ударных волн в отсасывающей трубе отсутствует. Наличие больших градиентов давления в радиальных направлениях за турбиной приводит к сильному искажению линий тока в турбине и увеличению влияния пульсаций давления в отсасывающей трубе на расход, следовательно, гипотеза: $K_{l/h} = 1$ не выполняется, и пульсации давления в спирали могут быть больше, чем пульсации давления измеренные к тому же у стенки отсасывающей трубы. Большие отклонения расхода, вызванные “незначительными” (по результатам эксперимента) пульсациями давления в отсасывающей трубе, на резонансных частотах напорного трубопровода приводят к значительным пульсациям давления в спиральной камере и на входе в турбину. Можно предположить, что компенсационное действие напорного трубопровода: его способность поддерживать постоянство расхода на нечетных гармониках, значительно уменьшает отвод энергии колебаний в электрическую сеть. А, значит, их энергия тратится на деформацию и перемещение узлов агрегата. Все эти явления наблюдались при открытии направляющего аппарата равном 93% от полного открытия. В этой точке происходит изменение знака момента воздействия потока на лопатки. Учитывая особенности конструкции синхронизации индивидуальных приводов лопаток направляющего аппарата, можно почти со 100% уверенностью утверждать, что в этом режиме наблюдалась игра лопаток и пульсации давления масла в трубопроводах гидропривода. Впечатление от наблюдения этого режима было побудительным мотивом написания статьи [4].

Основная, рассмотренная в предыдущих разделах модель (два резонатора с турбиной между ними) распространения ударных волн по водоводам агрегата справедлива для режимов, близких к оптимальному, когда течение в отсасывающей трубе характеризуется незначительными окружными составляющими скоростей. Это нормальные эксплуатационные режимы и близкие к ним, в частности, это могут быть режимы на границах зон нормальной работы и не рекомендованных для длительной эксплуатации при снижении нагрузки. Для проверки синхронизации резонансных акустических процессов в напорной части трубопровода и в отсасывающей трубе был проведен опыт с генерацией одиночного импульса давления длительностью 0,02 с и амплитудой 2 % от величины напора в последней трети отсасывающей трубы. Рис. 13 иллюстрирует процесс синхронизации резонансных колебаний давления перед и за турбиной при $q_0 = 0,7$.

В начальный период времени импульсы давления перед и за турбиной имеют значительно отличающиеся амплитуды и фазы, что говорит об обмене энергией между колеблющимися массами воды и внешними потребителями энергии (электрическая нагрузка) и донором (потенциальная энергия воды). Посте-

ленно амплитуды выравниваются, синхронность колебаний улучшается, и турбина, изменения перепада на которой уменьшаются, а также напор, в силу малой изменчивости столба воды, действующего на совокупную колеблющуюся массу воды, всё меньше и меньше влияют на волновые процессы в водоводах ГЭС. Постепенно устанавливаются колебания, при которых отношения амплитуд и фаз волн, одновременно приходящих к турбине, обеспечивают минимальный обмен энергией с потребителями и донорами энергии в процессе преобразования потенциальной энергии воды в электрическую.

Было рассмотрено также поведение исследуемой динамической системы при периодических воздействиях, характерных для работы гидротурбины. При высоком напоре в зоне нагрузок 350 – 450 МВт (II зона, не рекомендованная для длительной эксплуатации) пульсации давления в отсасывающей трубе и в спиральной камере имеют локальный максимум [17], причем амплитуда пульсаций в отсасывающей трубе больше, чем в спиральной камере. Возмущение давления в отсасывающей трубе в этих режимах согласно экспертной оценке имеет вид коротких импульсов, частота следования которых равна частоте вращения жгута. В модели возмущение давления генерировалось на одной трети длины отсасывающей трубы при отсчете от нижнего бьефа. Частота следования импульсов выбиралась таким образом, чтобы одна из гармоник возмущения совпадала с одной из частот интерференционных резонансов. На рис. 14, 15, и 16 приведены характерные виды пульсаций, вызванных периодическим импульсным возмущением давления в сечении последней трети отсасывающей трубы при $q_0 = 0,7$. Амплитуда возмущающего импульса 2 % от номинального напора, длительность 20 мс. Частоты следования:

2,008 Гц — для возбуждения гидроакустического резонанса на частоте 10,04 Гц (рис. 14);

2,512 Гц — для возбуждения гидроакустического резонанса на частоте 12,55 Гц (рис. 15);

3,012 Гц — для возбуждения гидроакустического резонанса на частоте 15,06 Гц (рис. 16).

На этих рисунках можно проследить, как с уменьшением периода следования возмущающих импульсов синхронные пульсации давления за турбиной и перед ней переходят от частоты 10,04 Гц (первый слабо выраженный резонанс) к частоте 12,55 Гц (основной резонанс) и затем к 15,06 Гц (второй слабо выраженный резонанс). Возбуждение колебаний в приведенных выше случаях вызывает пятую гармонику возмущения. Амплитуды вынужденных колебаний примерно пропорциональны высоте пиков частотной характеристики. При частотах возмущения 0,4 – 0,7 Гц пульсации давления определяются основным резонансом с частотой 12,5 Гц (рис. 17).

При увеличении длительности возмущающего импульса растет амплитуда пульсаций давления. Осциллограмма рис. 18 наглядно иллюстрирует почти двукратный рост амплитуды пульсации при увеличении длительности возмущающих импульсов.

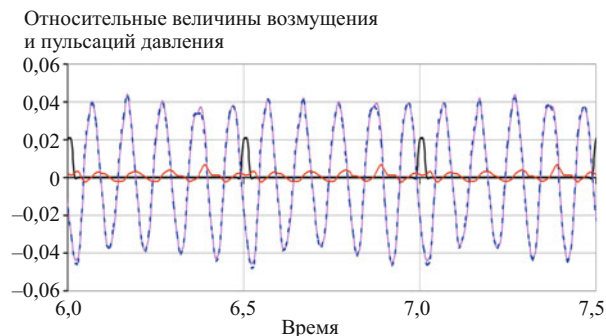


Рис. 14. Осциллограмма пульсаций давления перед турбиной при частоте следования импульсов возмущения 2,008 Гц; длительность импульса возмущения 0,02 с — черный цвет, пульсации перед турбиной — малиновый цвет, пульсации за турбиной — синий цвет

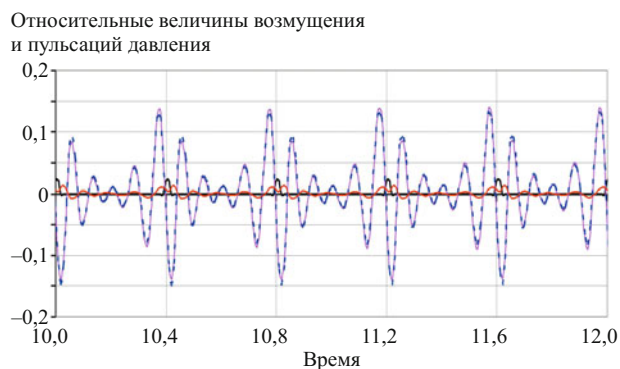


Рис. 15. Осциллограмма пульсаций давления перед турбиной при частоте следования импульсов возмущения 2,112 Гц; длительность импульса возмущения 0,02 с — черный цвет, пульсации перед турбиной — малиновый цвет, пульсации за турбиной — синий цвет

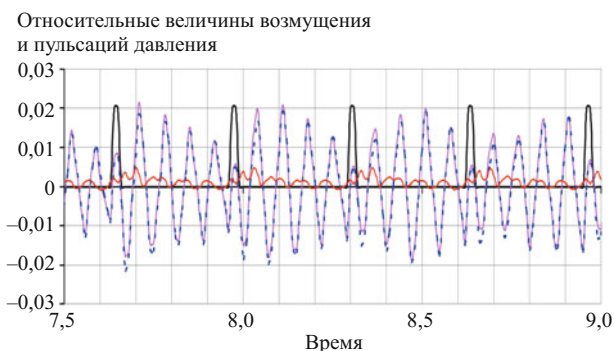


Рис. 16. Осциллограмма пульсаций давления перед турбиной при частоте следования импульсов возмущения 3,03 Гц; длительность импульса возмущения 0,02 с — черный цвет, пульсации перед турбиной — малиновый цвет, пульсации за турбиной — синий цвет.

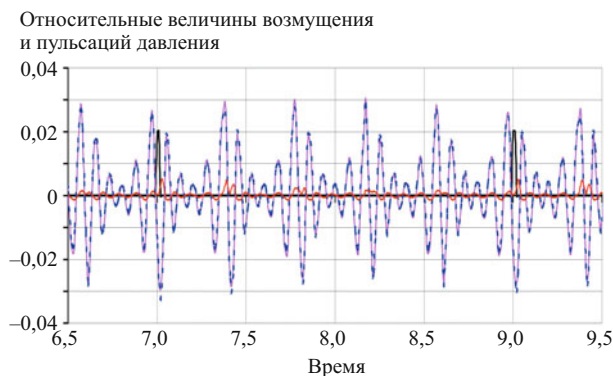


Рис. 17. Оциллограмма пульсаций давления перед турбиной при частоте следования импульсов возмущения 0,5 Гц: длительность импульса возмущения 0,02 с — черный цвет, пульсации перед турбиной — малиновый цвет, пульсации за турбиной — синий цвет



Рис. 18. Оциллограмма пульсаций давления перед турбиной при частоте следования импульсов возмущения 0,5 Гц: длительность импульса возмущения 0,02 с — малиновый цвет, 0,04 с — синий цвет

В. С. Селезнева и была выложена в Интернете на форуме “СШГЭС — взгляд изнутри и снаружи”, пост # 10856. На сейсмограмме наблюдается картина вибрации машины под действием пульсаций давления при более сложном возмущении, чем было рассмотрено в вычислительном эксперименте. Нетрудно видеть, что постоянным фоном к пачкам импульсов главного интерференционного резонанса (частота приблизительно 11 – 13 Гц) является постоянная пульсация с частотой примерно 15 – 16 Гц. Импульсы, возбуждающие главный интерференционный резонанс, нерегулярны и, по-видимому, имеют разную мощность. На отметке времени 809 (соответствует московскому времени 08.13.29, 17 августа 2009 г.) наблюдаются резкое увеличение резонансных колебаний и разрушение машины. Относительная величина среднего расхода при этом практически была постоянна и равнялась приблизительно $q_0 = 0,7$.

Выводы

1. Для изучения вызванных жгутовыми возмущениями в отсасывающей трубе пульсаций давления в водоводе радиально-осевой турбины предложена достаточно простая математическая модель, позволяющая получить представление о возможных гидроакустических резонансах в динамической системе “напорный трубопровод — турбина — отсасывающая труба” построением частотных характеристик.

2. Выявлено два типа реакции водовода как динамической системы на жгутовые возмущения в отсасывающей трубе:

повторение некоторых частот пульсаций давления в отсасывающей трубе отклонениями давления перед входом в турбину (модель форсированного режима большой нагрузки с вихревым течением в отсасывающей трубе);

ударное возбуждение на частотах квазипиковых резонансов (режим эксплуатации в разрешенной зоне и близко к ее границе с относительно малой закруткой потока и организованным течением в отсасывающей трубе).

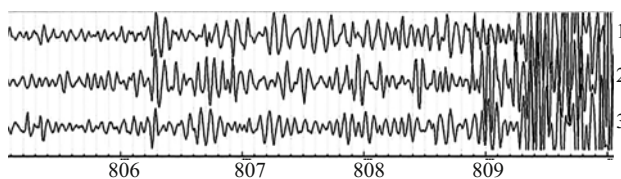


Рис. 19. Сейсмограмма сейсмостанции “Черемушки” момента аварии агрегата № 2 Саяно-Шушенской ГЭС. Отметка времени 805 на сейсмограмме соответствует московскому времени 08:13:25, 17 августа, 2009 г. Направление колебаний, регистрируемых датчиками: 1 — север-юг; 2 — верх-низ; 3 — запад-восток

сов, частота следования которых равна 0,5 Гц, а амплитуда 4 % от номинального напора, в два раза (с 0,02 до 0,04 с).

Процесс достижения амплитудой пульсаций значений, близких к установившимся на резонансных частотах при периодическом возмущении, содержащем гармоники с частотами, близкими к резонансной, носит достаточно интенсивный характер. При возмущении из диапазона частот 1 – 3 Гц амплитуда пульсаций устанавливается практически сразу после прихода одного, двух импульсов. Величина ее определяется амплитудой импульсов возмущения и в дальнейшем изменяется незначительно.

Наличие относительно высокочастотного интерференционного гидроакустического резонанса в рабочей зоне II агрегата СШГЭС подтверждает представленная на рис. 19 оциллограмма самописцев сейсмостанции “Черемушки” в момент аварии агрегата № 2 СШГЭС. Эта сейсмограмма неоднократно приводилась в докладах заведующего станцией д.г.-м.н.

3. Предложенная модель позволяет непротиворечиво объяснить некоторые результаты натурных исследований агрегата № 10 СШГЭС и сейсмограмму записи колебаний тела плотины при аварии агрегата № 2.

4. Резонансные характеристики модели чувствительны к точности исходных данных: частоты резонансов и высоты их амплитудных пиков сильно зависят от соотношения длин отсасывающей трубы и напорной части водовода, а также от скорости распространения ударных волн в них.

5. *Синхронные резонансные явления опасны в зоне режимов, рекомендованных для длительной эксплуатации.* Для Саяно-Шушенской ГЭС основная частота синхронного резонанса 12,55 – 11,15 Гц (при скоростях распространения ударной волны 1350 и 1200 м/с соответственно) близка к пятой гармонике частоты вращения 11,9 Гц. Наличие синхронного резонанса связано с появлением достаточно высокочастотной переменной нагрузки на крышку турбины и ее крепление к корпусу.

Список литературы

1. Каганов В. И. Неизбежны ли техногенные аварии? // Электро. 2011. № 2.
2. Акт технического расследования причин аварии на Саяно-Шушенской ГЭС.
3. Колосов М. А. Надежность направляющего аппарата турбины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехника XXI век. 2011. № 1(4), март.
4. Арм В. Х., Окулов В. Л., Пылев И. М. Неустойчивость напорных систем гидроэнергоблоков // Известия АН. Сер. Энергетика. 1996. № 3. С. 122 – 131.
5. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. — М.-Л.: Гостехиздат, 1949.
6. Шрамков К. А. Исследование потока в водоводе с радиально-осевой турбиной // Энергомашиностроение. 1965. № 8.
7. Пази Л. Г. Исследование периодических пульсаций давления в отсасывающих трубах гидротурбин // Труды ВНИИГидромаша. 1968. Вып. 37.
8. Каравосов Р. К., Прозоров А. Г. Неординарное возбуждение гидроакустического резонанса в гидротурбинном тракте Саяно-Шушенской ГЭС // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84. № 3.
9. Зайцев М. Ю., Копьев В. Ф., Мушин А. Г., Потокин А. А. Излучение звука турбулентным вихревым кольцом // Докл. АН СССР. 1990. Т. 312. № 5. С. 1080 – 1083.
10. Зайцев М. Ю., Копьев В. Ф. О механике излучения звука вихревым кольцом // Акустический журнал. 1993. Т. 39. № 6. С. 1068 – 1074.
11. Гараев Ф. А. Универсальность принципа синхронизации // Паропсихология и психофизика. 2000. № 1.
12. Башнин О. И., Пасынкова Н. П., Семенов В. В. Об одном способе аналогового моделирования поворотнлопастных турбин // Системы управления и контроля. — Л.: Наука, 1968. С. 105 – 111.
13. Пивоваров В. А. Проектирование и расчет систем регулирования гидротурбин. — Л.: Машиностроение, 1973.
14. Башнин О. И. Исследование процесса упругого гидравлического удара в водоводах ГЭС // Автоматическое управление энергетическими агрегатами / ВНИИЭлектромаш. Л., 1980.
15. Берлин В. В., Муравьев О. А. Переходные процессы на ГЭС с уравнительными резервуарами. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
16. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного. — М.: Наука, 1965.
17. Брызгалов В. И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций: Производственное издание.
18. Интернет. Форум “СШГЭС — взгляд изнутри и снаружи”, пост # 10856.
19. Семенов В. В. Моделирование гидравлических турбин, трубопроводов, регуляторов скорости // Электродинамическое моделирование энергетических систем / Под ред. М. П. Костенко. — М.-Л.: Наука, 1959.

Исследование резонансных явлений в напорных водоводах и отсасывающих трубах ГЭС

Берлин В. В., кандидат техн. наук, Муравьев О. А., доктор техн. наук (МГСУ)

Рассматриваются модель возникновения и развития резонансных явлений в водоводах ГЭС, вопросы учета пульсаций давления в расчетах переходных процессов, совершенствования численных моделей для расчета нагрузок на сооружения и оборудование при проектировании и эксплуатации ГЭС.

Ключевые слова: резонанс в напорных водоводах ГЭС, пульсации давления в проточном тракте гидротурбин, частотные характеристики системы водовод-турбина, гидромеханические переходные процессы, Саяно-Шушенская ГЭС.

В мировой практике гидроэнергетического проектирования решения по конструкциям напорных водоводов и отчасти по основному гидроэнергетическому оборудованию принимаются на основе численного моделирования работы ГЭС в переходных процессах. Современные численные модели подробно описывают характеристики турбинного оборудования и водоводов, режимы работы систем автоматического регулирования агрегатного и станционного уровней. Фактически речь идет о компьютерном аналоге реальной гидроэлектростанции, что позволяет моделировать любые штатные и нештатные ситуации, возможные при эксплуатации.

Опыт анализа аварии на Саяно-Шушенской ГЭС показал эффективность использования математической модели ГЭС, позволившей восстановить целостную картину развития аварии [1]. Эта авария вновь поставила вопросы оценки пульсационного состояния системы турбина — проточный тракт при установившихся режимах и переходных процессах, устойчивости режимов ГЭС при вынужденных колебаниях пропускной способности и давления.

Существующие математические модели позволяют детально описать процессы, связанные с движением регулирующих органов турбин при регулировании частоты, мощности, пусках, остановках и сбросах нагрузки. Одной из актуальных задач совершенствования математических моделей является определение гидроудара и пульсаций в едином переходном процессе.

Нестационарность потока в турбине порождается возмущающими воздействиями со спектром от десятых долей до сотен герц. Это низкочастотные возмущения, связанные с вращением вихревого жгута под рабочим колесом, среднечастотные, связанные с обтеканием лопастей турбины и лопаток направляющего аппарата, и высокочастотные, связанные со срывом вихрей с лопастей. Кроме того, наблюдаются обратная, двойная обратная, лопаточная и лопатная частоты, частота крутильных колебаний вала агрегата.

При столь широком частотном спектре вынужденных колебаний с большой вероятностью возник

ает их резонанс с собственными колебаниями давления в напорном водоводе или в отсасывающей трубе на основной или кратных частотах. Однако этот резонанс имеет свои особенности.

Аналитические решения и натурные данные показывают, что колебания давления при резонансе не растут бесконечно, а принципиально ограничены. Это проявляется при всех нагрузочных, а также в разгонных и тормозных режимах. Положение об ограниченности колебаний давления в напорном водоводе при резонансе является основополагающим для анализа процессов в проточном тракте гидротурбин.

Для получения аналитического решения задачи о пульсациях давления в напорных водоводах ГЭС необходим учет свойств турбины по изменению расхода в функции напора.

Аналитическое описание расходной характеристики турбины базируется на линеаризованных уравнениях [2], описывающих поведение гидротурбины вблизи точки равновесного режима:

$$\Delta q = \frac{\Delta Q_{возм}}{Q_{ln}} \sqrt{\frac{H_e}{H_n}} + \frac{\frac{Q_{1e}}{Q_{ln}} - \frac{n_{1e}}{n_1} \frac{\partial Q_1}{\partial n_1}}{2\sqrt{\frac{H_e}{H_n}}} \frac{\Delta H_{пульс}}{H_n}. \quad (1)$$

Выражение (1) записано для постоянного открытия регулирующих органов и постоянной частоты вращения. Расход турбины представлен двумя составляющими. Первая — это возмущающее воздействие в виде отклонения пропускной способности турбины из-за нестационарности потока под рабочим колесом. Вторая — отклонение расхода в результате реакции напорной системы на возмущающее воздействие.

Реакция напорной системы представлена в виде отклонения напора при пульсациях $\Delta H_{пульс}$ относительно среднего значения напора H_e в рассматриваемом режиме. В относительных величинах линеаризованное уравнение турбины имеет вид

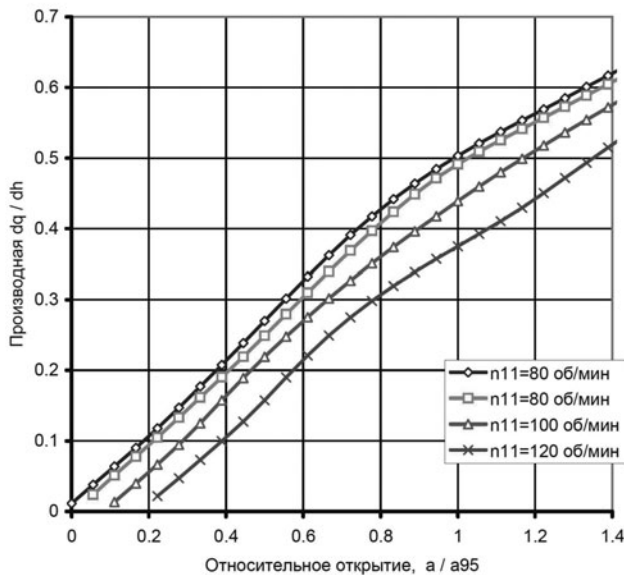


Рис. 1. Значения производной $k_{q/h} = \frac{\partial q}{\partial h}$ для турбины РО230/833 в эксплуатационных и разгонных режимах

$$\Delta q = \Delta q_{\text{возм}} \sqrt{h_e} + k_{q/h} \Delta h_{\text{пульс}}, \quad (2)$$

где Δq — отклонение расхода турбины; $\Delta q_{\text{возм}}$ — возмущающее воздействие в виде отклонения пропускной способности турбины, вызываемое нестационарностью потока в турбине; $\Delta h_{\text{пульс}}$ — отклонение напора из-за пульсаций давления; $k_{q/h}$ — производная (изменение расхода турбины по напору), определяемая выражением

$$k_{q/h} = \frac{\partial q}{\partial h} = \frac{q_{1e} - k_{q/\varphi}}{2\sqrt{h_e}}, \quad (3)$$

где q_{1e} — относительный приведенный расход равновесного режима; $k_{q/\varphi}$ — производная приведенного расхода турбины по приведенной частоте вращения

$$k_{q/\varphi} = \frac{n_{1e}}{Q_{1n}} \cdot \frac{\partial Q_1}{\partial n_1}. \quad (4)$$

На рис. 1 показаны изолинии производной $k_{q/h}$ в поле характеристики турбины РО230/833 при приведенных частотах вращения $n_1^1 = nD/\sqrt{H}$. В области больших открытий турбины значения производной $k_{q/h}$ достигают 0,5 – 0,6 и почти линейно уменьшаются с уменьшением открытия. Ниже будет показано, что при постоянной интенсивности возмущения максимумы пульсаций давления растут с уменьшением производной $k_{q/h}$.

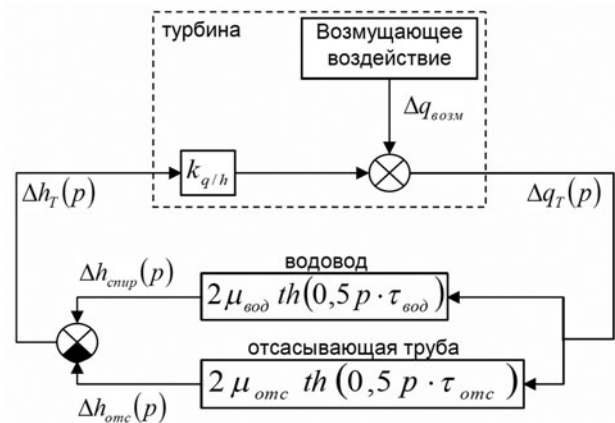


Рис. 2. Структурная схема динамической системы водовод — турбина — отсасывающая труба

Передаточные функции замкнутой динамической системы водовод — турбина отсасывающая труба. Структурная схема динамической системы водовод — турбина — отсасывающая труба показана на рис. 2. Турбина при постоянном открытии регулирующих органов и постоянной частоте вращения описана пропорциональным звеном (2), учитывающим возмущающее воздействие в виде колебаний пропускной способности, а также влияние на расход пульсационного отклонения напора. Отклонение напора получается сложением отклонений давления в спиральной камере и в горловине отсасывающей трубы (под рабочим колесом турбины).

Для учета влияния переходных процессов в водоводе и отсасывающей трубе на напор турбины используются волновые уравнения гидроудара. В преобразованиях Лапласа они представлены в виде передаточных функций, связывающих отклонение давления с отклонением расхода [3]:

$$\Delta h(p) = -\mu \cdot th(0,5p\tau) \cdot \Delta q(p), \quad (5)$$

где p — оператор Лапласа; $\mu = \frac{c \cdot Q_n}{2g \cdot F \cdot H_e}$ — характеристика напорного водовода; $\tau = 2L/c$ — фаза гидроудара.

Ниже записаны передаточные функции, показывающие зависимость пульсационного отклонения давления от возмущающего воздействия в виде изменения пропускной способности турбины (рис. 2). Передаточные функции для давлений в спиральной камере (6) и в горловине отсасывающей трубы (7) учитывают гидроудар в динамической системе водовод — турбина — отсасывающая труба, а также взаимное влияние пульсаций давления и расхода турбины.

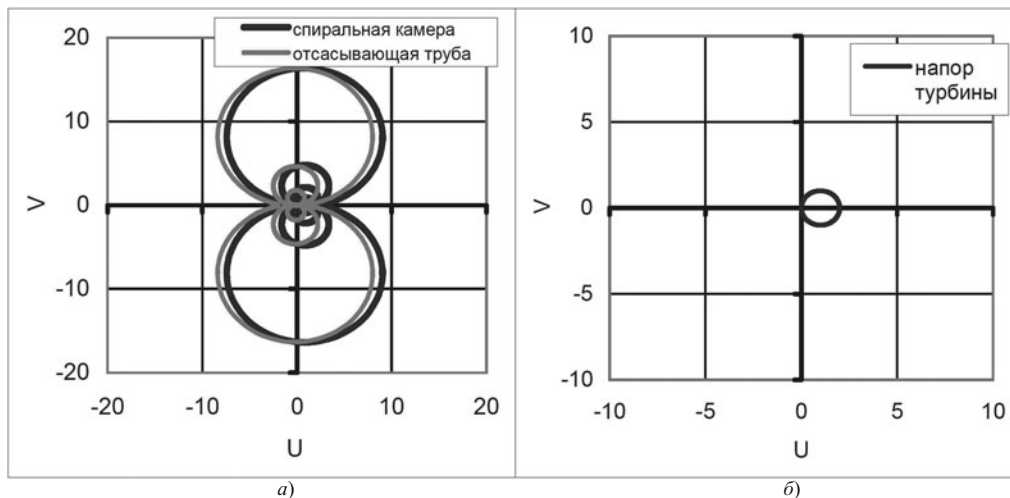


Рис. 3. Примеры амплитудно-фазовых характеристик при $f_{отс}/f_{вод} = 6$ и $k_{q/h} = 0,5$ для пульсаций давления в спиральной камере и горловине отсасывающей трубы (а), для результирующих пульсаций напора турбины (б)

$$W_{hспир}(p) = \frac{\Delta h_{спир}(p)}{\Delta q_{возм}} = \frac{2\mu_{вод} \cdot th(0,5p \cdot \tau_{вод}) \sqrt{h_e}}{1 - k_q \left[\frac{2\mu_{вод} \cdot th(0,5p \cdot \tau_{вод}) + 2\mu_{отс} \cdot th(0,5p \cdot \tau_{отс})}{h} \right]}, \quad (6)$$

$$W_{hотс}(p) = \frac{\Delta h_{отс}(p)}{\Delta q_{возм}} = \frac{2\mu_{отс} \cdot th(0,5p \cdot \tau_{отс}) \sqrt{h_e}}{1 - k_q \left[\frac{2\mu_{вод} \cdot th(0,5p \cdot \tau_{вод}) + 2\mu_{отс} \cdot th(0,5p \cdot \tau_{отс})}{h} \right]}, \quad (7)$$

где $2\mu_{вод} = cQ_n/gF_{вод}H_e$, $2\mu_{отс} = cQ_n/gF_{отс}H_e$, $\tau_{вод} = 2L_{вод}/c$, $\tau_{отс} = 2L_{отс}/c$.

Индексом n отмечены параметры номинального режима, индексом e — параметры текущего равновесного режима.

Частотные характеристики замкнутой динамической системы водовод — турбина — отсасывающая труба. Свойства динамической системы оцениваются видом переходного процесса. В нашем случае это изменение во времени пульсаций давления в водоводе и отсасывающей трубе при изменении пропускной способности турбины по некоторому закону. Типовым является возмущающее воздействие в виде гармонических колебаний единичной амплитуды.

Частотный анализ позволяет выполнить количественную оценку возможных резонансов в рассматриваемой системе и проследить влияние на их параметры таких факторов, как соотношение между собственными частотами колебаний в водоводе и отсасывающей трубе, соотношение между частотами возмущающего воздействия и собственных колебаний, величина открытия турбины.

Собственная частота колебаний давления в напорном водоводе определяется соотношением

$$f_{вод} = c_{вод}/4L_{вод},$$

где $L_{вод}$ — длина водовода; $c_{вод}$ — скорость распространения волны гидроудара, определяемая с учетом характеристик облицовки водовода и упругости воды при отсутствии пузырькового воздуха.

Скорость волны можно рассчитать по известным зависимостям [3] или определить по осциллограммам натуральных испытаний. Собственная частота колебаний давления в отсасывающей трубе

$$f_{отс} = c_{отс}/4L_{отс}.$$

В качестве примера показаны амплитудно-фазовые частотные характеристики (АФХ) пульсаций давления в спиральной камере, отсасывающей трубе (рис. 3, а) и их сумма, представляющая собой АФХ пульсаций напора турбины (рис. 3, б). Характеристики получены для отношения $f_{отс}/f_{вод} = 6$ и режима номинальной нагрузки при $k_{q/h} = 0,5$.

АФХ пульсаций напора турбины представляет собой окружность диаметром $1/k_{q/h}$. Режимные точки на АФХ пульсаций напора совершают по окружности бесконечное число оборотов при изменении частоты возмущающего воздействия от 0 до ∞ .

АФХ пульсаций давления в спиральной камере — это система окружностей: режимная точка описывает каждую из окружностей при изменении частоты возмущений на $\Delta\omega/2\pi = 2f_{вод}$. АФХ проходит через начало координат, когда частота возмущения становится равной четным гармоникам собственной частоты водовода.

По мере приближения возмущений к нечетным гармоникам собственной частоты отсасывающей трубы радиус окружностей увеличивается, по мере приближения к четным гармоникам — уменьшается. Режимная точка проходит все окружности при

изменении частоты возмущающего воздействия на $\Delta\omega/2\pi = 2f_{отс}$.

АФХ пульсаций давления в горловине отсасывающей трубы — это также система окружностей. Движение режимной точки по каждой окружности происходит при изменении частоты возмущающего воздействия на $\Delta\omega/2\pi = 2f_{вод}$. АФХ проходит через начало координат, когда частота возмущающего воздействия становится равной нечетным гармоникам собственной частоты колебаний в водоводе $nf_{вод}$ ($n = 1, 3, 5 \dots$). По мере приближения частоты возмущений к нечетным гармоникам собственной частоты колебаний в отсасывающей трубе $\omega/2\pi = nf_{отс}$ ($n = 1, 3, 5, \dots$) радиус окружностей увеличивается, а по мере приближения к четным гармоникам $\omega/2\pi = nf_{отс}$ ($n = 2, 4, 6, \dots$) радиус окружностей уменьшается.

Из общего рассмотрения амплитудно-фазовых частотных характеристик пульсаций давления и напора можно заключить:

в рассматриваемой системе амплитуда пульсаций давления может существенно превышать амплитуду пульсаций напора;

сложение частотных характеристик пульсаций в спиральной камере и отсасывающей трубе дает частотную характеристику пульсаций напора в

виде окружности, что отвечает известному решению [3];

частота собственных колебаний в водоводе определяет периодичность минимумов частотной характеристики колебаний давления;

частота собственных колебаний в отсасывающей трубе определяет периодичность всей амплитудно-частотной характеристики пульсаций давления, повторяющейся с шагом $2f_{отс}$;

отношение частот $f_{отс}/f_{вод}$ определяет количество окружностей АФХ, а следовательно и количество резонансных пиков, которые возникают на интервале $\Delta\omega/2\pi = 2f_{отс}$.

Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики динамической системы водовод — турбина — отсасывающая труба показывают, как с изменением частоты возмущающего воздействия изменяются амплитуда и фаза вынужденных колебаний. В нашем случае исследуемыми параметрами являются:

пульсации давления в концевом сечении водовода (спиральной камере);

пульсации давления в горловине отсасывающей трубы;

пульсации напора турбины.

Амплитудно-частотная характеристика $A(\omega)$ или коэффициент передачи — это модуль ампли-

Т а б л и ц а 1

Характеристики колебаний давления в водоводе и отсасывающей трубе для сечений спиральной камеры и горловины отсасывающей трубы при $f_{отс}/f_{вод} = 6$

Диапазон частот вынужденных колебаний		Достижение резонансного максимума	Колебания в спиральной камере и отсасывающей трубе
по гармоникам колебаний в отсасывающей трубе	по гармоникам колебаний в напорном водоводе		
Между 0-й и 1-й	Между 0 и 1-й		Со сдвигом на $T^*/2$
	Между 1-й и 2-й	1-й максимум	В одной фазе
	Между 2-й и 3-й		Со сдвигом на $T/2$
	Между 3-й и 4-й	2-й максимум	В одной фазе
	Между 4-й — 5-й		Со сдвигом на $T/2$
	Между 5-й — 6-й	3-й максимум	В одной фазе
Между 1-й и 2-й	Между 6-й — 7-й	4-й максимум	В одной фазе
	Между 7-й — 8-й		Со сдвигом на $T/2$
	Между 8-й — 9-й	5-й максимум	В одной фазе
	Между 9-й — 10-й		Со сдвигом на $T/2$
	Между 10-й — 11-й	6-й максимум	В одной фазе
	Между 11-й — 12-й		Со сдвигом на $T/2$

* T — период вынужденных колебаний.

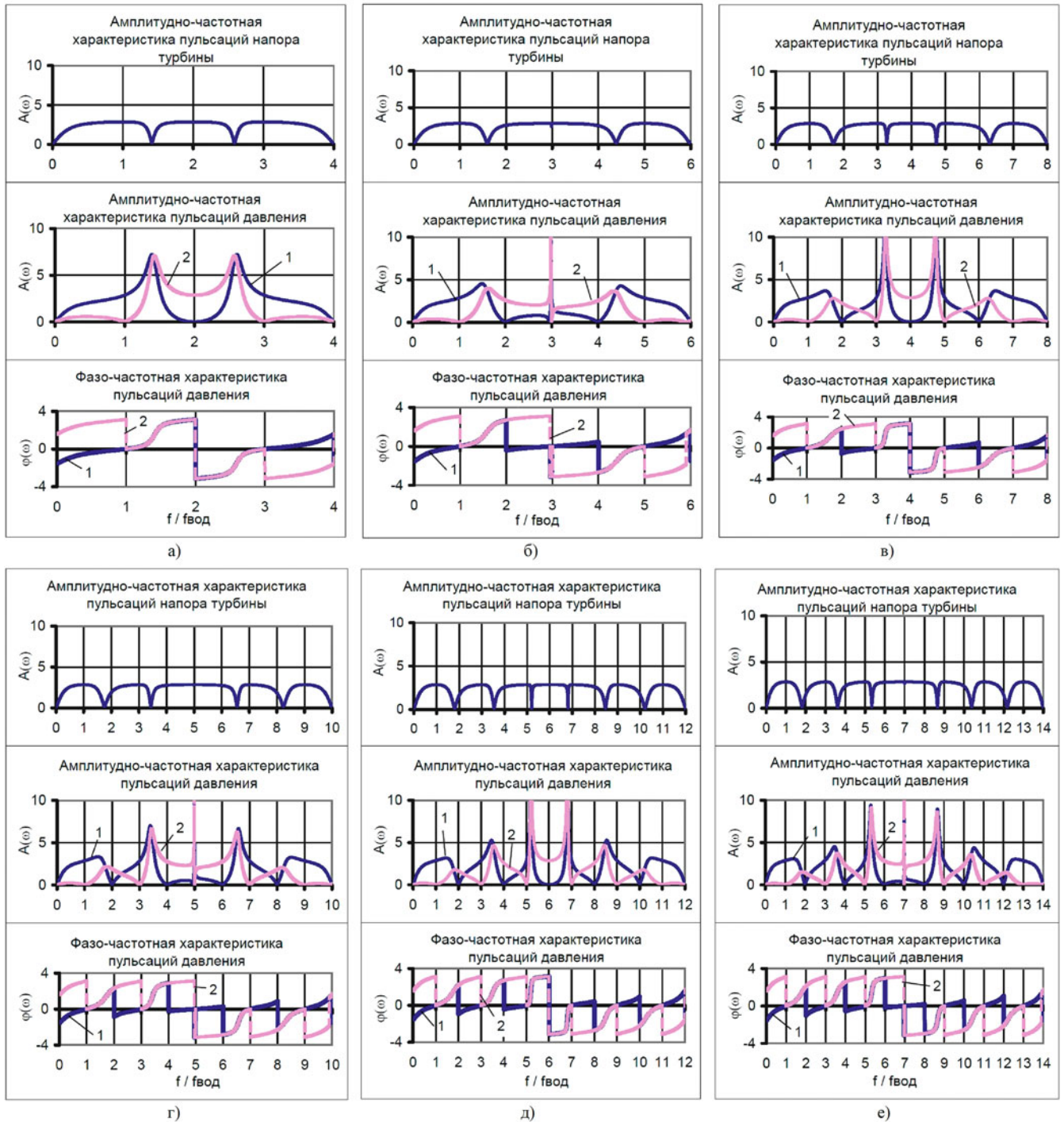


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики пульсаций напора, амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики пульсаций давления в водоводе (1) и отсасывающей трубе (2) при отношениях $f_{отс}/f_{вод} = 2$ (а); 2,9 (б); 4 (в); 4,9 (г); 6 (д); 6,9 (е)

тудно-фазовой характеристики. В данном случае коэффициент передачи показывает во сколько раз амплитуда пульсаций давления и напора, выраженная в относительных единицах, больше амплитуды пульсаций пропускной способности турбины (в отн. ед.), вызванных нестационарностью потока под рабочим колесом.

На рис. 4 показаны амплитудно-частотные (АЧХ) и фазо-частотные (ФЧХ) характеристики динамической системы турбина — водовод — отсасывающая труба при разных соотношениях между

собственными частотами колебаний в водоводе и отсасывающей трубе.

Рассмотрим трансформацию АЧХ при изменении отношения $f_{отс}/f_{вод}$. Для $f_{отс}/f_{вод} = 2$ в диапазоне частот от нуля до $2f_{отс}$ существуют два резонансных пика: на частотах $1,3f_{вод}$ и $2,6f_{вод}$ (рис. 4, а). С увеличением $f_{отс}/f_{вод}$ от 2,1 до 2,9 происходит рост второго резонансного пика, его смещение к третьей гармонике колебаний в водоводе $\omega/2\pi = 3f_{вод}$ и появление третьего резонансного пика на частоте

$4,4f_{\text{вод}}$ (рис. 4, б). При $f_{\text{отс}}/f_{\text{вод}} = 2,9 \dots 3,1$ резонансный пик наибольший. Существенно важной особенностью является то, что этот пик достигается в очень узком диапазоне частот возмущения вблизи собственной частоты колебаний в отсасывающей трубе. Например, коэффициенты передачи со значениями более 10 возможны в диапазоне частот возмущения $9,86 \pm 0,05$ Гц.

Количество резонансных пиков, которые показывает АЧХ пульсаций давления в диапазоне частот возмущения $\Delta\omega/2\pi = 0 \dots 2f_{\text{отс}}$, равно отношению собственных частот $f_{\text{отс}}/f_{\text{вод}}$, округленному в большую сторону до целого значения. В случае, когда собственная частота в отсасывающей трубе совпадает с гармониками собственной частоты в водоводе, наблюдается полностью симметричная картина резонансных пиков (рис. 4).

Диапазоны частот, внутри которых имеют место резонансные пики для отношения $f_{\text{отс}}/f_{\text{вод}} = 6$, представлены в табл. 1. Резонансные пики возникают на возмущающих частотах между 1-й и 2-й, 3-й и 4-й, 5-й и 6-й гармониками, а также на частотах между 6-й и 7-й, 8-й и 9-й, 10-й и 11-й гармониками собственной частоты водовода (рис. 4, д).

Сдвиг по фазе пульсаций давления в спиральной камере относительно пульсаций в отсасывающей трубе. Анализ фазо-частотных характеристик (рис. 4) показывает, что колебания в спиральной камере и отсасывающей трубе могут происходить как синхронно, так и со сдвигом по фазе на полпериода. Чередование происходит при переходе частоты вынужденных колебаний через гармоники колебаний в напорном водоводе.

Например, при $f_{\text{отс}}/f_{\text{вод}} = 6$ (рис. 4, д) пульсации давления в спиральной камере и отсасывающей трубе синхронны в диапазоне частот вынужденных колебаний между 1-й и 2-й, 3-й и 4-й, 5-й и 6-й гармониками, а также между 6-й и 7-й, 8-й и 9-й, 10-й и 11-й гармониками. Именно в этих областях частот имеют место резонансные пики пульсаций давления. В диапазонах частот между 2-й и 3-й гармониками, между 4-й и 5-й и т.д. пульсации давления в спиральной камере и отсасывающей трубе проис-

ходят со сдвигом по фазе на полпериода. Значения амплитуд колебаний давления в этих диапазонах частот невелики, а коэффициент передачи АЧХ не превышает $1/k_{q/h}$.

Соотношение между амплитудами колебаний в спиральной камере и отсасывающей трубе. В зависимости от частоты вынужденных колебаний амплитуда колебаний в отсасывающей трубе может быть больше или меньше амплитуды колебаний в спиральной камере (рис. 4).

Характерными являются следующие точки АЧХ:

при частотах возмущений, равных нечетным гармоникам в водоводе, коэффициент передачи для пульсаций давления в спирали равен $A(\omega)_{\text{спир}} = 1/k_{q/h}$, а в отсасывающей трубе $A(\omega)_{\text{отс}} = 0$;

при частотах возмущений, равных четным гармоникам в водоводе, наблюдается обратная картина: $A(\omega)_{\text{спир}} = 0$, $A(\omega)_{\text{отс}} = 1/k_{q/h}$.

Характеристики резонансных пиков давления. Коэффициенты передачи АЧХ в областях резонансных пиков увеличиваются с приближением к собственной частоте колебаний в отсасывающей трубе. Одновременно сужается диапазон частот возмущений, при которых они достигаются. Высокие значения коэффициентов передачи наблюдаются в чрезвычайно узких диапазонах частот. Например, резонансы с коэффициентом передачи более 10 имеют диапазон частот $\Delta f = f_{\text{рез}} + 0,05$ Гц.

В областях резонансных пиков амплитуды колебаний давления в спирали и отсасывающей трубе близки. Колебания происходят в одной фазе, соответственно колебания напора в резонансных зонах стремятся к нулю.

Резонанс на частоте около 2-й гармоники водовода попадает в область частот жгутовых возмущений. При этом коэффициент передачи в резонансе невелик и примерно равен $1/k_{q/h}$.

Влияние на АЧХ режима работы турбины по открытию. Резонансные максимумы пульсаций пропорциональны $1/k_{q/h}$. По мере уменьшения открытия турбины производная $k_{q/h}$ уменьшается

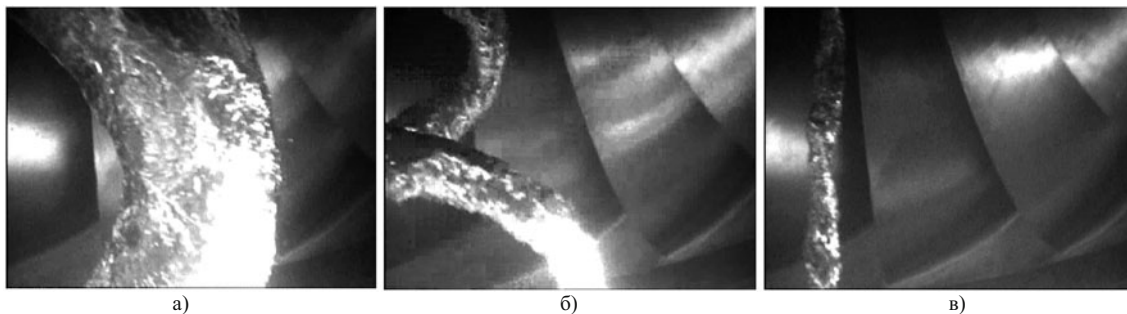


Рис. 5. Возмущающее воздействие в виде жгута в отсасывающей трубе под рабочим колесом [4] при мощностях турбины 60 % (а), 70 % (б), 75 % (в)

Характеристики подводящего водовода и отсасывающей трубы, используемые для расчета собственных частот колебаний

Длина подводящего водовода, м	Длина отсасывающей трубы, м	Скорость волны в отсасывающей трубе, м/с	Собственная частота колебаний давления, Гц		Отношение $f_{отс}/f_{вод}$	Характеристики водоводов	
			в подводящем водоводе	в отсасывающей трубе		$2\mu_{вод}$	$2\mu_{отс}$
275	38	1250	1,14	8,33	7,3	2,64	1,74
		600		4,00	3,5		0,83
		400		2,67	2,35		0,56

(рис. 1), а коэффициент передачи АЧХ растет. От режима зависит и амплитуда возмущающего воздействия. Жгутовые возмущения наиболее интенсивны в области средних или форсированных открытий, а в оптимуме практически отсутствуют. В качестве примера на рис. 5 показана картина нарастания интенсивности жгута под рабочим колесом при уменьшении открытия от 75 до 60 %, полученная в процессе модельных испытаний турбины РО230 [4].

Картина резонансов для условий Саяно-Шушенской ГЭС. Характеристики подводящего водовода и отсасывающей трубы СШГЭС, использованные для расчета собственных частот колебаний, приведены в табл. 2. Средняя скорость распространения волны гидроудара в напорном водоводе 1250 м/с рассчитана с учетом геометрических и упругих характеристик облицовки.

Скорость волны гидроудара в отсасывающей трубе и собственная частота колебаний могут зависеть от режима работы турбины, в частности от наличия области с вращающимся жгутом под рабочим колесом. Выделить собственную частоту в отсасывающей трубе по данным опубликованных натурных испытаний не представилось возможным. Очевидно, что это тема для самостоятельного исследования. Последующий анализ выполнен для трех значений средней скорости волны в отсасывающей трубе: 1250, 600 и 300 м/с. В табл. 3 даны параметры, по которым рассчитаны коэффициенты частотных характеристик.

Т а б л и ц а 3

Параметры режима работы турбины РО230/833-ВМ-677 СШГЭС

Режим аварии агрегата № 2	Напор турбины с учетом гидроудара, м	Расход турбины, м ³ /с	Открытие НА, о. е.	Производная расхода по напору $k_{q/h}$
	235	220	0,7	0,35

На рис. 6 представлены амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления и результирующая АЧХ пульсаций напора. Характеристики получены для режима, при котором произошла авария агрегата № 2. Частотная характеристика на рис. 6, а построена для скорости распространения волны 1250 м/с и собственной частоты колебаний в отсасывающей трубе 8,3 Гц. Она может рассматриваться как предельный случай, когда собственная частота колебаний в отсасывающей трубе максимальна. На рис. 6, б, в показано, как трансформируется частотная характеристика при уменьшении средней скорости волны в отсасывающей трубе до 600 и 400 м/с. Характерные узлы АЧХ с нулевыми значениями коэффициента передачи остались без изменения. Сократилось количество резонансных пиков на повторяющихся отрезках АЧХ. Изменилась картина резонансных максимумов, т.е. форма АЧХ, а их общий уровень понизился.

Резонансный пик в диапазоне 1,7 – 1,8 Гц приходится на область жгутовых частот с коэффициентами передачи для пульсаций в спиральной камере 3 – 3,2, в отсасывающей трубе — 1,5 – 2,5. Близкая картина была получена при натурных испытаниях агрегата № 10 (рис. 7) [5]. При частоте 1,4 Гц амплитуда пульсаций давления спиральной камере превышала амплитуду пульсаций в отсасывающей трубе в 2 – 2,5 раза. Осциллограмма пульсаций на рис. 7 отражает не только свойства АЧХ, но и то, что в режиме перегрузки интенсивность жгутовых возмущений увеличивается с ростом мощности.

Резонансные максимумы (рис. 6) с коэффициентами передачи более 8 реализуются при попадании частот возмущений в очень узкие области. Диапазоны частот, соответствующие резонансным пикам с коэффициентом передачи более 8, приведены в табл. 4.

Серия расчетов, иллюстрирующих как установившиеся колебания, так и их развитие во времени, проведена с использованием математической модели Саяно-Шушенской ГЭС. Учитывались распространение волн давления и расхода в напорном во-

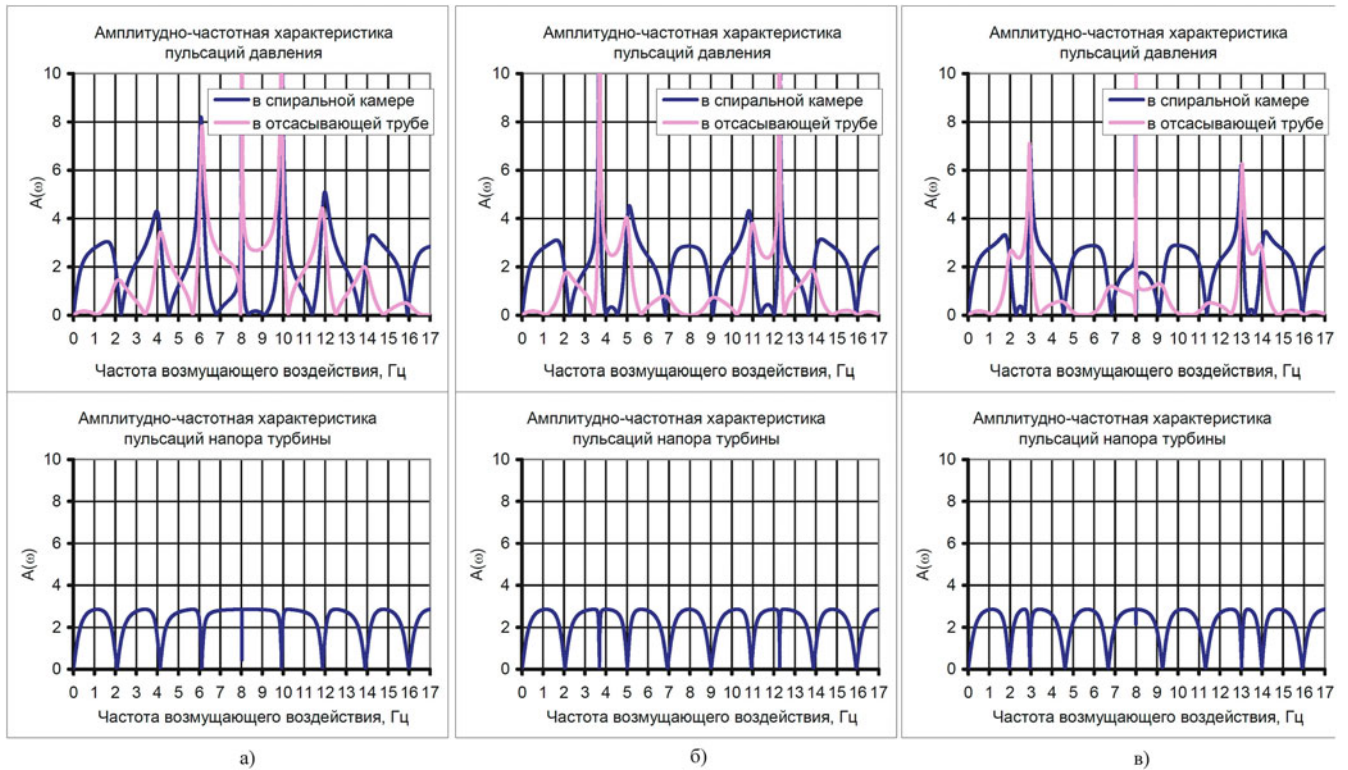


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления и результирующих пульсаций напора турбины для различных значений скорости волны в отсасывающей трубе; $c = 1250$ м/с, $f_{отс} = 8,33$ Гц (а), $c = 600$ м/с, $f_{отс} = 4$ Гц (б), $c = 400$ м/с, $f_{отс} = 2,67$ Гц (в)

дове и отсасывающей трубе, отражение от бьефов, потери напора, расходно-напорная характеристика турбины [6]. Для расчета пульсаций модель дополнена блоком, формирующим возмущающее воздействие в виде изменения пропускной способности турбины по гармоническому закону.

На рис. 8 показаны установившиеся колебания при частотах 1,7; 4,4 и 4,7 Гц. Видно, что в зависимости от частоты возмущения пульсации давления в спиральной камере и отсасывающей трубе могут проходить синхронно или со сдвигом по фазе на полпериода, а соотношение амплитуд может быть как больше, так и меньше единицы.

На рис. 9 показано развитие резонанса при постоянной частоте возмущающего воздействия 9,86 Гц, для чего потребовалось 7 с и около 70 циклов колебаний. Необходимым условием развития резонанса является сохранение частоты возмущаю-

щего воздействия в очень узком диапазоне. При гидродинамических процессах в турбине (жгут, вихри) частота возмущения изменяется в более широком диапазоне, чем требуется для развития резонанса с высокими значениями коэффициента передачи (рис. 10). Процессы при частотах 9,76; 9,86 и 9,96 Гц (рис. 10) показывают, что при отклонении частоты возмущающего воздействия от резонанс-

Таблица 4

Диапазоны частот возмущающего воздействия, в которых коэффициент передачи АЧХ имеет значения больше 8

Частота резонансного пика, Гц	Диапазон частот с $A(\omega) > 8$, Гц
6,10	6,07 – 6,11
8,02	8,0 – 8,04
9,92	9,88 – 9,99

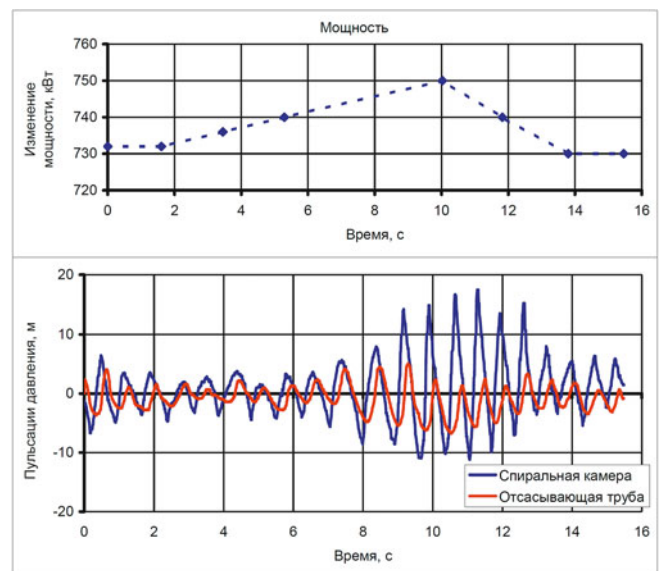


Рис. 7. Натурная осциллограмма пульсаций у агрегата № 10 СШГЭС при форсированных мощностях

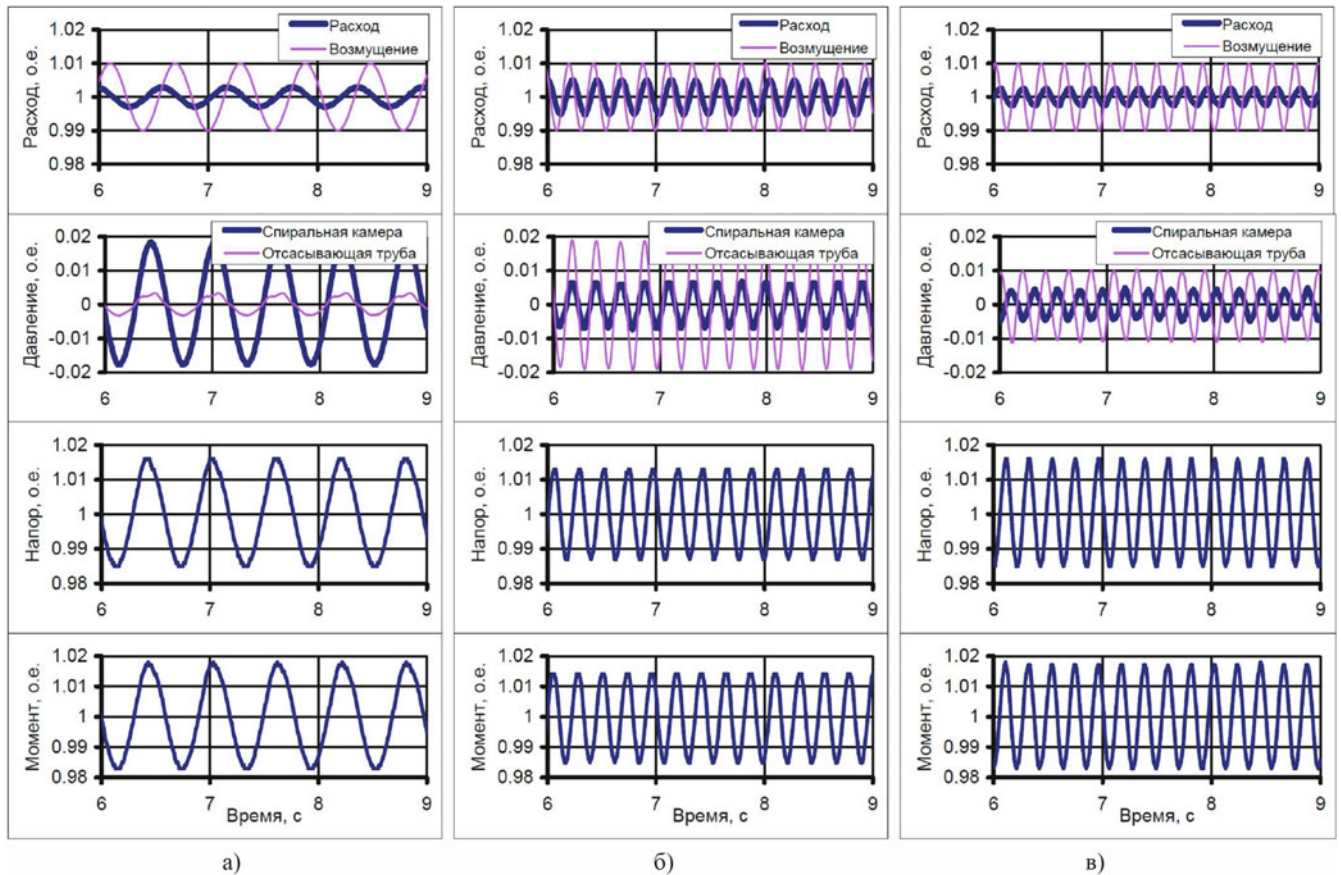


Рис. 8. Результаты расчета пульсаций давления при частотах возмущающего воздействия: 1,68 Гц (а), 4,4 Гц (б), 4,7 Гц (в)

ной на 0,1 Гц происходит снижение амплитуды пульсаций давления почти в 2 раза.

Возможность возникновения резонансов анализируется наложением частот реальных возмущений на амплитудно-частотную характеристику. Для СШГЭС в низкочастотном спектре можно выделить следующие возмущающие частоты: жгутовую 1 – 1,5 Гц, оборотную и ее гармоники (2,37; 4,74; 7,11; 9,48; 11,85; 14,22 Гц), частоту крутильных колебаний 15,5 Гц, лопастную 33,2 Гц, лопаточную 47,4 Гц. На рис. 11 показаны коэффициенты передачи напорной системы СШГЭС для открытия 70 % при указанных частотах возмущений. Ни одна из приведенных частот не попала в узкие области резонансных пиков. Максимальный коэффициент передачи имеет 5-я гармоника оборотной частоты; он ненамного превышает значение коэффициента передачи пульсаций напора, определяемое производной $k_{q/h}$. Общая картина подтверждается опытом многолетней эксплуатации СШГЭС, при которой не было отмечено проявлений резонанса такого типа, как на рис. 9.

Выполненный анализ позволил приблизиться к ответу на вопрос, который до сих пор остается открытым в дискуссиях о причинах аварии, произошедшей на Саяно-Шушенской ГЭС. Явилось ли причиной аварии что-то особенное, отличное от

того, что наблюдалось в предыдущий период эксплуатации, или авария явилась следствием разрушения подверженных усталостным нарушениям шпилек при очередном процессе с повышенными динамическими нагрузками.

Расчет переходного процесса при закрытии турбины (рис. 12) показывает, что на область режимов, где произошла авария агрегата № 2, пришлась нарастающая нагрузка вследствие суммирования гидроудара и пульсаций давления в спиральной камере на жгутовой частоте, близкой к собственной частоте колебаний в напорном водоводе. Амплитуда пульсаций давления в спиральной камере нарастала с уменьшением открытия турбины. Этому способствовали два фактора: увеличение интенсивности возмущающего воздействия (рис. 5) и увеличение коэффициента передачи АЧХ за счет уменьшения производной $k_{q/h}$ с уменьшением открытия. Дополнительным негативным эффектом явилась высокая интенсивность чередования переходных процессов набора и снижения мощности с прохождением 4 раза за последний час области повышенных жгутовых пульсаций давления.

Редакция журнала предоставила авторам возможность предварительно ознакомиться с публикуемой в этом номере статьей доктора техн. наук О. И. Башнина [7], где излагаются результаты ис-

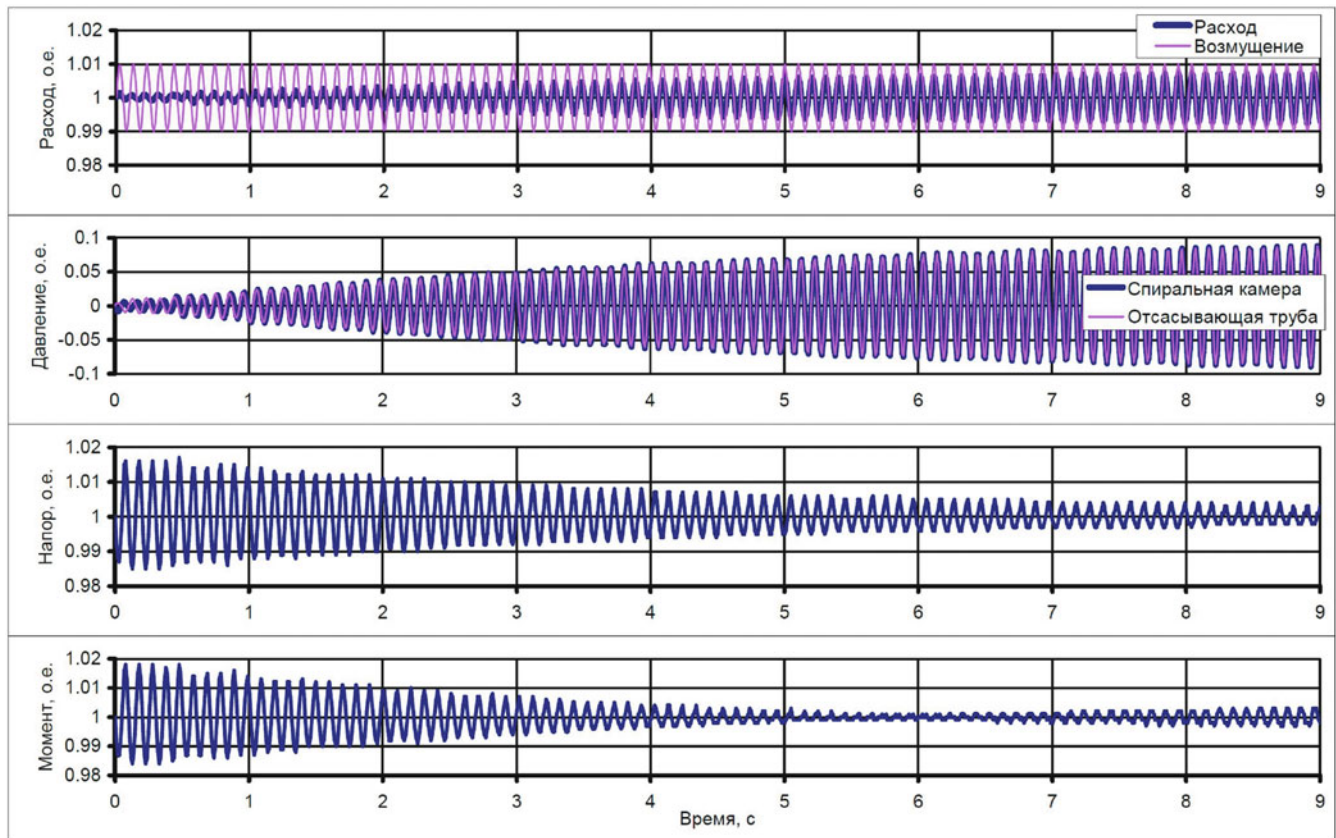


Рис. 9. Результаты расчета резонансного увеличения пульсаций давления при частоте возмущающего воздействия 9,86 Гц

следований возможностей возникновения синхронного резонанса в напорных системах ГЭС.

Вопросы, рассмотренные О. И. Башниным, и полученные им результаты представляют значительный интерес, так как продвигают решение вопроса о влиянии пульсаций давления на нагрузки от внутреннего давления воды, действующие на оболочки проточного тракта гидротурбин. По многим вопросам, затронутым в статье [7], мы придерживаемся практически идентичных представлений и методологических подходов (хотя в качестве источника низкочастотных возмущений предпочитаем моделировать не пульсации давления, а колебания пропускной способности турбины, генерируемые процессами в отсасывающей трубе).

Автор справедливо замечает, что резонансные характеристики чувствительны к точности исходных данных. Неточность, допущенная в [7] при определении длины отсасывающей трубы (27 м вместо реальных 38 м, т.е. занижение длины в 1,4 раза), привела к завышению частот собственных колебаний в отсасывающей трубе и, как следствие, к искажению картины резонансных частот. При реальной длине отсасывающей трубы частоты синхронного резонанса будут отличаться от приведенных в [7]. Частота максимального резонанса составит не 12,5 Гц, как в [7], а 7,9 Гц, что не позволяет связать зафиксированные сейсмостанцией колеба-

ния на частоте 15 Гц с проявлением синхронного резонанса.

При прочтении последнего (перед заключением) абзаца статьи О. И. Башнина возникает вопрос: не нарушена ли здесь причинно-следственная связь? Колебания на сейсмограмме проф. В. С. Селезнева (рис. 19) [7] на 809-й секунде отражают резонанс, за 1 секунду разрушивший турбину, или мы наблюдаем реакцию на механические возмущения, связанные с ранее произошедшим отрывом крышки турбины?

По-нашему мнению, верным является второе предположение, поскольку в [7] обрыв шпилек ошибочно относится к 809-й секунде, тогда как по данным проф. В. С. Селезнева моменту времени обрыва шпилек 8.13.25 соответствует отсчет по сейсмограмме не 809, а 805 с.

Следующие 4 секунды, на сейсмограмме с 805-й по 809-ю, скорее всего, отражают движение агрегата по турбинной шахте. В этот период из-за отклонения вала от вертикального положения и задевания камеры рабочим колесом (или ротором о статор) происходят крутильные колебания в системе турбина — ротор генератора.

Отмеченные сейсмостанцией колебания на частоте 15 Гц генерируются не пульсациями давления, как предполагается в [7], а соответствуют частоте крутильных колебаний в системе ротор — вал —

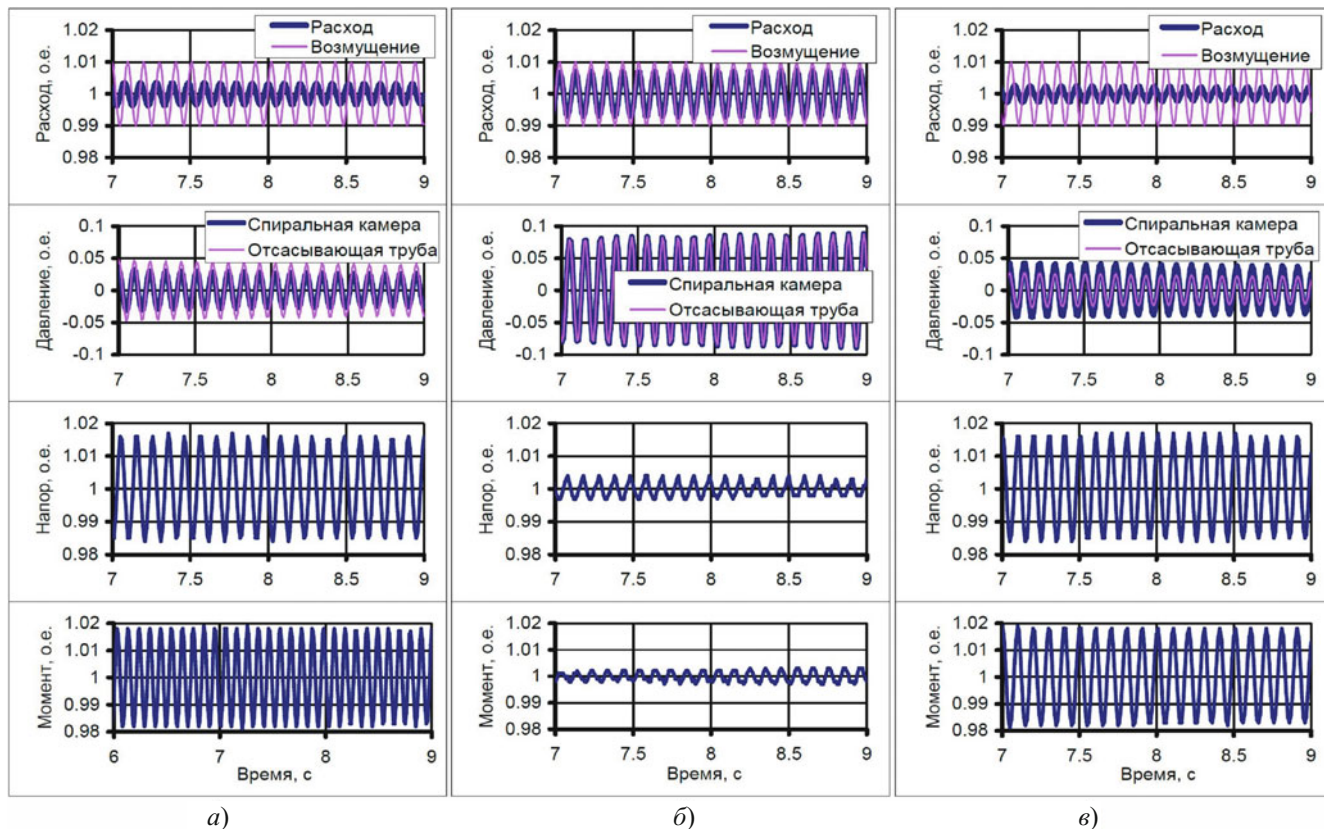


Рис. 10. Результаты расчета пульсаций давления при частотах возмущающего воздействия: 9,76 Гц (а), 9,86 Гц (б), 9,96 Гц (в)

рабочее колесо. И момент времени, обозначенный на сейсмограмме отметкой 809 с, соответствует не началу синхронного резонанса, а началу прорыва воды в машинный зал.

Таким образом, несмотря на высокий профессиональный уровень исследований [7], неточности в исходных данных привели к неверному заключению о резонансе как причине отрыва крышки турбины агрегата № 2 СШГЭС.

После аварии 17 августа 2009 г. в профессиональной прессе и в интернете наблюдаются многочисленные попытки объяснить разрушение турби-

ны № 2 различного рода экстраординарными воздействиями, причем гидроакустическому резонансу разрушительная роль приписывается чаще других. Проведенный для условий напорной системы СШГЭС анализ эту роль, безусловно, не подтверждает.

Существуют примеры аналогичных аварий на ГЭС по причине усталостного разрушения шпилек. Один из них — авария 10 марта 1992 г. на канадской ГЭС Grand Rapids компании “Manitoba Hydro” [8]. Напор турбин 38 м. Повышенные вибрации колонн статора турбины в начальный период эксплуа-

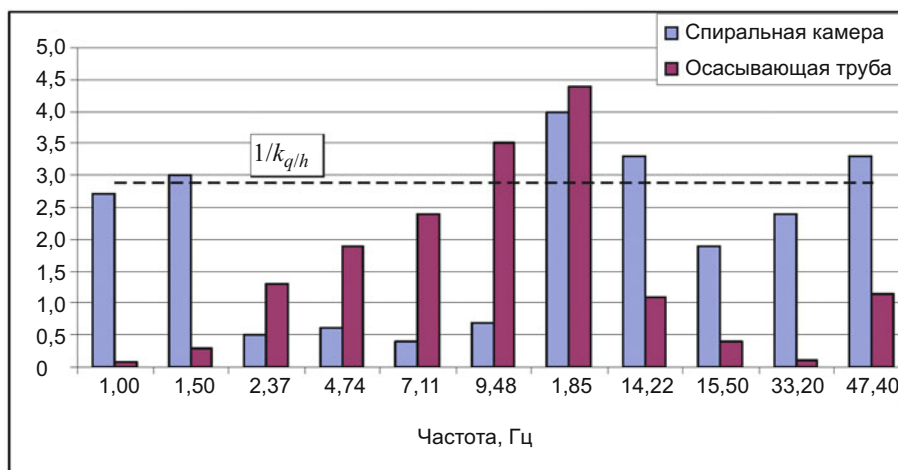


Рис. 11. Коэффициенты передачи АЧХ при частотах вынужденных колебаний, характерных для агрегатов СШГЭС

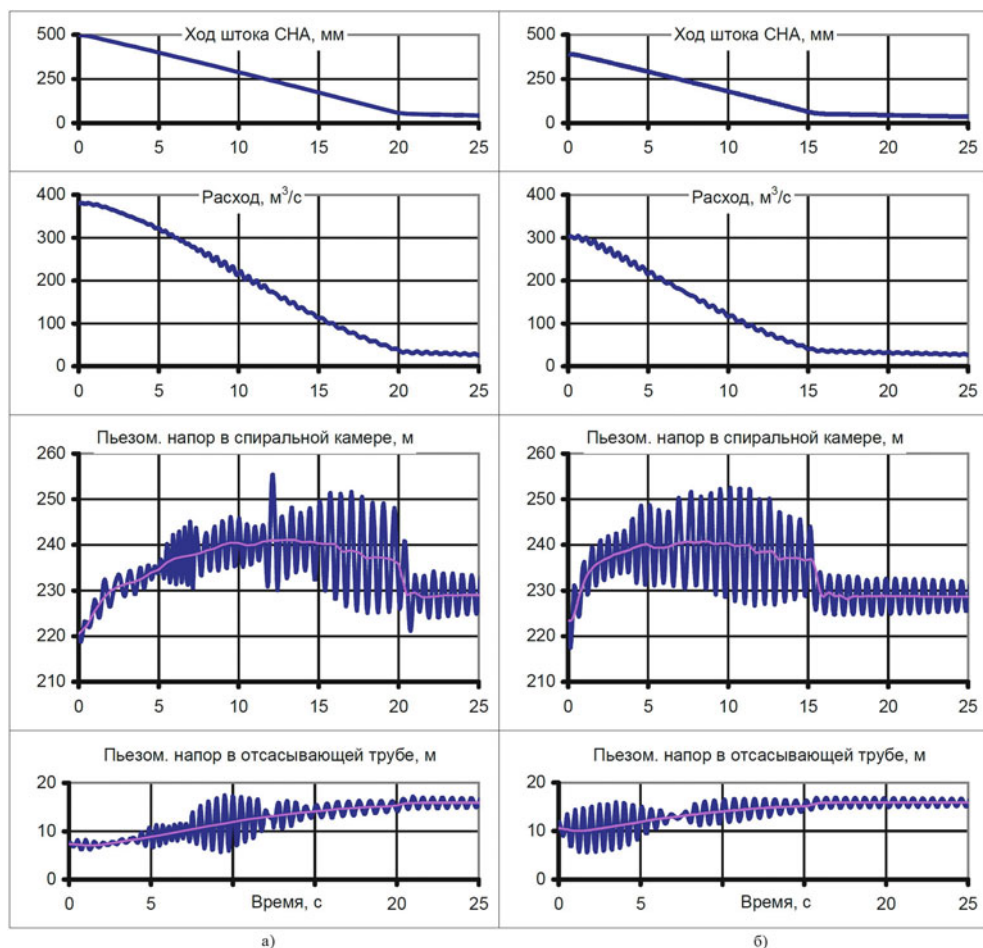


Рис. 12. Примеры расчетов снижения нагрузки до холостого хода от 640 МВт (а) и от 575 МВт (как у второго агрегата перед аварией, авария на 5-й секунде) (б) с учетом пульсаций давления и без их учета

тации отзывались через несколько лет усталостным разрушением шпилек в установившемся режиме работы агрегата и ГЭС. Последовали отрыв крышки, разрушение турбины, затопление машинного зала, серьезные повреждения других агрегатов. Расследование обнаружило на шестидесяти одной шпильке обширные усталостные трещины, предопределившие их разрушение. Аналогия с аварией на агрегате № 2 СШГЭС очевидна.

Выводы

1. В статье приведены результаты исследований частотных характеристик динамической системы водовод — турбина — отсасывающая труба с заданием возмущающего воздействия в виде изменения пропускной способности турбины.

2. На основании рассмотрения амплитудно-фазовых частотных характеристик пульсаций давления и напора показано:

в рассматриваемой системе амплитуда пульсаций давления может существенно превышать амплитуду пульсаций напора турбины;

частота собственных колебаний в отсасывающей трубе $f_{отс}$ определяет периодичность формы амплитудно-частотной характеристики пульсаций давления;

отношение частот собственных колебаний $f_{отс}/f_{вод}$ определяет количество окружностей АФХ и соответствующий набор резонансных пиков, который повторяется с периодичностью $\Delta\omega/2\pi = 2f_{отс}$;

в зависимости от частоты вынужденных колебаний амплитуда колебаний в отсасывающей трубе может быть больше или меньше амплитуды в спиральной камере.

3. Анализ фазо-частотных характеристик показал, что колебания в спиральной камере и отсасывающей трубе могут происходить синхронно, в одной фазе, или со сдвигом по фазе на полпериода. Чередование наблюдается при переходе частоты вынужденных колебаний через гармоники собственной частоты водовода.

4. Коэффициенты передачи резонансных пиков увеличиваются с приближением к собственной частоте отсасывающей трубы. Одновременно сужается диапазон возмущающих частот, при которых резонанс развивается. Высокие значения коэффици-

ентов передачи наблюдаются в чрезвычайно узких диапазонах возмущающих частот. Для напорной системы Саяно-Шушенской ГЭС резонансы с коэффициентом передачи более 8 развиваются в диапазоне частот $\Delta f = f_{рез} \pm 0,1$ Гц.

5. Расчеты, выполненные с использованием компьютерной модели СШГЭС, показали, что развитие резонанса происходит постепенно, за несколько десятков циклов и при условии сохранения частоты возмущения в очень узком диапазоне значений. Опыт натурных испытаний свидетельствует, что у возмущений гидравлической природы (жгут, вихри) частота колеблется в более широких пределах, поэтому они не могут вызвать резонансы с высокими значениями коэффициента передачи. Резонанс на частоте жгутовых пульсаций имеет низкий коэффициент усиления и по амплитуде соизмерим с пульсациями напора турбины.

6. Проведенные исследования показали, что в напорной системе СШГЭС нет условий для резонансов с высокими значениями коэффициентов передачи от возмущающих воздействий, как гидравлической природы, так и механического происхождения.

Список литературы

1. Берлин В. В., Муравьев О. А. Технические аспекты аварии на втором агрегате Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2010. № 5.
2. Кривченко Г. И. Автоматическое регулирование гидротурбин. — М.-Л.: Энергия, 1964.
3. Гидромеханические переходные процессы в гидроэнергетических установках / Под ред. Г. И. Кривченко. — М.: Энергия, 1975.
4. Пылев И. М. Проблемы нестационарности в гидротурбинах: Доклад на научно-техническом семинаре “Нестационарные явления в гидротурбинных блоках ГЭС”. ОАО “Силовые машины”, ЛМЗ, 9 – 10.12.2010.
5. Брызгалов В. И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций: Производственное издание. Красноярск, 1999.
6. Берлин В. В., Муравьев О. А. Комплекс программ для расчетов режимов регулирования и переходных процессов ГЭС, ГАЭС и крупных насосных станций // Труды Международной научно-технической конференции “Современное состояние и перспективы развития гидромашиностроения в XXI веке”. — С. Пб.: СПбГПУ, 2003.
7. Башнин О. И., Саяно-Шушенская катастрофа — синхронный гидроакустический резонанс? // Гидротехническое строительство. 2012. № 7.
8. Павликевич У. Л. Отрыв турбинной крышки гидроагрегата № 1 на ГЭС Grand Rapids. Компания Manitoba Hydro, Виннипег, Манитоба, Канада, 1993, R3R 2C7.

Поздравление Игорю Николаевичу Усачеву

4 июля 2012 г. Игорь Николаевич Усачев отмечает свой 80-летний юбилей и 55-летие производственной, проектной и научной деятельности, которая связана с созданием национальной школы морской энергетики и сооружением первой в России приливной электростанции.

По окончании в 1957 г. гидроэнергетического факультета Московского энергетического института И. Н. Усачев работал на строительстве Братской ГЭС. Молодой специалист принял участие в разработке и внедрении проекта зимней укладки бетона, до сих пор не утратившего своего значения при бетонировании крупных монолитных блоков. В 1962 г. по инициативе председателя Совета молодых специалистов института “Гидропроект” И. Н. Усачева был организован молодежный отдел приливных электростанций, который возглавил энтузиаст освоения энергии приливов Л. Б. Бернштейн.

В 1963 г. Игорь Николаевич был назначен начальником группы рабочего проектирования и исследований на строительстве первой отечественной приливной электростанции — Кислогубской ПЭС. Под его руководством разработан и осуществлен уникальный рабочий проект приливной электростанции, которая впервые в мировой практике гидроэнергетического строительства была построена наплавным способом, широко принятым впоследствии для морского строительства.

В содружестве с институтами РАН Игорь Николаевич разработал сорбционную установку для извлечения ценных микроэлементов из морской воды. На этой установке были получены опытные партии ценных микроэлементов. Совместно с НТЦ “Курчатовский институт” им предложена схема выработки из воды на энергии прилива водорода, что практически решает проблему использования дискретной энергии ПЭС в энергосистеме без сооружения ГАЭС.

Созданная с участием И. Н. Усачева научная база морской энергетики на Кислогубской ПЭС служит основой для обоснования современных проектов по освоению энергии Мирового океана и строительству в районах Крайнего Севера. Кислогубская ПЭС зарегистрирована в России как государственный памятник науки и техники и признана в мире “одним из выдающихся сооружений XX века”.

Параллельно с работой на Кислогубской ПЭС И. Н. Усачев совместно с Л. Б. Бернштейном прово-



дил изыскания на створах будущих Кольской (Северной), Мезенской, Тугурской и Пенжинской ПЭС. Он был также главным технологом двух уникальных проектов: осуществления в 1976 г. строительства высоковольтной линии электропередач на наплавных фундаментах через Каховское море-водохранилище и создания в 1984 г. русловых сверхкрупных наплавных водопропускных сооружений Санкт-Петербургской защитной дамбы, которые стали прототипами типовых наплавных энергоблоков будущих мощных ПЭС в России.

В НИИ энергетических сооружений И. Н. Усачев работает с 1985 г. Сначала он возглавлял лабораторию, затем отдел и центр по приливной энергетике. При его участии была разработана новая ортогональная гидротурбина.

В 2007 г. Игорь Николаевич принимал участие в создании энергоблока Малой Мезенской ПЭС, который стал пилотным проектом заводского производства наплавных блоков с типовой ортогональной турбиной для строительства современных ПЭС. В настоящее время Игорь Николаевич руководит проектом строительства Северной приливо-волновой электростанции на Баренцевом море.

Игоря Николаевича Усачева можно смело назвать одним из основоположников отечественной школы освоения энергии Мирового океана, вся его более чем полувековая профессиональная жизнь посвящена решению проблем морской энергетики. Его трудовая деятельность отмечена государственными наградами: премией Совета Министров СССР и премией имени М. В. Ломоносова. Он награжден медалью “Ветеран труда”, медалями ВДНХ СССР и ВВЦ РФ, имеет почетные звания “Заслуженный работник энергетической отрасли”, “Почетный гидроэнергетик”, “Ветеран энергетики” и “Ветеран Гидропроекта”.

Игорь Николаевич — автор более 300 монографий и статей, опубликованных в России и за рубежом на английском, испанском и китайском языках, 25 внедренных на ПЭС, ГЭС и АЭС изобретений; член научно-технических советов РАН, РусГидро, НП “ЕЭС России” и ОАО “НИИЭС”.

Научное сообщество энергетической отрасли России, друзья и коллеги сердечно поздравляют Игоря Николаевича Усачева с юбилеем и желают ему крепкого здоровья, счастья и новых творческих достижений на благо нашей Родины.

О книгах Л. Ф. Фурсова

В современном промышленном, гражданском и гидротехническом строительстве, а также в горном деле широко применяются инъекционные способы для улучшения инженерно-геотехнических характеристик грунтов основания, для создания противофильтрационных устройств в основании напорных сооружений и в теле плотин из местных материалов, для омоноличивания бетонных сооружений, для ремонта и гидроизоляции подземных и заглублённых сооружений. Научному обоснованию таких работ были посвящены исследования, выполнявшиеся специальными подразделениями, в частности лабораторией цементации ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, руководимой д. т. н. А. Н. Адамовичем. Результаты исследований и новые технические решения широко обсуждались на специальных отечественных и международных совещаниях с участием таких известных учёных, как академики П. А. Ребиндер, В. А. Каргин, Н. А. Цыгович, Е. Н. Сергеев.

К сожалению, последний серьёзный труд в этой области — монография А. Н. Адамовича “Закрепление грунтов и противофильтрационные завесы” (Москва, изд-во “Энергия”) — вышел в 1980 г., с тех пор книга стала редкостью и не вполне соответствует сегодняшнему уровню развития науки и технических средств, применяемых на строительстве.

Тем более приятно отметить, что начиная с 2009 г. издательство Санкт-Петербургского государственного политехнического университета выпустило в свет целую серию книг, посвящённых цементационным работам и принадлежащих перу Л. Ф. Фурсова, который многие годы проработал в ныне не существующей лаборатории цементации ВНИИГ. На сегодня таких книг выпущено семь:

1. Заполнительная цементация в гидротехнических туннелях (668 с.);
2. Контроль качества цементации, натурные наблюдения и исследование фильтрации в гидротехнических туннелях (260 с.);
3. Методика обследования состояния гидротехнических туннелей (40 с.);
4. Ремонтные работы в гидротехнических туннелях (277 с.);
5. Инъекционные растворы (811 с.);
6. Инъектирование и инъекционные растворы (1142 с.);
7. Инъекционные противофильтрационные завесы (360 с.).

В настоящее время подготовлена к изданию монография “Укрепление основных гидротехнических сооружений”.

Объём данной заметки не позволяет дать подробный анализ рассматриваемых изданий, что очевидно будет делаться по мере ознакомления с ними специалистов соответствующих специальностей. Поэтому дадим лишь краткую информацию.

В *книге 1* рассмотрены вопросы поведения туннельной выработки во времени, оборудование и оптимальные технологические параметры цементации для заполнения заоблицовочных пустот.

Книга 2 является практическим пособием по оценке качества заполнительной и укрепительной цементации и проведению натурных наблюдений за работой дренажных и противофильтрационных устройств в гидротехнических туннелях.

В *книге 3* дана методика визуального и инструментального обследования конструктивных элементов гидротехнических туннелей и определения остаточного ресурса эксплуатируемого сооружения.

В *книге 4* охарактеризованы основные виды дефектов в туннелях, предложены технологические схемы и регламенты ремонтных работ, а также материалов для их выполнения.

В *книге 5* обобщены результаты исследований в области характеристик и свойств различных инъекционных растворов. Рассмотрены механизм действия добавок химических веществ и теоретические аспекты создания напряжённого состояния в цементном камне.

Книга 6 освещает вопросы теории и практики инъектирования, используемого для закрепления и уплотнения скальных пород и несвязных грунтов в основаниях сооружений.

В *книге 7* приведены некоторые теоретические положения проектирования и практические примеры создания противофильтрационных завес в основаниях плотин гидроэлектростанций.

Книги не свободны от недостатков, к основным из которых, на наш взгляд, относятся перегруженность подробным изложением методик исследований и повторение некоторых материалов в разных книгах, например, материалы книги 5 во многом повторены в книге 6. Непомерная толщина книг 5 и 6 не позволяет оперативно пользоваться ими.

Неудачно выполнены ссылки на источники, сделанные в круглых (а не в квадратных, как принято во всём мире) скобках, что осложняет чтение. Кроме того, библиография дана не в алфавитном порядке, а ссылки в тексте — то номером, то фамилией автора. В последнем случае, чтобы найти источник в списке из 433 наименований (книга 6), требуется весьма длительное время.

Но главным недостатком данных изданий является необычный тираж — от 50 до 68 экз. (книги изданы автором за свой счёт), делающий их библиографической редкостью сразу после выхода в свет. Нужно отметить, что книги Л. Ф. Фурсова можно найти в Москве в Российской государственной библиотеке, в Санкт-Петербурге в Российской национальной библиотеке и в библиотеке Академии наук, а также в библиотеке Санкт-Петербургского политехнического университета.

Э. С. Аргал, доктор техн. наук

Новости гидроэнергетики и гидротехники

Богучанская ГЭС

В мае 2012 г. на Богучанской ГЭС продолжались работы по возведению бетонной плотины и монтажу оборудования. Работы по укладке бетона в мае выполнены в объеме 2698 м^3 , монтаж металлоконструкций и гидромеханического оборудования составил более 700 т. По состоянию на 15 мая двадцать семь из тридцати четырех секций бетонной плотины возведены до проектной отметки - 214 м. Основной акцент был сделан на отделочные работы в служебно-производственном корпусе (СПК). Наливное покрытие бетонных полов "элакор" уложено на площади 2293 м^2 , отделка стен выполнена на площади 2893 м^2 , смонтировано 1120 пог. м воздуховодов и вентиляционных коробов.



Несмотря установившиеся для мая сравнительно низкие температуры, из карьера №12 доставлено 46249 м^3 песчано-гравийной смеси, переработано более 34000 м^3 . С 1 июня введено в эксплуатацию здание пожарного депо. В июне установлен и запущен в работу в тестовом режиме современный диспетчерский щит.

9 мая было перекрыто последнее, пятое временное донное отверстие в секции №27, и началось наполнение Богучанского водохранилища. По состоянию на 25 июня уровень воды в верхнем бьефе Богучанской ГЭС составил 168,07 м, в нижнем бьефе – 138,18 м; объем водохранилища – $5,537 \text{ км}^3$. Приточный расход в створе Богучанской ГЭС составляет $3103 \text{ м}^3/\text{с}$, расход в нижний бьеф – $3037 \text{ м}^3/\text{с}$. Для защиты станции от плавучего мусора смонтирована запань.

В конце мая на Нижней Ангаре и Енисее начинается особо важный период – северный завоз. С этого времени речной транспорт начинает осуществлять доставку грузов для населения и предпри-

ятий в отдаленные северные территории Красноярского края. Для содействия Енисейскому речному пароходству, выполняющему эту задачу, работа Богучанского гидроузла переведена в режим навигационного пропуска воды. Сбросные расходы в нижний бьеф Богучанской ГЭС с 25 мая увеличены до $3000 \text{ м}^3/\text{с}$. Такой расход обеспечит соблюдение необходимых судоходных уровней ниже по течению от створа ГЭС. Сразу после окончания навигации 2012 г. сброс планируется снизить до санитарного попуска $1100 \text{ м}^3/\text{с}$, что обеспечит возможность аккумулирования запасов воды в водохранилище.



По данным инструментальных и визуальных наблюдений, выполняемых лабораторией гидротехнических сооружений (ЛГТС) состояние бетонной и каменнонабросной плотин Богучанской ГЭС в процессе наполнения водохранилища соответствует действующей гидростатической нагрузке (уровню верхнего бьефа 168,16 м) и среднесуточным воздействиям температур наружного воздуха и воды. Измеренные диагностические показатели значительно меньше критериальных значений, установленных Декларацией безопасности гидротехнических сооружений строящейся станции. На сегодняшний момент по результатам инструментальных и визуальных наблюдений за состоянием гидротехнических сооружений Богучанской ГЭС каких-либо процессов или явлений, опасных для надежности и безопасности сооружений, не выявлено.

Загорская ГАЭС-2

На строительной площадке Загорской ГАЭС-2 начались высоковольтные испытания оборудования комплектного распределительного устройства (КРУЭ-500 кВ). Тестирование смонтированного оборудования производится специальной установ-

кой – резонансным трансформатором фирмы Siemens AG. Оборудование проверяют на соответствие классу напряжения и изоляционным свойствам под напряжением 560 кВ. Результаты испытаний будут оформлены итоговым протоколом. Включение под рабочее напряжение КРУЭ-500 кВ запланировано на третий квартал 2012 г. С помощью этого оборудования планируется отработать пуск и остановку агрегатов от тиристорного пускового устройства. В 2014 г. открытое распределительное устройство (ОРУ-500 кВ) действующей Загорской ГАЭС будет демонтировано, и комплектное распределительное устройство станет единым.

Общая строительная готовность объектов Загорской ГАЭС-2 в июне текущего года составила 73%. Работы ведутся на 6 объектах: станционном узле, водоприемнике, водоводах, верхнем и нижнем бассейнах и КРУЭ-500. На станционном узле ведутся работы по сооружению кровли машинного зала будущей станции, бетонированию колонн машинного зала и монтажу балок подкрановых путей в зоне гидроагрегата №3.

Начаты работы по бетонированию первого яруса напорного водовода №2. На водоприемнике ведется бетонирование подпорных стенок и здания водоприемника. В зоне верхнего бассейна по всему фронту активно идут работы по отсыпке дамбы до отметок пускового комплекса.

Зарамагская ГЭС-1

На площадке строительства Зарамагской ГЭС-1 в первом полугодии 2012 г. велись работы по возведению днища водоприемника, монтажу и бетонированию поверхностного водовода, укрепительной цементации чаши бассейна суточного регулирования. В камере развилки турбинного водовода ведется монтаж анкерной опоры.

Строительство наземного турбинного водовода выполнено на 70%. Из ста металлических звеньев изготовлено 95, смонтировано 75, обетонировано 60. После завершения строительства водовод будет утеплен и засыпан грунтом. В вертикальной шахте в настоящее время ведется монтаж коленной части и развилки металлической облицовки.

В деривационном канале, который свяжет Головную Зарамагскую ГЭС с Зарамагской ГЭС-1, продолжаются проходческие работы. К началу июня горнопроходчиками пройдено 11109 м из 14295 м, что составляет 77,7% от общей длины. Выполнено бетонирование стен и свода на участке 10157 м.

Реконструкция Жигулевской ГЭС

В настоящее время на Жигулевской ГЭС реализуется крупномасштабная программа технического



перевооружения и реконструкции. В период с 2012 по 2016 гг. на станции будет проведен большой объем работ по реконструкции гидротурбинного оборудования. Установка новых турбин позволит повысить номинальную мощность каждого гидроагрегата на 10,5 МВт (со 115 МВт до 125,5 МВт). После завершения модернизации суммарная мощность Жигулевской ГЭС увеличится на 147 МВт и составит 2 488 МВт. Поставка гидроагрегатов осуществляется компанией «Силовые машины». Измененная конструкция рабочего колеса позволит повысить эффективность использования водных ресурсов и снизить воздействие на окружающую среду. Новые поворотно-лопастные турбины с номинальной мощностью 54 МВт имеют материалы в узлах трения рабочего колеса и направляющего аппарата с не требующим смазки покрытием. Давление в системе регулирования - 6,3 МПа, тип регулятора частоты вращения - на базе микропроцессорной техники, максимальное КПД - не менее 95%, срок службы – 40 лет.

В настоящее время на 50% выполнены работы по сборке рабочего колеса турбины и фундаментных частей ГА № 2. Запуск агрегата запланирован на конец октября 2012 г. С 1 июня 2012 г. в реконструкцию выведен ГА № 4, ведется его демонтаж.

Восстановление и реконструкция Баксанской ГЭС

На Баксанской ГЭС, входящей в состав Кабардино-Балкарского филиала ОАО «РусГидро», после 72 часовых испытаний под рабочую нагрузку поставлено автоматизированное комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией (КРУЭ-110 кВ). Это первое распределительное устройство такого типа, введенное в эксплуатацию на гидростанциях Северного Кавказа. Оборудование было смонтировано в ходе комплексной реконструкции Баксанской ГЭС. КРУЭ-110кВ типа ELK-04 произведено фирмой «ABB», Германия, выполнено по схеме «две системы шин с шиносоединительным выключателем», с подключением присоединений через один выключатель и развилку разъединителей к системам шин с установкой 10-и

выключателей в ряд и установкой ячейки ТН на системах шин.

КРУЭ надежней и безопасней открытых распределительных устройств (ОРУ), более компактно (занимает пятую часть демонтированного ОРУ-110 кВ), имеет меньший вес. Срок службы оборудования составляет 50 лет. КРУЭ-110 кВ предназначено не только для приема и распределения электроэнергии вырабатываемой Баксанской ГЭС, но и для транзита по имеющимся линиям электропередач. Монтаж оборудования КРУЭ-110 кВ, изготовленного компанией «АВВ» (Германия), и порталов отходящих линий 110 кВ, выполнены специалистами ОАО «Электроремонт-ВКК».

Восстановление Саяно-Шушенской ГЭС

После окончания монтажных работ, а также после проведения индивидуальных испытаний оборудования и систем на ГА № 8 Саяно-Шушенской ГЭС начались комплексные пусконаладочные испытания. Эти работы проходят согласно утверждённой ОАО «Силовые машины» программе с непрерывным контролем технологических параметров агрегата. На завершающем этапе эксплуата-

ционных испытаний ГА № 8 будет включен в сеть для проведения опробования работы основного и вспомогательного оборудования с максимальной нагрузкой в течение 72 часов. По результатам комплексных испытаний гидроагрегат будет готов для ввода в эксплуатацию, который в соответствии планом-графиком восстановления СШГЭС должен состояться в конце июня текущего года. Напомним, что в марте 2012 г. был введен в эксплуатацию ГА №7, а в декабре планируется ввести в строй ГА №9.

Предпусковым испытаниям ГА №8 предшествовали монтаж и наладка основного и вспомогательного оборудования, систем автоматического управления и защит, возбуждения, вибрационного и теплового контроля, монтаж генераторного выключателя НЕС-8. После этого были проведены высоковольтные испытания генератора, необходимые для определения скрытых дефектов изоляции, а также испытания маслонапорной установки, необходимой для регулирования гидротурбины. Изготовление и монтаж новых гидроагрегатов для Саяно-Шушенской ГЭС, включая шеф-монтаж и пусконаладочные работы, ведёт ОАО «Силовые машины».

Материалы подготовлены пресс-службой ОАО «РусГидро»:

*И. Слива, В. Скрацук, В. Тохсыров, А. Балкизов,
Е. Сучкова, А. Бутусова, И. Жуйкова.*

VI Съезд гидромеханизаторов России

Съезды гидромеханизаторов России, регулярно проводимые Московским государственным горным институтом, являются значительным событием в жизни разрозненных производственных организаций гидромеханизации земляных работ, заводов-изготовителей оборудования гидромеханизации, учебных и научно-исследовательских институтов, связанных с проблемами гидромеханизации.

Основная задача съездов — объединение усилий и обмен опытом ведущих специалистов, деловых кругов, ученых и работников высшей школы для решения важных задач по строительству и реконструкции водных объектов, обустройству месторождений нефти и газа, строительству железнодорожных и автомобильных дорог, намыву площадей под промышленное и гражданское строительство, добыче строительных материалов и др.

8 – 10 марта 2012 г. прошел очередной VI съезд гидромеханизаторов России. В работе съезда участвовали руководители отраслевых предприятий, представители ведущих зарубежных фирм, проектных организаций, заводов-изготовителей оборудо-

вания, конструкторских бюро, юридических компаний, Госстроя России, надзорных организаций, представители деловых кругов, ученые, аспиранты и студенты. Было заявлено 35 докладов и заслушано 25 сообщений по направлениям:

- кадры гидромеханизации России;
- проектные решения работ гидромеханизации и их оценка;
- оборудование гидромеханизации;
- технология земляных работ, выполняемых способом гидромеханизации;
- система гидротранспорта;
- процесс обезвоживания при обогащении горной массы;
- охрана окружающей природной среды;
- контрольно-измерительные приборы в гидромеханизации;
- опыт работы предприятий;
- совершенствование нормативно-правовых документов.

16 делегатов съезда были награждены памятной медалью «За заслуги в развитии гидромеханизации».

в России», которая была учреждена на IV съезде гидромеханизаторов.

Заслушав доклады и обменявшись мнениями участники VI съезда гидромеханизаторов России приняли следующие решения:

1. Отметить, что, несмотря на ежегодное сокращение объемов производства земляных работ способом гидромеханизации, оживилась работа по изготовлению нового оборудования заводами-изготовителями и модернизация существующего производственными организациями:

ОАО «Завод гидромеханизации» провело большую работу по восстановлению мощности завода и выпуску земснарядов большой и средней мощности, по применению легированной износостойчивой стали в литье деталей грунтовых насосов, по изготовлению новых комплексов приборов для земснарядов. В составе завода образован научно-технический центр, привлекаются конструкторские бюро судостроительных заводов для проектирования новых крупных земснарядов;

ЗАО «Цимлянский судостроительный завод» обновило проекты земснарядов, выпустило опытные образцы земснарядов с моноблоками погружных грунтовых насосов и приборным комплексом;

ООО «Рассвет-К» продолжает выпускать и обновлять резинотканевую продукцию для земснарядов и горной промышленности, в частности фильтрующие тубы — емкости для складирования пульпы и выделения грунта при очистке городских водоемов, аварийные резинотканевые ограждения — дамбы высотой до 3 м для МЧС, шланговые задвижки для регулирования расхода земснаряда;

ОАО «Промгидромеханизация» продолжает выпуск малых и средних земснарядов с погружным грунтовым насосом. В настоящее время в условиях России погружение грунтового насоса с помощью серийного надводного электродвигателя и валопровода является единственным надежным и эффективным решением, позволяющим увеличить глубину разработки грунта земснарядом до 30 м. Многолетняя успешная эксплуатация этих земснарядов дала возможность отказаться от изготовления и использования энергоемких эжекторных устройств с КПД 20 – 25 %.

2. В связи с высокой оценкой земли в России и чрезвычайно долгой и затратной процедурой отвода земли для организации добычи песка и гравия,

используемых в строительстве, необходима отработка запасов недр на полную глубину, часто до 30 м и более. В России осталось много не закрытых по геологическим запасам карьеров из-за ограниченной возможности разработки с помощью ранее эксплуатируемых земснарядов. Эти запасы необходимо доработать с помощью земснарядов с погружным грунтовым насосом, а вновь открываемые месторождения сразу разрабатывать на полную глубину залегания промышленных запасов.

3. Ряд производственных организаций успешно проводят опытно-промышленные работы по добыче озерного сапропеля естественной влажности с помощью земснаряда с винтовым насосом. При этом используется как старая чековая технология обезвоживания в ООО «Октябрьский ССРЗ — НН», ООО «Сапропель», так и новая технология одновременной добычи и расфасовки органической смеси в тубы на латвийском предприятии «ENT ENGINEERING». Но успешной добыче этого высокоэффективного органического удобрения, повышающего урожайность культур не менее чем на 20 %, мешает ограниченность сбыта. Если ранее совхозы и колхозы на этапе внедрения получали дотацию для стимулирования применения этого удобрения, то сегодня таких дотаций нет. Съезд гидромеханизаторов обращается к Министерству сельского хозяйства России с просьбой поддержать развитие добычи сапропеля в России.

4. Отметить работы ООО «Адмир Евразия», НПО «Гольфстрим», МГГУ и других организаций по применению технологии Geotube® Dewatering в процессах обезвоживания в добыче и переработке сырья в горной промышленности.

5. Рекомендовать ведущим гидромеханизированным предприятиям способствовать учебным заведениям в выпуске высококвалифицированных специалистов в области гидромеханизации, принимать студентов на производственную практику с предоставлением руководителей от производства, с проживанием и оплатой расходов студентов в период прохождения практики.

6. Съезд благодарит представителей зарубежных фирм за интересное сообщение о насосах и арматуре известной в мире корпорации «ITT Goulds Pumps».

Работа VI съезда гидромеханизаторов России прошла в теплой и деловой атмосфере.

Ялтанец И. М., доктор техн. наук (МГГУ)

Общее собрание участников ассоциации “Гидропроект”

37-е Общее собрание участников ассоциации “Гидропроект” состоялось в пансионате Российской академии наук “Звенигородский” Московской области с 27 по 29 февраля 2012 г.

Председателем собрания был избран Золотов Л. А. — первый вице-президент ассоциации “Гидропроекта”, секретарем — Лескес И. Н.

37-е Общее собрание участников ассоциации “Гидропроект” было посвящено 20-летию со дня образования этой организации. На собрании были рассмотрены итоги деятельности ассоциации за прошедший 20-летний период, намечены перспективы дальнейшей деятельности, рассмотрены текущие вопросы взаимного сотрудничества.

В работе собрания приняли участие руководители организаций-участников ассоциации, представители ОАО “РусГидро”, Совета ветеранов энергетики Минэнерго РФ.

В соответствии с утвержденной программой работы собрания на заседании 28 февраля 2012 г. выступили: Шайтанов В. Я. — президент ассоциации “Гидропроект”, Хазиахметов Р. М. — директор по технической политике ОАО “РусГидро”, Новоженин В. Д. — директор по технической политике института “Гидропроект”, Расказов Л. Н. — профессор МГСУ, Пак А. П. — помощник генерального директора ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”, Кириллов Ю. Н. — заместитель председателя Совета ветеранов Минэнерго РФ, Станкевич В. Л. — заместитель генерального директора ОАО “СГЭМ”, Семенов И. В. — заместитель генерального директора ОАО “НИИЭС”, Жигарев С. Д. — директор ОАО “Гидропроект” (Ташкент), Аксенов В. А. — первый заместитель генерального директора, главный инженер СРО НП “Энергопроект”, Пириев А. Ю. — директор Бакидропроекта, Велиев Джаладдин Зарбали оглы — начальник отдела института энергетики Азербайджана, Джулакян Сенник — председатель Совета директоров Армгидроэ-

нергопроекта, Осадчий С. Д. — заместитель генерального директора ОАО “Укргидропроекта”, Тарасов О. В. — генеральный директор ОАО “Мособлгидропроект”, Анискин Н. А. — директор института энергетического и специального строительству МГСУ, Авчиханов С. Г. — председатель Правления ТОО “Казгидро”, Григорян А. Р. — директор “Гидэпинвеста”.

Заслушав и обсудив доклады и выступления, участники Общего собрания приняли следующие решения:

1. Одобрить итоги деятельности ассоциации “Гидропроект” за 20-летний период и перспективы дальнейшей деятельности, изложенные в докладе президента ассоциации Шайтанова В. Я.

2. Считать основными задачами на ближайший период: актуализацию действующих и разработку новых нормативно-методических документов по гидротехническому строительству в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации “О техническом регулировании”;

повышение активности сотрудничества между участниками ассоциации “Гидропроект” в области гидроэнергетического и гидротехнического строительства, а также освоения нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

3. Поручить руководству ассоциации “Гидропроект” (В. Я. Шайтанов) подготовить и доложить на очередном Общем собрании предложения по укреплению руководства ассоциации.

4. Для обеспечения существования ассоциации “Гидропроект” считать необходимым, с учетом современных экономических условий, уточнить размеры ежегодного членского взноса и обеспечить уплату этого взноса каждой организацией-участником ассоциации.

5. Очередное Общее собрание ассоциации “Гидропроект” в соответствии с приглашением Армгидроэнергопроекта провести в г. Ереване (Армения) в сентябре 2012 г.

Шайтанов В. Я., президент ассоциации “Гидропроект”
Золотов Л. А., председатель Общего собрания
Лескес И. Н., секретарь Общего собрания

Сдано в набор 25.05.2012. Подписано в печать 17.07.2012. Формат 60×84 1/8.

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

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

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

Отпечатано в типографии издательства “Фолиум”

СПРАВКА

(предоставляется в редакцию каждым автором/соавтором статьи)

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

автор (соавтор) статьи _____

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

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

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

Подпись автора _____ « ____ » _____ 201_ г.

Ф.И.О. _____

Адрес _____

Место работы _____

Тел. _____

Факс _____

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

E-mail для переписки с редакцией _____