

Безопасность сложных технических систем

ПРОГРАММА «БЕЗОПАСНОСТЬ ГИДРОСООРУЖЕНИЙ»

Ю.П. ЛЯПИЧЕВ, *д-р техн. наук, профессор, консультант по плотинам
Российский университет дружбы народов, Москва*

В России построено 9 высоких (свыше 100 м) бетонных плотин ГЭС, в том числе Саяно-Шушенская, Чиркейская, Бурейская, Братская, Красноярская и другие. Все они уникальны по своей конструкции, геологическим условиям основания, особенностям воздействий и условиям эксплуатации. Среди них одной из самых уникальных в мире высоких плотин, отличающихся сложностью конструкции, является арочно-гравитационная Саяно-Шушенская (242 м) плотина.

Из 30 самых мощных ГЭС мира 6 построены в РФ, из них Саяно-Шушенская (6400 МВт) занимает 7-е место. По мощности ГЭС РФ – на 5-ом месте. Плотины большинства ГЭС России мощностью более 10 мВт имеют большую высоту (50–100 м и более) и расположены в горных или предгорных районах, равнинные ГЭС имеют плотины высотой до 50 м.

Чрезвычайную опасность представляют аварии и разрушения больших плотин, т.к. с увеличением высоты плотин и объемов водохранилищ повышается степень риска, которому подвергаются население, хозяйственные и природные объекты в нижних бьефах (НБ) гидроузлов. Анализ последней мировой статистики (2001 г.) аварий плотин, построенных современными методами, говорит о невозможности достижения их абсолютной безопасности. Вероятность аварий порядка 0,0001–0,00001 допускают зарубежные, в том числе российские нормы, т.е. риск аварий ГС существует всегда и определенный уровень риска заложен в нормы их безопасности. Важно знать, какой уровень риска допустим и обеспечивает достижение максимальной выгоды при минимальной опасности.

Нормирование безопасности гидросооружений (ГС) осуществляется двумя путями. Первый предусматривает разделение ГС в зависимости от их капитальности на **классы**. Каждому классу соответствуют определенные требования по безопасности, которые обеспечиваются регламентацией нагрузок и воздействий на ГС и системой **нормативных коэффициентов**. Это путь установления нормативной технической безопасности ГС, т.е. отнесение ГС к тому или иному классу должно обеспечивать требуемый уровень безопасности.

Второй путь – регламентация риска как вероятности аварии ГС. Нормативное значение риска может устанавливаться в целом для отрасли. Например, 10^{-7} (т.е. 0,0000001) аварий на один ядерный реактор в год в атомной энергетике, 10^{-9} аварий на один час полета в авиации и т.д. В гидротехнике значения нормативного риска согласуются со статистическими данными аварий ГС (плотин), т.е. 10^{-3} - 10^{-5} аварий в год в зависимости от типа ГС и других факторов.

Число аварий плотин (в основном земляных) в мире за последние 10–20 лет имеет тенденцию роста наряду с ростом крупных техногенных аварий на других объектах. Из этих данных следует, что при разного рода катастрофах (в авиации, при пожарах, выбросах хлора, авариях реакторов АЭС), исключая - дорожные происшествия (ДП), чаще всего чрезвычайные ситуации возникают в авиации, реже – при пожарах, третье место по частоте событий с летальными случаями занимают прорывы плотин, затем выбросы хлора и аварии на 100 реакторах АЭС. Наибольшее число летальных исходов – при прорыве плотин и выбросах хлора, затем при пожарах, авиационных катастрофах и авариях АЭС.

В РФ и бывшем СССР пока не было случаев разрушения крупных плотин, но аварийные ситуации возникали неоднократно, особенно на дамбах хвостохранилищ предприятий горнорудной и металлургической промышленности.

Крупные гидроузлы в СССР создавались согласно нормам (СНиП), отличавшимся высокими требованиями к расчетам максимальных расходов паводков различной обеспеченности и другим разделам проектов. Однако сейчас состояние многих крупных плотин и ГЭС не удовлетворяет возросшим требованиям безопасной эксплуатации, что подтвердила катастрофа на Саяно-Шушенской ГЭС. Не вдаваясь в непосредственную причину этой катастрофы, следует особо отметить, что подобная авария ГЭС никогда в мире не происходила и сценарий ее развития не укладывается в рамках нормальной эксплуатации ГЭС. Очевидно, что наряду с известными причинами, увеличивающими риск аварии плотин и ГЭС, существует ряд факторов, характерных в большей степени сейчас для России и относящихся к разряду организационных, социальных и экономических. К этим факторам относятся: превышение нормативных сроков эксплуатации целого ряда плотин, ГС и ГЭС, нарушение работы отдельных узлов их технологического оборудования, отсутствие профилактических ремонтов и проверок оборудования ГЭС и систем АСУ ГЭС в связи с финансовыми трудностями или часто желанием дирекции ГЭС и вышестоящей организации (компании РусГидро) «не тратиться и выжать максимум» из самой высокодоходной ГЭС страны путем ее эксплуатации в последние годы в нерасчетных предельных режимах, недостаточная профессиональная квалификация не только недавней дирекции этой ГЭС, но и руководящего состава РусГидро и Минэнерго РФ, состоящего в основном из топ-менеджеров и финансистов.

Технологическая катастрофа этой ГЭС серьезно увеличивает риск перелива воды через гребень плотины при ничтожном риске ее разрушения, так как, по крайней мере, в ближайшие 1-2 года пропускная способность гидроузла после окончания строительства берегового водосброса, рассчитанного на пропуск $4000 \text{ м}^3/\text{с}$, в связи с невозможностью использования гидроагрегатов ГЭС для пропуска расчетных $2300 \text{ м}^3/\text{с}$ и постоянным разрушением водобойного колодца водослива плотины ввиду огромной скорости потока (55 м/с) и вызванного этим ограничением его максимальной пропускной способности с 7000 до $4500 \text{ м}^3/\text{с}$ не может превышать в сумме $8500 \text{ м}^3/\text{с}$, что намного меньше максимального расчетного паводка, равного $13300 \text{ м}^3/\text{с}$.

Что касается форсирования строительства самой крупной строящейся Богучанской ГЭС (3000 МВт) на р. Ангара и пуска ее первых агрегатов в 2011 г., то ее строительство замедлилось не только из-за финансового банкротства ее второго (после РусГидро) инвестора - компании РусАл, но и из-за постоянного ремонтных работ по исправлению ряда дефектов каменно-набросной плотины с диафрагмой из литого асфальтобетона, и нежелания нынешних авторов ее проекта и ОАО ВНИИГ отказаться от своей порочной технологии строительства этой диафрагмы в пользу надежной современной технологии послойной укатки жесткого асфальтобетона в этой плотине, широко используемой во многих странах мира. Автор, как научный консультант проекта этой плотины от управляющей энергостроительной компании (ЭСКО) РАО ЕЭС России в 2001-2007 гг., вместе с рядом наших специалистов неоднократно выступал на конференциях в РФ и за рубежом в пользу изменения этого проекта. К сожалению, наши рекомендации не были полностью выполнены, а главная рекомендация в части перехода на надежную технологию укатанного асфальтобетона, вначале была принята Гидропроектом для плотины 1-ой очереди строительства, но в 2007 г., когда появился второй инвестор (РусАл) и было открыто финансирование проекта плотины и ГЭС на полную высоту, то руководство РусГидро под нажимом

ВНИИГ отказалось от ранее принятого решения, заменило авторов этого проекта и руководство компании ЭСКО, поддержавших наши рекомендации.

В 2006 г. почти все ГС и ГЭС перешли в подчинение Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор). Но большое число малых ГС в сельской местности стали бесхозными и перешли в управление местных органов власти, которые не имеют достаточных средств для их требуемого обслуживания. Бесхозные малые и средние водохранилища представляют серьезную опасность, т.к. велика угроза прорыва их плотин при интенсивном снеготаянии и продолжительных летне-осенних осадках. По данным МЧС РФ эти водохранилища расположены в Ульяновской, Волгоградской и Ростовской областях, Краснодарском, Красноярском и Приморском краях.

Особое беспокойство вызывают возможные аварии гидроузлов комплексного назначения, где шлюзы, дамбы обвалования, различные водозаборы принадлежат разным собственникам. Контроль за этими ГС находится на низком уровне, что может привести к их аварии, прекращению работы ГЭС или снижению выработки энергии. Такие последствия отмечались на шлюзах Волжско-Камского каскада, на Павловской, Цимлянской, Новосибирской, Волховской, Свирских ГЭС, дамбах обвалования и насосных станциях Чебоксарской ГЭС. Но самое плохое состояние дамб золошлаковых отвалов ГЭС, и особенно хвостохранилищ многих горнорудных предприятий. Низкое качество строительства, слабый контроль, плохое их обслуживание создают высокий риск их аварий.

Угрожает безопасности ГС, плотин и ГЭС их старение. Большинство из них эксплуатируется более 30-40 лет. После 40–50 лет срока службы вследствие старения плотин заметно возрастает вероятность их аварий. Эта проблема приобрела особую актуальность в связи с введением в 1997 г. в действие Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений». Сейчас 12 ГЭС России уже перешли рубеж 50-летней эксплуатации, а 20 ГЭС перейдут его к 2010 г. Эти 32 ГЭС имеют общую установленную мощность 94 млн. кВт и годовую выработку 40 млрд. кВт-ч, что составляет треть общего числа ГЭС, более 20% их мощности и более 25% общей выработки энергии.

Помимо возраста ГС, на снижение их безопасности влияет несоответствие старых ГС введенному в 2003 г. СНиП «Основные положения проектирования ГС». Согласно этому СНиП во многих построенных гидроузлах и ГЭС, включая крупнейшую Саяно-Шушенскую ГЭС (6400 МВт), построенную в 1978 г., и достраиваемую сейчас в России крупнейшую Богучанскую ГЭС (3000 МВт) на р. Ангаре, занижены максимальные расчетные сбросные расходы, принятые 30–70 лет назад на основе коротких гидрологических рядов наблюдений, что обусловило неправильный выбор модели расчетного гидрографа и других гидрологических характеристик. Новые гидрологические данные, накопившиеся за время эксплуатации ГЭС, позволяют откорректировать значения максимальных расходов, обычно в сторону их увеличения, что требует увеличения пропускной способности имеющихся водосбросов. Результаты таких проверок показали, что 22 ГЭС имеют ограничения пропускной способности водосбросов, в том числе Саяно-Шушенская, Богучанская, Вилюйская, Усть-Хантайская, Саратовская, Майнская, Миатлинская и другие ГЭС. Актуальность проблемы гидрологической безопасности ГС усугубляется потеплением климата во многих районах РФ, ростом плотности населения, размещением поселков и предприятий в нижнем бьефе гидроузлов, часто в зоне прохождения волны прорыва напорного фронта, старением ГС, износом технологического оборудования и др.

В связи с введением в нормы проектирования и строительства РФ новой карты максимальных возможных землетрясений, составленной Институтом Фи-

зики Земли РАН в 2003 г., многие районы Европейской части РФ, включая Среднее и Нижнее Поволжье, ранее не считавшиеся сейсмически опасными, сейчас считаются таковыми (7 баллов), районы Северного Кавказа с умеренным уровнем сейсмической опасности (7 баллов) попали в зону 8 и даже 9-балльных землетрясений, причем последняя расширилась и включает северо-восточные районы Сибири (Забайкалье, Чукотка) и Приморский край, а Камчатка и Сахалин попали в зону 10-балльных землетрясений. Это потребовало срочной переоценки сейсмических аспектов безопасности многих крупных ГЭС и плотин.

Со времени принятия Федерального закона «О безопасности ГС» ответственные за его исполнение организации (Миниэнерго РФ, основная гидроэнергетическая компания страны РусГидро, ее многочисленные «дочки» - дирекции большинства ГЭС страны, проектно-изыскательский институт Гидропроект, в т. ч. ответственные за безопасность ГС научные институты «НИИЭС» и «ВНИИГ») провели большую работу по реализации основных направлений обеспечения безопасности ГС. Главные проблемы, возникшие с реализацией этого закона, связаны с недостаточностью финансирования научно-проектных работ по обеспечению безопасности ГС, отсутствием опыта разработки и эксплуатации современных компьютерных и информационно-диагностических систем автоматизированного мониторинга состояния ГС и дефицитом гидротехников-исследователей, имеющих требуемую подготовку в этой сложной области.

В учебных магистерских программах ведущих университетов России (МГУ, МГСУ, РУДН, МГУП и др.) и Европы отсутствует тематика по безопасности ГС, несмотря на очевидную ее актуальность для РФ и многих стран мира.

В связи с этим весьма своевременна инициатива кафедры ГиГС в РУДН разработать и создать в 2008 г. в рамках национального проекта «Образование» научно-учебную лабораторию (НЛ) «Гидрологическая и техническая безопасность ГС» (далее «Безопасность ГС») и учебно-методический комплекс (УМК) с этим же названием, включающий описание курса, программу и электронный учебник (научный руководитель НЛ и разработчик УМК - автор статьи).

Основные научные направления НЛ и программы «Безопасность ГС»:

1. Численные и модельные исследования гидрологической и технической (статической и сейсмической) безопасности плотин и водосбросов.

2. Численные исследования устойчивости грунтовых плотин и откосов при статических и сейсмических воздействиях.

3. Численные исследования статической и сейсмической устойчивости и прочности плотин из укатанного бетона с целью оптимизации профилей этих плотин на скальных и грунтовых основаниях.

4. Теория расчета и модельные исследования водосбросов и условий сопряжения сбрасываемого потока с нижним бьефом.

5. Модельные и численные исследования взаимодействия водного потока с деформируемым руслом (русловые процессы, эрозия дна, берегов, устья рек).

Программа «Безопасность ГС» кроме проведения учебно-научных модельных гидравлических, гидрологических, фильтрационных и русловых исследований на одних из лучших в мире гидравлических лотках и установках фирмы Agmfield (Англия), предусматривает широкое применение современных компьютерных программ численных расчетов поведения ГС (плотин), информационных технологий и знакомство с информационно-диагностическими системами мониторинга состояния как ГС (плотин, защитных дамб, водосбросов, зданий ГЭС и хвостохранилищ), так и русловых процессов на реках, разработанных в наших институтах-партнерах: ОАО НИИЭС, ИВП РАН, ОАО НИИ ВОДГЕО.

Ввиду востребованности этой программы в ближайшее время предполагается ознакомить с ней ряд университетов, научно-проектных фирм ряда стран Европы и Латинской Америки, с которыми автор имеет давние научные связи.

Список программ расчетов ГС и подземных сооружений

№	Код и название программы	Владелец программы, ее статус	Операционная среда (пред- и постпроцессорная обработка)
1	PL-STRESS. Расчеты НДС грунтовых сооружений с использованием упруго-пластической модели грунта	Ляпичев Ю. П. (РУДН), свободный	Windows 98, (ввод данных в Excell, результаты расчетов обрабатываются с помощью Surfer)
2	Проф. пакет CADAM . Расчеты статической и сейсмической прочности и устойчивости бетонных гравитационных плотин	Политехнический университет Монреаля (Канада), свободный	Windows XP (пред- и постпроцессорная обработка, визуализация, печать всех данных)
3	Проф. пакет RS-DAM . Вероятностные расчеты (метод Монте–Карло) прочности и устойчивости бетонных гравитационных плотин	То же	То же
4	Проф. пакет Visual ModFlow Расчеты установившейся и неустановившейся фильтрации в грунтовых основаниях и сооружениях	Компания Schlumberger (Германия), лицензионный	То же
5	Проф. пакет PLAXIS (основной, фильтрационный и динамический модули). Расчеты НДС, устойчивости и фильтрации в подземных и грунтовых сооружениях	Компания PLAXIS (Голландия), лицензионный	То же
6	Проф. пакет FLAC-5 (2D) . Расчеты статического и сейсмического НДС, устойчивости и фильтрации в грунтовых и подземных сооружениях	Корпорация ITASCA (США), лицензионный	То же
7	Проф. пакет FLAC/Slope . Расчеты статической и сейсмической устойчивости грунтовых откосов	То же	То же
8	Универсальный пакет ADINA . Расчеты статического, сейсмического и температурного НДС, устойчивости, фильтрации в бетонных и грунтовых сооружениях	Компания ADINA (США), учебный	То же
9	Проф. пакет MIKE-11 . Одномерные гидравлические и гидрологические расчеты пропуска паводков (волны прорыва) и последствия их воздействий в нижних бьефах гидроузлов	Компания DHI Water and Environmental (Дания), лицензионный	То же
10	Проф. пакет MIKE-21 . Двухмерные гидравлич. и гидрологич. расчеты пропуска паводков и последствий их воздействий в верхних бьефах	То же	То же