



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.

№ 10

октябрь

2012

Содержание

Проектирование, строительство, эксплуатация

Лапин Г. Г., Судаков В. Б., Шангин В. С. Пути
повышения технологичности бетонных плотин . . . 2

Рассказчиков В. А. Влажностные изменения в
бетоне Саяно-Шушенской плотины и их влияние на
напряженно-деформированное состояние сооруже-
ния 7

Фролов А. Н. Совершенствование методик
расчета и конструкций намывных золошлакоотва-
лов для повышения их эксплуатационной безопас-
ности 20

Александровский А. Ю., Хасянов С. В. Оцен-
ка влияния ограничений по скорости изменения
уровня воды в водохранилище на энергетические
показатели работы гидроэлектростанций 26

Расчеты, исследования, эксперименты

Кудрина Е. В., Ахременко А. И. Пространст-
венно-временная изменчивость гидрохимических
параметров Угличского водохранилища 30

Мухаммадиев М. М., Уришев Б. У., Носи-
ров Ф. Ж. Осаждение частиц наносов в аванкамере
насосной станции 33

Лавров Н. П., Логинов Г. И., Борисенко Д. А.,
Шпилов А. В. Водозаборный гидроузел для де-
ривационной ГЭС на р. Мерке 37

Высоцкий Л. И., Высоцкий И. С. Сопостави-
тельный анализ эффективности новой формулы для
распределения осреднённых скоростей в продоль-
но-однородных турбулентных потоках 41

Дискуссии

Селезнев В. С., Лисейкин А. В., Громы-
ко П. В. Были ли повышенные колебания второго
гидроагрегата до аварии на Саяно-Шушенской ГЭС
17 августа 2009 г.? 48

Хроника

Всемирная декларация “Водообеспечение для
устойчивого развития” 51

Поздравление А. Д. Осипову 54

Поздравление Г. М. Каганову 55

Поздравление В. С. Шангину 56

Новости гидроэнергетики и гидротехники 57

Пути повышения технологичности бетонных плотин

Лапин Г. Г., инженер, Судаков В. Б., доктор техн. наук,
Шангин В. С., кандидат техн. наук

Рассматриваются современные технологии и конструктивные решения, позволяющие значительно сократить сроки и стоимость строительства бетонных плотин.

Ключевые слова: бетонная плотина, высокотехнологичные конструкции, интенсивность бетонирования, однослойные блоки, укатанный бетон, швы-надрезы, ступенчатый водосброс.

Мировой опыт плотиностроения последних десятилетий показывает, чтобы строить быстро и дешево, сокращая трудозатраты и средства, нужна не только эффективная организация производства бетонных работ, но и высокотехнологичные конструкции плотин, рассчитанные на возведение поточными методами с полной механизацией технологических операций. Во второй половине XX в. при переходе к бетонированию однослойными блоками и применению укатанного бетона, т.е. при переходе к технологиям выполнения бетонных работ мощными, высокопроизводительными машинами и механизмами [1 – 6] сократились сроки строительства гидроузлов в 2 – 5 раз (табл. 1) при значительном уменьшении затрат труда и средств.

С введением новых, радикально изменившихся технологий укладки бетонной смеси с недостижимой ранее интенсивностью — 5...10 тыс. м³/сут (60...100 тыс. м³/мес) стало очевидно, что чем технологичнее конструкция, т.е. чем в большей степе-

ни она пригодна для возведения поточными методами, тем в более короткие сроки и с большей экономической эффективностью может быть построена плотина. Это явилось стимулом для разработки таких конструктивных решений, при которых становилось возможным полноценно использовать современную высокопроизводительную бетоноукладочную технику.

Изменилась система разрезки деформационными и температурными швами тела плотин: вместо столбчатой разрезки — разрезка на укрупненные секции-массивы. Межсекционные деформационно-осадочные швы стали располагать на больших расстояниях (рис. 1), а для восприятия температурных воздействий верховой и низовой гранями плотин устраивать швы-надрезы. Это дало возможность вести бетонирование однослойными блоками больших плановых размеров, резко сократить трудоемкие опалубочные работы и одновременно повысить монолитность бетонных плотин. Межсек-



Рис. 1. Плотина Капанда на завершающей стадии строительства

ционные деформационно-осадочные швы, как правило из сборного железобетона, располагаются на расстояниях 40...100 м в зависимости от топографии и геологии створа плотин, климатических условий и реальных технических возможностей механизмов и устройств. При определении размеров секций-массивов должны учитываться как среднегодовые температуры воздуха, так и прогнозируемый температурный режим и температурные деформации секций-массивов в строительный период и в первые годы эксплуатации.

Так, в частности, для построенных по проектам российских специалистов плотин расстояние между межсекционными швами было принято равным: 40 м для плотины Коусар (Иран) и 80 м, в среднем, для плотины Капанда (Ангола). Такой же подход используется в современном плотиностроении в ряде стран, например, в Испании (табл. 2, рис. 2). Нужно отметить, что при характерном для возведения плотин однослойными блоками равномерном наращивании в высоту всех секций, разница в осадке смежных секций-массивов ничтожна.

Современные конструкции межсекционных швов, располагаемых на расстояниях 30...80 м друг от друга, технологичны. Отработанные к настоящему времени их конструкции, число которых невелико, позволяют легко и быстро монтировать

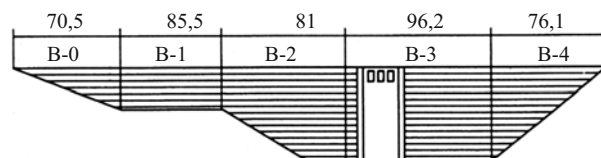


Рис. 2. Продольный профиль плотины Урдалур (Испания)

швы из сборных элементов, не создавая препятствий поточному бетонированию. Возможно устройство межсекционных швов способом их нарезки в свежееуложенном бетоне.

Расстояния 7...20 м между температурными швами-надрезами принимаются в зависимости от климатических условий. Из предложенных и осуществленных вариантов наиболее удачной и технологичной следует признать конструкцию швов-надрезов, представленную на рис. 3 и 4.

Переход к возведению плотин однослойными блоками в значительной мере обусловлен сокращением объемов и упрощением опалубочных работ, которые всегда сдерживали темпы бетонирования и требовали больших трудозатрат [1, 7]. При возведении плотин однослойными блоками большой площади (рис. 1, 3) опалубиваются только поверхности напорных и низовых граней, не надо опалубивать и распалубивать огромные поверхности (по суммарной площади) многочисленных блоков, что

Т а б л и ц а 1

Интенсивность бетонных работ при возведении плотин

Плотина (страна, год завершения строительства)	Высота плотины, м	Объем бетона, тыс. м ³	Производительность бетонных заводов, м ³ /ч	Максимальная интенсивность бетонирования, м ³ /сут	Продолжительность бетонных работ, мес
Уиллоу-Крик (США, 1983 г.)	52	333	330	4460	5
Тамагава (Япония, 1990 г.)	100	1140	360	5800	27
Аппер Стиллуотер (США, 1987 г.)	91	1223	575	6120	21
Миягаси (Япония, 2001 г.)	156	2000	360	6000	40
Риалб (Испания, 2000 г.)	101	1205	560	6000	33
Ралко (Чили, 2004 г.)	155	1540	700	6000	22
Бени Харун (Алжир, 2000 г.)	95	1900	800	9500	21
Оливенхейн (США, 2003 г.)	97	1140	750	12250	12
Майл 1 (Колумбия, 2002 г.)	188	1750	600	7200	26
Эрган ¹⁾ (Китай, 1999 г.)	240	4242	720	8500	48
Иёва ²⁾ (Мьянма, 2008)	134	2472	480	7555	34

Примечания.

¹⁾ Арочная плотина Эрган возведена с применением малопластичных бетонных смесей, остальные плотины — из укатанного бетона.

²⁾ Для плотины Иёва приведена интенсивность при укладке только укатанного бетона, общий объем бетона — 2860 тыс. м³.



Рис. 3. Строительство плотины Коусар высотой 144 м

необходимо при столбчатой разрезке сооружений (рис. 5). Объемы опалубочных работ и, соответственно, затраты труда и времени на подготовку блоков к бетонированию сокращаются на 20...80 %.

Переход к возведению плотин блоками бетонирования большой площади позволяет отказаться от дорогостоящей и технически сложной цементации многочисленных межблочных швов и создавать более монолитные сооружения чем при столбчатой разрезке.

Конструктивное решение, применяемое в современном плотиностроении, — придание низо-

Т а б л и ц а 2

Разрезка плотин из укатанного бетона на секции-массивы

Плотина	Число секций	Ширина секций, м	Годы строительства
Санта Евгения	4	80; 60; 65; 90	1986 – 1988
Хервас	4	57; 32; 74; 47	1989 – 1990
Пуэбла де Казалла	5	20; 60; 60; 60; 20	1988 – 1991
Урдалур	5	77; 96; 81; 65; 70	1990 – 1992
Арриарин	5	12; 65; 66; 61; 42	1991 – 1994



Рис. 4. Конструкция температурного шва-надреза

вым граням ступенчатой формы, резко повысило технологичность бетонных плотин. Широкое практическое использование этого решения обусловлено тем, что послойное бетонирование сочетается с созданием ступенчатых низовых граней, что дает целый ряд технологических преимуществ:

позволяет сократить объем трудоемких опалубочных работ для этой грани почти на 30 %;

резко упрощается конструкция опалубки, ее монтаж и перемонтаж (рис. 6);

обеспечиваются благоприятные условия для укладки и уплотнения лицевых слоев бетона у вертикальной опалубки. Укладка бетона в острые углы между наклонной опалубкой и горизонтальными слоями осложняла производство бетонных работ и приводила к появлению поверхностных дефектов, превращавшихся впоследствии, особенно в районах с суровым климатом, в очаги разрушения низовых граней;

создается возможность безопасного перелива паводковых вод через плотину во время строительства. Это позволяет использовать новый подход к выбору параметров перемычек при проектировании и строительстве бетонных плотин со ступенчатой низовой гранью.

Например, успешно осуществлено два перелива паводковых вод через плотину Ралко (Чили) во время ее строительства. Бетонные работы возобновлялись сразу после окончания переливов [8].

Широкое распространение послойной технологии возведения бетонных плотин со ступенчатой низовой гранью инициировало повышенный интерес к ступенчатым водосбросам, простота формы которых предопределяет их высокую технологичность и выгодное сочетание с послойным бетонированием. Ранее ступенчатые водосбросы строились в нашей стране и за рубежом [9], но со второй половины XX в. при создании гидроузлов стали отдавать предпочтение водосбросам с криволинейной поверхностью, очерченной по Кригеру-Официрову, так как у гидравликов сложилось представле-

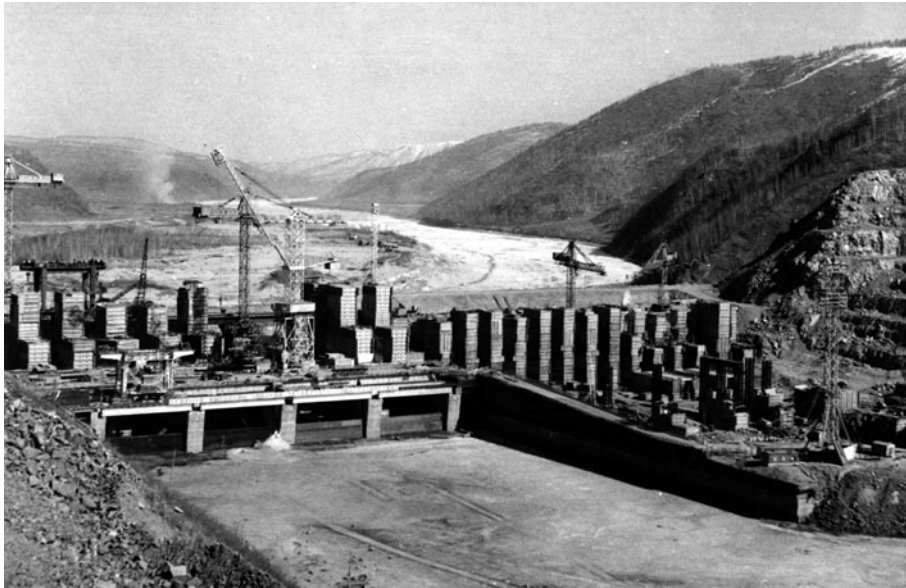


Рис. 5. Строительство Зейской ГЭС с массивно-контрфорсной плотиной

ние, что ступенчатые водосбросы эффективны только в тех случаях, когда удельные расходы воды, сбрасываемой через них, невелики.

Проведенными в последние десятилетия специальными исследованиями доказано, что ступенчатые водосбросы из-за возможности аэрирования воды позволяют избежать кавитации даже при сбросе высокоскоростных потоков с большими удельными расходами и обладают достаточно высокой пропускной способностью. Вследствие этого отпадает необходимость применять для таких водосбросов специальные бетоны с их сложной технологией и выполнять очень трудоемкие опалубочные работы для создания криволинейной водосливной поверхности. Благодаря этим исследованиям, уже с конца 80-х годов XX в. развернулось строительство высоких бетонных плотин со ступенчатыми водосбросами, наиболее известные: Аппер-Стиллуотер (США, 1987 г.), Нью Виктория (Австралия, 1991 г.), Вел (Испания, 1997 г.), Дачаошен (КНР, 2001 г.), Коусар (Иран, 2005 г.), Богучанская ГЭС (Россия, 2012 г.).

Для экономичности, надежности, долговечности и технологичности бетонных плотин большое практическое значение имеет зональное распределение бетонов разных марок в соответствии с реальными условиями работы материала, что особенно существенно в районах с суровым климатом. Конструктивный прием с выделением наружных (защитных) зон и внутренней зоны и его эффективность тесно связаны с технологией и организацией бетонных работ. При рациональном распределении бетона удастся оптимизировать, свести к минимуму, объемы дорогостоящего морозостойкого бетона наружных зон. Становится реальным использовать для внутренних зон плотин бетоны с небольшим

содержанием цемента (60...100 кг на 1 м³ бетона) и, что не менее важно, заполнителей с упрощенной подготовкой из местных карьеров. Возможно также зональное распределение бетона с разной прочностью во внутренней зоне плотины по высоте в соответствии с полем напряжений. Послойное возведение бетонных плотин как из малоподвижных бетонных смесей, так и укатанных бетонов, обеспечивает возможность наиболее рационального распределения бетона. Это показано специальными исследованиями и подтверждено опытом плотиностроения последних лет [1]. Для плотин, возводимых однослойными блоками большой площади и небольшой высоты (0,3...1,0 м), основным средством регулирования температурного режима является поверхностное охлаждение, не создающее задержек в процессе бетонирования. Строительство таких плотин можно вести с очень высокой интенсивностью бетонных работ (табл. 1).



Рис. 6. Формирование ступенчатой низовой грани плотины Коусар

При строительстве бетонных плотин с применением столбчатой разрезки укладка бетона различных марок в наружную зону со стороны напорной грани, во внутреннюю зону и со стороны низовой грани всегда связана с большими осложнениями при производстве бетонных работ. Это вызывало необходимость частого переключения бетонного завода на выпуск разномарочных бетонов, обуславливало трудности с созданием защитных зон нужных размеров, что приводило к резкому снижению производительности используемых машин и механизмов, темпов строительства и негативно сказывалось на качестве и стоимости плотин. По этой причине либо отказывались от зонального распределения бетона в плотинах (Днепровская, Чиркейская, Ингурская ГЭС и др.), или же оно было реализовано частично [10]. Дополнительные задержки и затраты вызывались необходимостью размещения в бетонизируемых блоках змеевиков трубного охлаждения — основного средства регулирования термонапряженного состояния при возведении плотин столбчатыми блоками.

Оценивая технологичность конструктивных решений, применяемых в современном плотиностроении, нужно отметить, что до сих пор значительное снижение темпов бетонирования происходит на ярусах расположения дренажно-смотровых галерей. Негативное влияние наличия галерей проявляется как при возведении плотин со столбчатой разрезкой, так и при возведении плотин однослойными блоками большой площади. Для первого случая характерны многочисленные сбои и задержки, которые обусловлены трудностями подготовки блоков к бетонированию, зональным распределением бетона в блоках малой площади, но большой высоты и т.д. Для второго случая, — осложнения, возникающие из-за необходимости укладки бетонных смесей в стесненные пространства с вынужденным применением малопроизводительных механизмов, что приводит к снижению интенсивности бетонирования на ярусах галерей почти на 30 %. Попытки заменить железобетонные оболочки галерей устройством на их местах временных полостей, засыпаемых песком или гравием, оказались тщетны и привели к дополнительным затратам труда, средств и времени. Более перспективными могут оказаться изменения конфигурации и способа монтажа железобетонных элементов для сборных конструкций дренажно-смотровых галерей.

Выводы

1. Для строительства бетонных плотин с меньшими затратами времени и средств нужна не толь-

ко эффективная организация бетонных работ, но и высокотехнологичные конструкции плотин. В настоящее время это достигается путем применения специальных конструктивных решений:

разрезка бетонных плотин деформационно-осадочными швами на секции-массивы;

устройство швов-надрезов для предотвращения появления температурных трещин на напорных и низовых гранях плотин;

придание низовым граням плотин ступенчатой формы;

применение ступенчатых водосбросов вместо водосбросов с криволинейной поверхностью, очерченной по Кригеру-Офицеру;

создание условий для наиболее рационального зонального распределения бетона в теле плотины.

2. Необходимо разработать такие конструкции дренажно-смотровых галерей, при использовании (монтаже) которых не возникают затруднения в процессе производства бетонных работ.

Список литературы

1. *Судаков В. Б., Толкачев Л. А.* Современные методы бетонирования высоких плотин. М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. *Материалы конференций и совещаний по гидротехнике.* Пути повышения технологичности конструкций гидросооружений для районов Сибири и Дальнего Востока. Л.: Энергоиздат, 1981.
3. *Судаков В. Б., Марчук А. Н., Караваев А. В.* Современные конструктивно-технологические решения для сейсмостойких гравитационных плотин // Гидротехническое строительство. 1996. № 2.
4. *Proceedings of the XVI-XXII ICOLD Congresses.* Paris, 1988 – 2006.
5. *Ивашищев Д. А., Судаков В. Б., Василевский А. Г., Шангин В. С., Юркевич Б. Н., Караваев А. В., Лапин Г. Г.* Принципы конструирования современных бетонных плотин // Гидротехническое строительство. 2004. № 2.
6. *Синев В. В., Судаков В. Б., Солтани Н. Х., Кейхампур К. Т.* Особенности конструкции и технологии бетонирования плотины Коусар // Гидротехническое строительство. 2006. № 6.
7. *Construction of high concrete dam in narrow deep gorge.* Transactions of the XI ICOLD Congress / K. K. Kouzmin, V. L. Kuperman, A. G. Oskolkov, V. B. Sudakov, L. A. Tolkatchev, V. S. Shangin. Q. 43, R. 10, 1973.
8. *Uribe L. A., Hofer O. A.* Ralco: A dam constructed under difficult conditions. Transactions of the XXII Congress on Large Dams. Q. 84, R. 4, 2006.
9. *Судаков В. Б.* О долговечности и технологичности ступенчатых водосбросов // Гидротехническое строительство. 2010. № 10.
10. *Судаков В. Б.* Рациональное использование бетона в гидротехнических сооружениях. М.: Энергия, 1976.

Влажностные изменения в бетоне Саяно-Шушенской плотины и их влияние на напряженно-деформированное состояние сооружения

Рассказчиков В. А., кандидат техн. наук
(СибНИИГ Красноярского филиала ЗАО "Сибирский ЭНТЦ")

Приводятся результаты исследований водонасыщения и набухания бетона в напорном фронте плотины. Определены глубина проникновения влаги в сооружение и влажностные напряжения, возникшие от набухания бетона.

Ключевые слова: плотина Саяно-Шушенской ГЭС, натурные исследования, влажность бетона, влажностные деформации, влажностные напряжения.

При проектировании бетонных плотин в СНиП П-54-77 и П-56-77 наряду с другими факторами рекомендовалось учитывать влажностные воздействия на сооружения, однако эти рекомендации фактически не выполнялись по причине отсутствия соответствующих методик. По этой же причине в СНиП 2.06.06.85 усилия в бетонных конструкциях плотин, вызванные набуханием бетона, вообще не включены в перечень нагрузок и воздействий.

Лабораторные исследования, выполненные в НИИЖБ, ВНИИГ и других организациях, показали, что от набухания в бетоне могут возникнуть значительные сжимающие напряжения [1, 2]. Наличие дополнительных сжимающих напряжений в сооружении подтверждается натурными наблюдениями [3]. Однако в силу того, что на работу плотины влияет множество факторов, выделить и оценить количественно напряжения от набухания бетона при отсутствии соответствующей методики не представлялось возможным.

В 1970 – 80-х гг. в СибНИИГ под руководством автора статьи разрабатывалась методика оценки напряжений, возникающих в плотине от набухания бетона [4]. Работа велась по двум направлениям: путем измерений в сооружении влажности и влажностных деформаций. Апробация разработанных методик осуществлялась на строительстве плотины Саяно-Шушенской ГЭС [5, 6].

При изучении водонасыщения и набухания бетона в плотине Саяно-Шушенской ГЭС использовались стандартные и нестандартные приборы, не предусмотренные проектом. По этой причине все установки приборов выполнялись как временная контрольно-измерительная аппаратура (рис. 1) по линии строительного контроля при поддержке главного инженера Красноярскгэсстроя К. К. Кузьмина, с пониманием относившегося к инициативе автора. Наблюдения за показаниями стандартной КИА в период строительства осуществляли работники службы натурных наблюдений Красноярскгэсстроя, а впоследствии — лаборатории гидротехнических сооружений (ЛГТС) дирекции СШГЭС. В сложный период начала 1990-х гг. замеры по отдельным приборам не проводились, однако в силу

того, что процесс водонасыщения бетона к этому времени уже замедлился, перерывы не сказались на результатах. Наблюдения за нестандартными приборами в период временной эксплуатации осуществлялись сотрудниками СибНИИГ, а с 1987 г. по ряду причин были прекращены.

В статье приводятся основные результаты исследований водонасыщения, набухания и усадки бетона в плотине.

Водонасыщение бетона. Приборы для измерения влажности бетона, основанные на диэлектрическом методе [7], разрабатывались и изготавливались в СибНИИГ. В сооружение влагомеры устанавливались в процессе укладки бетона на высоте 1,5 м от основания, по оси бетонируемого блока на различном расстоянии, на участке от напорной гра-

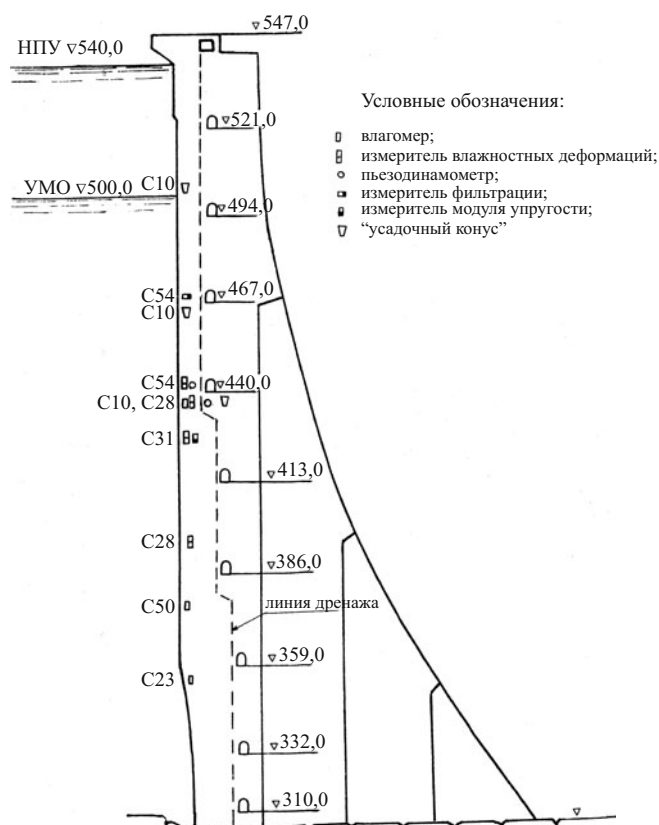


Рис. 1. Схема установок КИА в первых столбах плотины

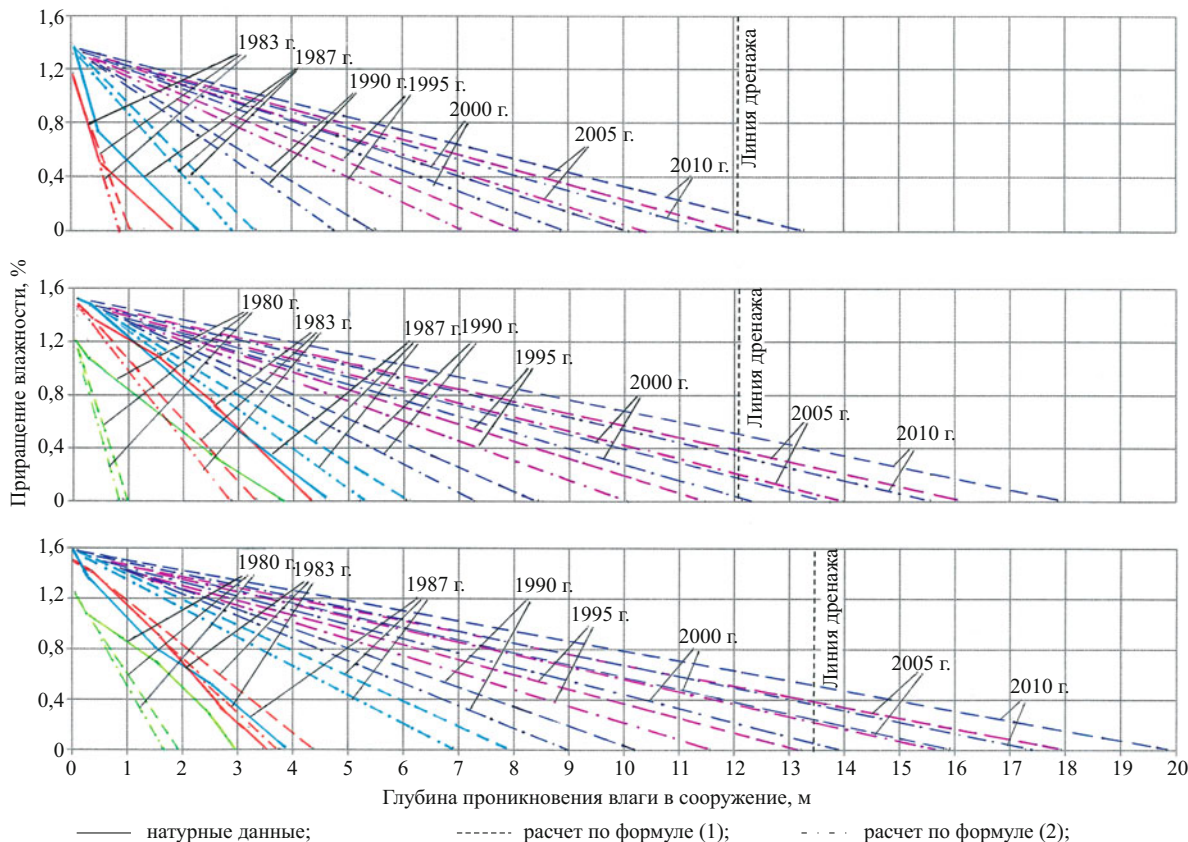


Рис. 2. Водонасыщение бетона в секции 28, отм. 434,5 м (а); в секции 50, отм. 378,5 м (б) и в секции 23, отм. 354,5 м (в)

ни до линии дренажа. В плотине применен горизонтальный дренаж — водопроницаемые трубы, устанавливаемые в межблочных швах. Горизонтальный дренаж соединялся с колодцами в межсекционных швах, обеспечивающими сбор фильтрата. Расстояние от напорной грани до линии дренажа составляло от 8,1 до 13,5 м в зависимости от отметки плотины. Расстояние от линии дренажа до верхних стенок галерей составляло от 1,5 до 2,5 м.

На рис. 2 показаны изменение влажности бетона в напорном фронте и глубина проникновения влаги в сооружение на трех отметках в период с 1980 по 1987 г. Из рисунка видно, что влажность бетона у грани на всех трех отметках достигла своего максимального значения в первые три года после поднятия напора, при этом приращение влажности составило от 1,51 до 1,60 %. Скорость проникновения влаги в сооружение также в первые годы была заметно выше, однако и в последующие годы глубина проникновения влаги хотя и незначительно, но увеличивалась. С 1987 г. наблюдения за установленными в плотине влагомерами не выполнялись, поэтому оценить глубину проникновения влаги при дальнейшей эксплуатации сооружения можно только расчетным путем.

Математическое решение задачи о глубине проникновения влаги в пористое тело во времени под напором воды получено П. Я. Полубариновой-Кочиной [8]:

$$l = 1,62 \sqrt{\frac{K_{\phi} h t}{m'}}, \quad (1)$$

где K_{ϕ} — коэффициент фильтрации бетона, равный скорости фильтрации при градиенте напора равном единице; h — напор воды на грани; t — время с момента создания напора; m' — коэффициент недостатка водонасыщения водой, равный отношению свободного объема пор к общему объему тела.

Формула (1) выведена в предположении, что влага перемещается в массиве прямоугольного сечения. Для определения глубины проникновения влаги в треугольном профиле плотины В. Н. Жиленков рекомендовал зависимость [9]:

$$l = \sqrt{\frac{K_{\phi} h t}{m'}}. \quad (2)$$

Коэффициент недостатка водонасыщения m' , входящий в формулы (1) и (2), по данным исследований ряда авторов изменяется незначительно и находится в пределах от 0,02 до 0,028 [9]. Коэффициент фильтрации K_{ϕ} , определяемый в соответствии с ГОСТ 19426-74 [10], для гидротехнического бетона находится в пределах от $1 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ см/с [11]. Такое различие K_{ϕ} объясняется множеством факторов, влияющих на водопроницаемость бето-

на: составом бетонной смеси и характеристиками ее составляющих, условиями укладки и последующего твердения бетона, напряженным состоянием и т.п. Естественно, что учесть все факторы, проводя лабораторные испытания бетона, не представляется возможным, поэтому автором были разработаны способ и устройство для определения коэффициента фильтрации бетона в сооружении [12]. Два таких устройства были установлены в 0,5 м от напорной грани в декабре 1981 г. в секции 54 на отм. 467,7 м. Трубки от устройств для измерения количества фильтрации выводились в галерею на отм. 467,0 м. Наблюдения за водонепроницаемостью бетона проводились с 1984 по 1986 г. За время наблюдений водонепроницаемость бетона снижалась, особенно заметно в первый год, а в дальнейшем стабилизировалась и к 1987 г. средняя величина коэффициента фильтрации составила $2,5 \cdot 10^{-9}$ см/с. Это значение K_f , а также среднее значение $m' = 0,024$ использовали при определении глубины проникновения влаги в сооружение во времени по зависимостям (1) и (2). Из рис. 2 видно, что с 1980 по 1987 г. расчетные и фактические значения глубины проникновения влаги в бетон значительно различаются. Это можно объяснить в первую очередь нестабильностью УВБ в период временной эксплуатации, когда отметки установки приборов оголялись в зимний период (рис. 3). При этом бетон у грани заметно охлаждался, а, согласно законам тепломассопереноса, влага перемещалась в противоположном направлении. Из рис. 2 видно, что в соответствии с расчетами, выполненными по зависимостям (1) и (2), к 2010 г. влага на всех трех отметках должна была проникнуть за линию дренажа.

В ноябре 2009 г. в галереях плотины были проведены измерения влажности бетона стенок с помощью прибора "Влагомер" МГ4-Б [7]. При проведении измерений температура воздуха была либо равна температуре бетона, либо превосходила ее на 1 – 2 °С. При этом влажность воздуха, измеряемая прибором ИТВ-7, составляла не более 85 %.

В табл. 1 представлены результаты измерений влажности бетона со стороны верхнего $W^{ВБ}$ и нижнего $W^{НБ}$ бьефов для галерей на отм. 310 – 494 м. В галереях секции выбирались произвольно, главным критерием выбора были наличие ровной поверхности и отсутствие следов протечек воды. Результаты измерений влажности бетона представлены в табл. 1. Из таблицы видно, что при всей неоднородности бетона по влажности (коэффициент вариации находится в пределах от 3,2 до 20,8 %) отмечается тенденция увеличения влажности бетона по мере понижения отметки галереи. При этом в галерее на отм. 440,0 м влажность бетона верхней стенки на 11 % выше нижней, а в галерее на отм. 310,0 м это соотношение составляет 20 %. Отсюда

следует, что в плотине происходит диффузионно-капиллярное водонасыщение бетона и эти данные в целом согласуются с результатами расчетов, приведенными на рис. 2. В галереях на отм. 467,0 и 494,0 м, где, согласно табл. 1, средняя влажность бетона верхних стенок не превышает влажность бетона нижних стенок, по данным расчетов (по формулам (1) и (2)) глубина проникновения влаги в сооружение составила менее 7,5 м, т.е. фронт промокания здесь еще не достиг галерей. Нет сомнений, что процесс водонасыщения плотины еще будет какое-то время продолжаться.

В 2007 г. в наружных зонах верхней и нижней граней плотины были выбурены керны с применением алмазной сверлильной системы "Седима". Диаметр кернов составил 144 мм, а длина около 40 мм. Результаты измерений влажности бетона по сечениям кернов каждого из четырех участков плотины приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что для всех участков, в том числе и на отм. 537,0 м в верхнем бьефе (ВБ), бетон у наружной грани имеет более низкую влажность по отношению к средней по кернам. Часть кернов подвергалась дополнительному водонасыщению путем медленного погружения в воду, при этом было получено увеличение влажности бетона на 0,77 % на отм. 537,0 м в верхнем бьефе и до 1,55 % на участках с нижней грани. Таким образом, бетон всей нижней грани, а также на верхних отметках зоны переменного горизонта воды в напорном фронте не имеет полного водонасыщения; кроме того, в поверхностных слоях толщиной 5 – 10 см отмечается процесс обезвоживания бетона.

Поровое давление воды. Приборы для измерения порового давления в монолитном бетоне (пьезометры ПДС-10П) устанавливались также по центру секции на высоте 1,5 м от основания бетонизируемого блока. На рис. 3, б показано давление, измеренное на разном расстоянии от напорной грани в секции 28, отм. 434,5 м и в секции 56, отм. 441,5 м. Из рисунка видно, что в период временной эксплуатации сооружения давление воды в бетоне напорного фронта возрастало скачкообразно, особенно это относится к секции 28, а начиная с 1990-х гг. процесс стабилизировался; при этом на обеих отметках в 5 – 5,5 м от НГ давление сохранилось до 2009 г. По приборам, установленным в секциях на линии дренажа и в центре столба (в 13,5 м от НГ), за весь период наблюдений давление не отмечалось.

В секции 56 в 0,5 м от напорной грани (НГ) показано изменение давления, измеренное как в монолитном бетоне, так и в ненапряженном бетонном образце, выделенном в массиве. Как видно из рис. 3, в обоих случаях в последние годы намечалась тенденция к нарастанию давления, что можно

Влажность бетона стенок галерей в ноябре 2009 г.

Отметка галереи, м	Номер секции	Влажность бетона с ВВ $W^{ВВ}$, %	Коэффициент вариации, %	Влажность бетона с НВ $W^{НВ}$, %	Коэффициент вариации, %	$W^{ВВ}/W^{НВ}$	$(W^{ВВ}/W^{НВ})_m$
494,0	18	3,72	6,8	3,73	5,6	1,0	0,95
	25	4,06	6,0	4,96	11,1	0,82	
	33	5,14	11,2	4,79	8,7	1,07	
	45	4,27	11,0	5,12	13,3	0,83	
	48	3,89	5,6	3,75	5,6	1,04	
467,0	18	3,99	6,2	3,86	15,2	1,03	0,99
	33	3,95	6,3	4,45	7,3	0,89	
	48	4,23	9,3	4,03	9,5	1,05	
440,0	18	3,68	5,7	3,25	3,2	1,13	1,11
	28	4,33	11,3	3,78	9,7	1,15	
	31	5,40	14,0	4,62	11,5	1,17	
	33	4,56	11,6	4,02	10,0	1,14	
	36	4,41	15,6	3,81	17,2	1,16	
	48	4,03	6,7	3,79	13,5	1,06	
	54	4,13	7,7	4,38	9,1	0,94	
413,0	18	3,78	9,3	4,24	10,4	0,89	1,10
	23	5,83	12,9	4,40	17,6	1,33	
	28	4,33	12,9	3,99	5,9	1,08	
	33	4,89	8,5	4,05	7,0	1,21	
	48	3,54	16,4	3,64	8,0	0,97	
	50	4,51	14,7	4,06	12,9	1,11	
386,0	18	5,64	11,0	4,51	14,6	1,25	1,11
	28	4,42	7,7	5,12	6,5	0,86	
	33	5,39	18,9	4,54	14,4	1,19	
	48	4,43	11,0	3,90	23,1	1,14	
359,0	18	4,33	13,5	4,77	9,5	0,91	1,13
	33	4,14	17,6	3,44	11,7	1,20	
	48	4,87	12,0	3,82	9,7	1,27	
344,0	18	3,30	4,6	2,98	7,6	1,11	1,16
	33	4,58	12,1	3,91	12,7	1,17	
	48	5,80	9,8	4,87	8,8	1,19	
332,0	18	3,89	5,9	3,30	12,0	1,18	1,16
	33	4,51	20,8	4,07	19,8	1,11	
	48	5,68	14,9	4,76	8,7	1,19	
310,0	18	5,85	16,6	4,75	14,3	1,23	1,20
	23	4,36	18,2	3,73	9,2	1,17	
	33	5,71	13,2	4,79	12,9	1,19	

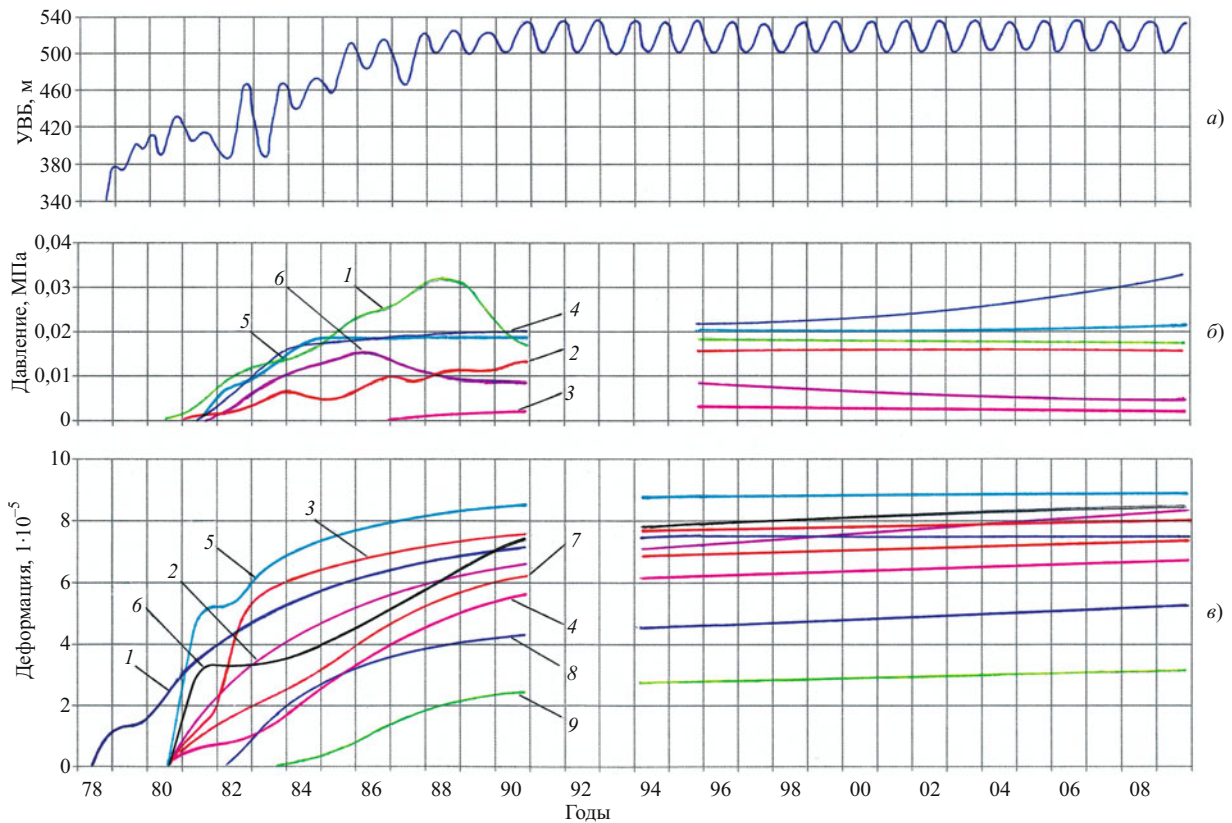


Рис. 3. Уровень воды в водохранилище (а); поровое давление воды в бетоне (б): 1, 2 и 3 — в 0,25; 1,0 и 5,0 м от НГ с 28, отм. 434,5 м; 4, 5 и 6 — в 0,5; 0,5 (к) и 5,5 м от НГ с 56, отм. 441,5 м; влажностные деформации в бетоне (в): 1 — в 0,5 м от НГ с 28, отм. 394,5 м; 2, 3 и 4 — в 1,0; 5,0 и 13,5 м от НГ с 31, отм. 424,5 м; 5, 6 и 7 — в 1,0; 5,0 и 13,5 м от НГ с 28, отм. 434,5 м; 8 и 9 — в 0,5 и 5,5 м от НГ с 56, отм. 441,5 м.

объяснить деструктивными процессами, происходящими в бетоне, а так как в монолитном бетоне давление растет быстрее, можно высказать предположение, что на напорной грани образовалась трещина. Здесь мы не рассматриваем вопросы фильтрации воды через трещины, межсекционные и межблочные швы, которые без сомнения играют важнейшую роль в вопросе водонасыщения бетона плотины. До настоящего времени на низовой грани в зоне строительных швов в арочном поясе плоти-

ны, состоящем из одного столба, при подъеме УВВ в нескольких местах отмечается просачивание воды. В 1990-х гг. таких участков было довольно много, но со временем швы закольматировались, о чем свидетельствуют следы выщелачивания бетона.

Влажностные деформации в бетоне. В сооружении влажностные деформации ϵ_w могут быть определены по двум ненапряженным образцам, выделенным в массиве, находящимся в одинаковых тем-

Т а б л и ц а 2

Влажность бетона в кернах

Участок выбуривания кернов	Влажность W , %, на расстоянии от наружной грани, см								W_m , %	$\frac{W(0-5)}{W_m}$
	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	35 – 40		
ВБ Секция 0, отм. 537,0 м	2,61	3,39	3,74	4,65	4,46	5,10	5,17	4,86	4,25	0,61
НБ Секция 6, отм. 495,0 м	3,37	4,48	5,29	5,16	4,89	5,13	5,21	5,14	4,83	0,70
НБ Секция 10, отм. 414,0 м	3,15	4,07	4,17	4,34	3,90	4,25	4,05	4,17	4,01	0,79
НБ Секция 13, отм. 344,0 м	3,53	4,66	4,81	4,90	5,17	5,16	4,86	4,71	4,14	0,85

пературных условиях: влагоизолированному и невлагоизолированному, оснащенным тензометрами [12].

В невлагоизолированном бетонном образце измеренные деформации могут быть представлены выражением

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{ук}} + \varepsilon_{\text{T}} + \varepsilon_{\text{в}}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\text{ук}}$ — деформации контракционной усадки; ε_{T} — температурные деформации; $\varepsilon_{\text{в}}$ — влажностные деформации.

Во влагоизолированном образце измеренные деформации составят

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\text{ук}} + \varepsilon_{\text{T}}. \quad (4)$$

Тогда влажностные деформации $\varepsilon_{\text{в}}$ определяются как разность деформаций, измеренных в невлагоизолированном и во влагоизолированном бетоне, т.е.

$$\varepsilon_{\text{в}} = \varepsilon - \varepsilon'. \quad (5)$$

Данный способ позволяет определять как деформации набухания $\varepsilon_{\text{н}}$ в подводной зоне напорной грани, так и деформации воздушной усадки $\varepsilon_{\text{у}}$ в зоне низовой грани и надводной зоне напорной грани, но при этом предусматривает выполнение специальных установок КИА в процессе возведения сооружения.

Для изучения набухания бетона в напорном фронте плотины под руководством автора в период строительства в первых столбах перед бетонированием блока устанавливались формы для образцов, которые изготавливались из трубы диаметром 31,5 см и длиной 70 см, толщина стенки трубы составляла 7 мм. Днище формы, а также фланец и крышка для влагоизолированного образца изготавливались из стального листа толщиной 12 мм. Изнутри стенки форм выкладывались пористой резиной толщиной 10–12 мм. В центральной части формы на растяжках устанавливались преобразователи деформаций (тензометры) и температуры (термометры). Форма для негерметичного образца имела аналогичную конструкцию, но в ней отсутствовали фланец, крышка и штуцеры для вывода кабелей. В ряде случаев для повышения достоверности результатов в формы устанавливалось по два тензометра.

В сооружении обе формы устанавливали рядом вертикально на высоте 1,5 м от основания блока, на одном расстоянии от напорной грани с тем, чтобы обеспечить одинаковые температурные условия. При бетонировании блока бетонную смесь, укладываемую в формы, брали из одной бадьи (одного замеса). После уплотнения бетонной смеси крыш-

ку герметичной формы закрывали, используя резиновую прокладку и крепежные болты, и приступали к систематическим наблюдениям за показаниями приборов.

На рис. 3 представлены результаты многолетних наблюдений за влажностными деформациями в напорном фронте плотины. Из графиков видно, что почти во всех случаях набухание бетона у грани началось еще до перекрытия отметки установки приборов водой. Так, в секции 28 на отм. 434,5 м влажностные деформации стали нарастать еще до появления воды на отметке установки приборов и достигли $5,2 \cdot 10^{-5}$ и $3,4 \cdot 10^{-5}$ соответственно в 1,0 и 5,0 м от НГ. Появление влажностных деформаций (набухания) в бетоне до поднятия напора можно объяснить внутренней диффузией, т.е. миграцией влаги от центра к периферии, вызванной градиентом температур “ядро — грань”. Бетон после укладки в блок разогрелся в центре до 33 °С, при этом в зимний период 1981–1983 гг. напорная грань при отсутствии воды остывала и даже промерзала, что и привело к диффузионной миграции влаги. После замедления этого процесса, характеризующегося горизонтальным и даже спадающим участком, т.е. движением влаги в обратном направлении, начался интенсивный рост деформаций, вызванный уже притоком влаги из водохранилища. В 1,0 м от напорной грани к концу 2009 г. процесс набухания практически закончился, при этом влажностные деформации составили $\varepsilon_{\text{в}} = 8,8 \cdot 10^{-5}$, а в 5,0 м от напорной грани $\varepsilon_{\text{в}} = 8,4 \cdot 10^{-5}$.

В секции 56 на отм. 441,5 м набухание бетона стало проявляться только после поднятия УВБ. Этот блок имеет небольшие размеры: высоту 3 м и в плане $15 \times 11,5$ м, поскольку блок примыкает к галерее. Разогрев бетона в блоке был также невелик (менее 18 °С), поэтому внутренней миграции влаги здесь не установлено. Влажностные деформации к концу 2009 г. составили $5,2 \cdot 10^{-5}$ и $3,8 \cdot 10^{-5}$ соответственно в 0,5 и 5,5 м от НГ. Набухание бетона здесь еще какое-то время может продолжиться.

В секции 31 бетонный блок возводился высотой 9 м, при этом, несмотря на работу трубного охлаждения, температура превысила 50 °С, что привело к образованию трещины, прошедшей вдоль потока по оси блока. В блоке устанавливались “рабочие” тензометры в массиве, в том числе было установлено два тензометра (один над другим) в арочном направлении в 5 м от НГ, по которым и прошла трещина. Образовавшаяся в блоке трещина не могла не сказаться на процессе водонасыщения и набухания бетона, особенно в первые годы, когда еще не были зацементированы межсекционные швы, и в течение четырех лет плотина на этих отметках работала как гравитационная, а тензометры показы-

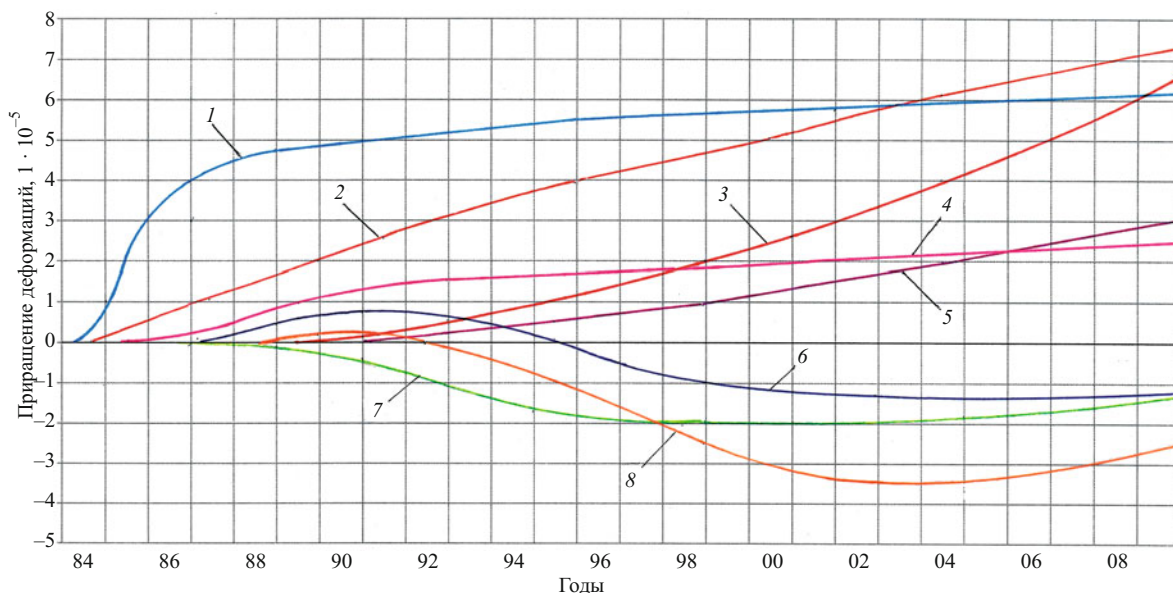


Рис. 4. Приращения влажностных деформаций в “конусах” секции 10 с 1984 по 2009 г: 1 — в 1,4 м от НГ, отм. 435,0 м; 2, 3 — в 45 м от НГ, отм. 435,0 м; 4 — в 1,7 м от НГ, отм. 462,0 м; 5 — в 1,5 м от НГ, отм. 505,0 м; 6 — в 12,7 м от НГ, отм. 534,0 м; 7 — в 25,0 м от НГ, отм. 505,0 м; 8 — в 1,8 м от НГ, отм. 534,0 м.

вали сезонное раскрытие трещины, в 1981 – 1983 гг. составлявшее от 93 до 108 мкм. В 1984 г. раскрытие трещины составило 15 мкм, а в 1985 г. — 3 мкм. С 1986 г. раскрытие трещины уже не происходило, омоноличенная арка под напором воды стала упираться в берега. Влажностные деформации в 5 м от НГ в этих условиях нарастали неравномерно и в результате достигли деформации набухания в 1 м от НГ. В центре блока деформации также близки к деформациям у грани и продолжают нарастать, что свидетельствует о продолжающемся процессе водонасыщения бетона через уже “закрытую” трещину. Дополнительную информацию о влажностных процессах, происходящих в сооружении, можно получить по данным показаний приборов в ненапряженных образцах “конусах”, входящих в состав “тензометрических розеток”.

Деформации, измеренные в “конусе”, согласно выражению (3) являются суммарными — температурно-влажностными. В связи с тем, что температура у грани меняется по квазигармоническому закону с периодом в один год, бетон два раза в год принимает одинаковую температуру. Если снимать показания тензомера в разные годы, но при одной температуре, то температурные деформации будут равняться нулю, а измеренные деформации составят сумму

$$\varepsilon_{и} = \varepsilon_{ук} + \varepsilon_{в} \quad (6)$$

В первые 1 – 1,5 года после укладки бетона в блок постоянно происходит изменение температуры вследствие экзотермии бетона, работы системы трубного охлаждения и т.п. В этот период идет ин-

тенсивная усадка бетона, приводящая к набору прочности. Определение влажностных деформаций, вызванных внешними воздействиями, в таких условиях затруднено, поэтому данный способ позволяет получить только приращения деформаций, начиная с определенного момента. Предложенная методика была апробирована на Саяно-Шушенской ГЭС в период временной эксплуатации сооружения и использовалась при оценке набухания бетона в напорном фронте Красноярской, Зейской и Кировской плотин [13]. По описанной выше методике были обработаны данные многолетних натурных наблюдений показаний приборов в “конусах”, входящих в состав эксплуатационной тензометрической КИА. Всего таких “конусов”, содержащих работоспособные приборы (тензометры и термометры), в плотине Саяно-Шушенской ГЭС к 2010 г. оказалось 149 шт. Поскольку нет возможности привести здесь всю полученную информацию, то ограничимся одной секцией № 10, достаточно полно оснащенной КИА. Она расположена в глухой левобережной части плотины, поэтому не содержит надстроек с верхнего и нижнего бьефов, кроме того, из данной секции на отм. 414,0 м в 2007 г. были выбурены керны. Результаты специальной обработки данных натурных наблюдений по восьми “конусам” представлены на рис. 4, где показаны приращения деформаций за 26 лет, начиная с 1984 г.

У напорной грани в 1,4 м на отм. 435,0 м набухание бетона особенно интенсивно происходило в первые 3 – 4 года, затем процесс замедлился. К концу 2009 г. влажностные деформации $\varepsilon_{в}$ составили $6,2 \cdot 10^{-5}$, что достаточно хорошо согласуется с

результатами, приведенными на рис. 3. На отм. 462,0 м в 1,7 м от НГ ε_w составили $2,4 \cdot 10^{-5}$, но здесь и отметка выше, и бетон на портландцементе, а в первом случае — на ШПЦ, что немаловажно, как выясняется ниже. Также на портландцементе уложен бетон в 1,5 м от НГ, на отм. 505,0 м, где набухание началось позже (отметка еще выше) и продолжается до настоящего времени. На более высоких отметках, где напорная грань на короткое время перекрывается водой, отмечались как усадка (контракционная и воздушная), так и незначительное набухание, особенно в последние годы. Усадку должны показывать и приборы, установленные в “конусах” на расстоянии 45 м от НГ, т.е. 1,5 м от низовой грани на отм. 435,0 м, поскольку, согласно результатам испытания кернов, бетон здесь не имеет полного водонасыщения и даже отмечается подсыхание его у поверхности (табл. 2). Таким образом, набухание бетона в “конусах” у низовой грани плотины вызвано деструктивными процессами, происходящими в бетоне под действием знакопеременных температур. Процесс деструкции бетона стал проявляться и на отм. 534,0 м в 1,8 м от НГ, где до 2003 г. отмечалась “усадка”, а в последние 5 лет отмечается набухание, к концу 2009 г. составившее $1 \cdot 10^{-5}$. Бетон напорной грани в зоне переменного горизонта воды выполнен на портландцементе и имеет марку по морозостойкости F200, в то время как бетон на низовой грани имеет морозостойкость F100 и в большинстве случаев приготавливался на шлакопортландцементе, а по данным лабораторных испытаний контрольных образцов при одной марке более низкую морозостойкость показал бетон на шлакопортландцементе [14].

Нельзя полностью исключить деструкцию бетона и в подводной зоне сооружения, в частности в напорном фронте, где широко использовался шлакопортландцемент. По данным ЦСЛ Красноярск-гэсстроя образцы из бетона на ШПЦ300, хранившиеся в КНХ при постоянной температуре и повышенной влажности, через 5 – 6 лет показали заметное снижение прочности [15], что можно объяснить деструктивным набуханием бетона.

Деструктивное набухание бетона, происходящее в ненапряженном бетоне, проявляется также в поверхностных слоях как напорной, так и низовой грани, о чем свидетельствует снижение прочности в наружных слоях бетона, в частности кернов. Так, испытания образцов под прессом показали, что прочность наружных половинок кернов на 2 – 5 % ниже внутренних. Исследования кернов приборами неразрушающего контроля показали, что в 5 сантиметровом наружном слое кернов бетон имеет прочность на 15 – 21 % ниже средней и это снижение связано с “расшатыванием” структуры относительно свободного бетона у грани при знакопеременной

температуре. В массиве, где бетон находится в условиях сжатия, деструктивное набухание практически отсутствует. Этот вывод имеет важное значение для оценки достоверности определения напряжений в сооружении в соответствии с существующей методикой [16]. Согласно данной методики из деформаций, измеренных в “рабочих” тензOMETРАХ, установленных в массиве, вычитают свободные деформации, измеренные в “конусе”, и полученные значения умножают на модуль упругости бетона E_0 и коэффициент релаксации K_p (при учете ползучести). При этом, естественно, предполагается, что бетон в массиве и “конусе” имеет одинаковые физико-механические характеристики. Испытания бетона Саяно-Шушенской ГЭС М250 и М300, приготовленного на ПЦ400 и ШПЦ300, выполненные в СибНИИГ, показали, что его предельная растяжимость не превышает $11 \cdot 10^{-5}$ [17]. Таким образом, в “конусах” у низовой грани на отм. 435,0 м остаточные деформации в бетоне близки к предельным, т.е. его прочность, а следовательно и модуль упругости близки к нулю. При вычитании из показаний “рабочих” тензOMETРОВ увеличивающихся во времени деформаций набухания в “конусе”, увеличиваются и сжимающие напряжения, как консольные, так и арочные. Рост во времени, в частности, арочных напряжений явился основным аргументом в теории “сближения берегов”.

Из рис. 4 следует, что за 25 лет наблюдений приращения деформаций, вызванных деструкцией бетона, на отм. 435,0 м в среднем по двум “конусам” составили $7 \cdot 10^{-5}$. При модуле упругости $4,3 \cdot 10^4$ МПа (принимаемом в расчетах) прирост напряжений в бетоне составит 2,95 МПа, а за последние 10 лет — 1,48 МПа. Полученные значения напряжений совпадают с данными, приведенными в [18, 19], ошибочно принимаемыми авторами как следствие сближения берегов. Из рис. 4 также видно, что с годами деструктивное набухание бетона в “конусах” только возрастает, и по этой причине значительная часть тензOMETРОВ, установленных в “конусах” в морозостойкой зоне, либо уже вышла из строя, либо работает за пределами диапазона.

Анализ данных измерений деформаций в “конусах”, установленных в различных секциях плотины, показал, что деструкция бетона, изготовленного на портландцементе ПЦ400, начинает проявляться через 9 – 10 лет после его укладки в сооружение, а на шлакопортландцементе (ШПЦ300) — уже через 3 – 4 года.

Контракционная усадка. Набухание бетона, как показано выше, происходит в напорном фронте плотины. Воздушная усадка отмечается в бетоне у низовой грани и в надводной зоне напорной грани, а усадка, связанная с нарастанием прочности бето-

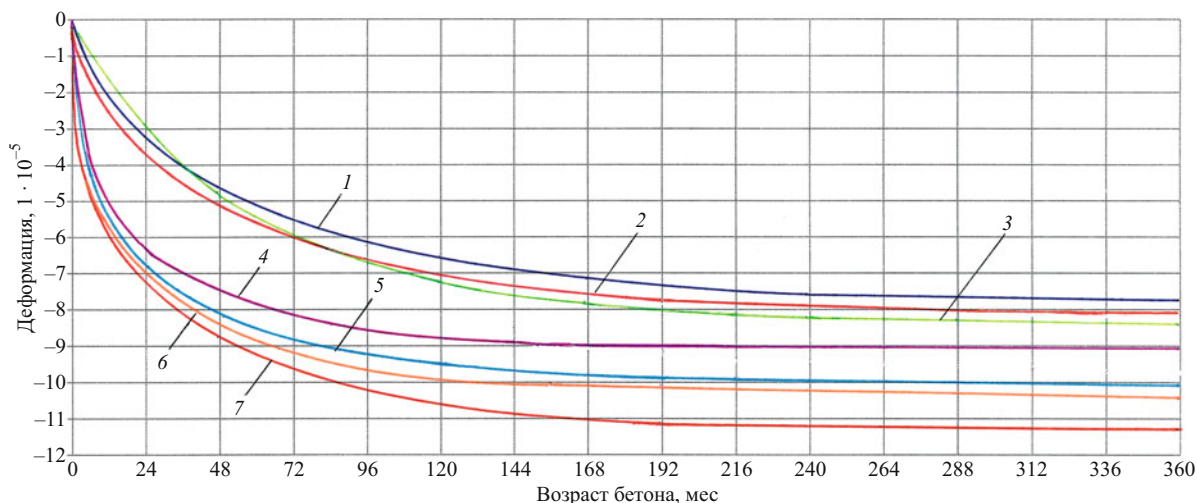


Рис. 5. Контракционная усадка бетона в сооружении: 1, 2, 3 — бетон М250, W8, F100 на ШПЦ300; 4, 5 и 6 — М300, W8, F100 на ШПЦ300; 7 — М300, W8, F100 на ПЦ400

на во времени вследствие гидратации цемента (контракционная усадка), происходит по всему объему плотины. Контракционная усадка изучалась на влагоизолированных образцах, входящих в состав установок для определения влажностных деформаций в бетоне. На рис. 5 представлены результаты измерений деформаций во влагоизолированных образцах за 30-летний период, взятых при одинаковых значениях температур (для одного образца) для бетона М250 и М300.

Для бетона М300, из которого возведена арочная часть плотины выше отм. 467,0 м, деформации контракционной усадки могут быть представлены выражением

$$\varepsilon_{ук} = -(3,62 + 1,18 \ln \tau), \quad (7)$$

где τ — возраст бетона, мес.

Используя полученную зависимость, а также архивные материалы строительного периода, была определена усадка бетона каждой из 66 секций арочного пояса (отм. 518,0 – 521,0 м) с момента укладки до времени цементации межсекционных швов и после цементации на 01.01.2000 г. и на 01.01.2010 г. (табл. 3). Из табл. 3 видно, что после цементации швов за счет контракционной усадки бетона к 01.01.2000 г. арка стала короче на 28,5 мм, а к 01.01.2010 г. — на 34,5 мм.

Элементарный расчет показал, что при неподвижных берегах (опорах арки), а также прочих равных условиях (УВБ, температура в плотине и т.п.) вследствие уменьшения длины арки за время эксплуатации плотина в центральной секции на отм. 521,0 м сместилась в сторону нижнего бьефа на 27,2 и 32,9 мм соответственно на 01.01.2000 г. и на 01.01.2010 г.

Контракционная усадка бетона оказывает влияние на напряженное состояние плотины: различие возраста бетона соседних блоков, разная высота блоков (от 1,5 до 26 м) приводят к неравномерному распределению силовых нагрузок на бетон. Не лучшим решением можно считать и укладку в один блок бетона различных марок. Так, в первые столбы в зоне переменного горизонта воды с верхнего бьефа укладывали бетон М300, W8, F200 содержащий ПЦ400: 275 – 300 кг/м³ (шириной 8 м), а остальная часть блока (19 м) возводилась из бетона М300, W8, F100, содержащего ПЦ400: 250 – 280 кг/м³, или ШПЦ300 в количестве 280 – 305 кг/м³. Из рис. 5 видно, что бетон, содержащий большее количество цемента, дает и большую усадку, в результате чего со временем произошло раскрытие межблочных горизонтальных швов в зоне напорной грани, о чем свидетельствуют показания щелемеров, установленных в сооружении, где в 7 – 7,5 м отмечается раскрытие, достигающее 0,12 мм. Не лучшим образом неоднородная усадка бетона в первых столбах сказалась и на состоянии межсекционных швов.

При оценке напряженно-деформированного состояния плотины нельзя не отметить еще одно обстоятельство. Так, при цементации межсекционных и межстолбчатых швов температура бетона в блоках по проекту должна была находиться в пределах от 2 до 7 °С. Фактически в подавляющем большинстве случаев омоноличивание швов осуществлялось при температуре, близкой к верхнему пределу. За время эксплуатации сооружения температура бетона понизилась приблизительно на 2 °С, что при коэффициенте температурного расширения $1 \cdot 10^{-6}$ в указанном выше арочном поясе (отм. 518,0 – 521,0 м) дало укорочение арки приблизительно на 20 мм. Исходя из вышеизложенного,

Контракционная усадка бетона в первых столбах плотины на отм. 518,0 – 521,0 м

Номер секции	Возраст бетона до цементации швов τ , мес	Усадка Δl , мм			Номер секции	Возраст бетона до цементации швов τ , мес	Усадка Δl , мм		
		до цементации швов	после цементации на 1.01.2000 г.	после цементации на 1.01.2010 г.			до цементации швов	после цементации на 1.01.2000 г.	после цементации на 1.01.2010 г.
1	45,5	1,22	0,27	0,35	34	16,5	1,04	0,42	0,51
2	37,5	1,18	0,30	0,38	35	22,5	1,09	0,37	0,46
3	35,0	1,17	0,28	0,39	36	20,0	1,07	0,39	0,48
4	32,0	1,16	0,32	0,41	37	18,0	1,05	0,41	0,50
5	19,0	1,06	0,40	0,49	38	15,0	1,02	0,44	0,53
6	15,0	1,02	0,44	0,53	39	11,0	0,97	0,49	0,58
7	32,0	1,16	0,32	0,41	40	12,5	0,99	0,47	0,56
8	23,0	1,10	0,37	0,46	41	9,5	0,94	0,51	0,61
9	21,5	1,09	0,38	0,47	42	19,0	1,06	0,40	0,49
10	20,0	1,07	0,39	0,48	43	9,0	0,93	0,52	0,62
11	19,0	1,06	0,40	0,50	44	10,5	0,96	0,50	0,59
12	17,5	1,05	0,41	0,50	45	12,5	0,99	0,47	0,56
13	16,5	1,04	0,42	0,51	46	9,0	0,93	0,52	0,62
14	13,5	1,00	0,46	0,55	47	7,5	0,90	0,55	0,65
15	10,0	0,95	0,51	0,60	48	15,5	1,03	0,44	0,53
16	10,0	0,95	0,51	0,60	49	18,0	1,05	0,41	0,50
17	8,5	0,92	0,53	0,63	50	21,5	1,09	0,38	0,47
18	6,0	0,86	0,59	0,69	51	22,5	1,09	0,37	0,46
19	11,0	0,97	0,49	0,58	52	25,5	1,12	0,35	0,44
20	13,5	1,00	0,46	0,55	53	28,5	1,14	0,34	0,42
21	9,0	0,93	0,52	0,62	54	30,5	1,15	0,33	0,41
22	7,5	0,90	0,56	0,65	55	31,0	1,15	0,33	0,41
23	3,0	0,74	0,71	0,81	56	27,5	1,13	0,34	0,43
24	20,5	1,08	0,39	0,48	57	28,0	1,13	0,34	0,43
25	17,0	1,04	0,42	0,51	58	24,0	1,11	0,36	0,45
26	9,0	0,93	0,52	0,62	59	9,0	0,93	0,52	0,62
27	18,0	1,05	0,41	0,50	60	11,0	0,97	0,49	0,58
28	21,0	1,08	0,38	0,47	61	12,0	0,98	0,48	0,57
29	19,0	1,06	0,40	0,47	62	13,0	1,60	0,46	0,55
30	18,5	1,06	0,41	0,50	63	16,0	1,03	0,43	0,52
31	15,0	1,02	0,44	0,53	64	18,0	1,05	0,41	0,50
32	10,5	0,96	0,50	0,59	65	18,0	1,05	0,41	0,50
33	15,5	1,03	0,43	0,53	66	10,0	0,95	0,51	0,60
						$\Sigma =$	68,0	28,5	34,51

можно сделать вывод, что необратимые перемещения гребня плотины в нижний бьеф с 1991 по 2007 г. в ключевой секции, составившие 44,3 мм [20], могли произойти за счет внутренних физико-механических процессов, происходящих в бетоне. Следует отметить, что после наполнения водохранилища могло происходить сближение берегов в верхнем бьефе, вызванное “разбуханием” скальных массивов под воздействием воды, проникающей в многочисленные трещины.

Влажностные напряжения. По результатам измерений влажности и влажностных деформаций в 1980-х гг. определялись влажностные напряжения в плотине. При определении напряжений плотина рассматривалась как свободная стена, одна боковая грань которой находится в контакте с водой [4]. Расчеты показали, что от набухания бетона на напорной грани плотины возникли сжимающие напряжения до 1,52 МПа, при этом зона сжатия на низких отметках составила около 4 м, а на верхних — 2 – 2,5 м.

Результаты исследований набухания бетона использовались при оценке надежности сооружения в строительно-эксплуатационный период. Учет дополнительных сжимающих напряжений позволил в 1982 г. наполнить водохранилище на 5 м выше планируемого и увеличить годовой объем выработки электроэнергии на 127 млн. кВт · ч.

После омоноличивания (цементации межсекционных швов) плотину в первом приближении можно рассматривать как стену, защемленную между неподвижными берегами. При этом напряжения от набухания бетона можно определить, используя известную зависимость [1]

$$\sigma^w = \varepsilon_w E K_p, \quad (8)$$

где E — модуль упругости бетона; определялся автором по образцам, выделенным в сооружении (секция 31, отм. 424,5 м) в возрасте 1 год, и составил $3,55 \cdot 10^4$ МПа [4]; K_p — коэффициент релаксации напряжений, применяемый для бетона в возрасте до 1 года; по данным ВНИИГ для бетона Саяно-Шушенской ГЭС находится в пределах от 0,5 до 0,8.

Расчеты напряжений, проведенные по измеренным влажностным деформациям (рис. 3, 4), показали, что на напорной грани (в 0,5 м) от набухания бетона возникли сжимающие напряжения от 1,82 (секция 56, отм. 441,5 м) до 2,52 МПа (секция 28, отм. 394,5 м). В обоих случаях набухание бетона произошло после наполнения водохранилища. В секции 28 (отм. 434,5 м) σ^w составили 2,03 МПа, причем до наполнения водохранилища за счет внутренней диффузии влаги напряжения от набухания составили 0,91 МПа. Представляется интерес-

ным установить, какую долю составляют влажностные напряжения в общем напряженном состоянии плотины. На рис. 6 показаны максимальные значения консольных σ_y и арочных σ_z напряжений, определенных по розеткам, установленным в 1,0; 5,0 и 13,5 м от напорной грани секции 31 отм. 424,5 м за период с 1980 по 2009 г. Напряжения определялись по разности деформаций, измеренных “рабочими” тензометрами (σ_y и σ_z) в массиве, и деформаций, измеренных в это же время в ненапряженном бетоне, сообщаемом с окружающим бетоном, в соответствии с методикой [16], а также во влагоизолированном бетоне. Разности напряжений $\sigma_y - \sigma'_y$ и $\sigma_z - \sigma'_z$ с определенной степенью достоверности (модуль упругости в обоих случаях принят одинаковый, а по результатам исследований E водонасыщенного бетона на 5 % ниже) можно считать влажностными напряжениями (σ_{yw} и σ_{zw}), возникшими от набухания бетона. В связи с тем, что в блоке приблизительно через 10 дней после укладки бетона, как отмечалось выше, образовалась вертикальная трещина, прошедшая через “рабочий” тензометр, а до 1983 г. межсекционные швы еще не были зацементированы, в этой зоне вследствие водонасыщения происходило свободное набухание бетона, тензометр показывал растяжение, т.е. $\sigma_{zw} = 0$, что и отражено на графике. После омоноличивания плотины по всем тензометрам отмечалось нарастание напряжений. Из рис. 6 следует, что влажностные напряжения у напорной грани незначительно превышают σ_w в центре первого столба, что объясняется продолжающимся водонасыщением бетона внутренней зоны через закрывшуюся трещину, проходящую по центру секции. На напорной грани за весь период наблюдений напряжения σ_y и σ_z за счет набухания бетона увеличились более чем на 2 МПа. Кроме того, из рисунка видно, что и арочные и консольные напряжения, определенные по существующей методике, по всем “розеткам” постоянно нарастают. В то же время напряжения, вычисленные с использованием влагоизолированного образца, за последние 10 лет практически не изменились. Это обстоятельство дает основание полагать, что рост напряжений в зоне напорной грани в последние годы происходит исключительно за счет набухания бетона.

В заключение следует отметить, что от набухания бетона в напорном фронте должно происходить удлинение (подъем) первых столбов, а также изгиб в сторону нижнего бьефа, однако количественная оценка этих процессов в арочно-гравитационной плотине — задача непростая.

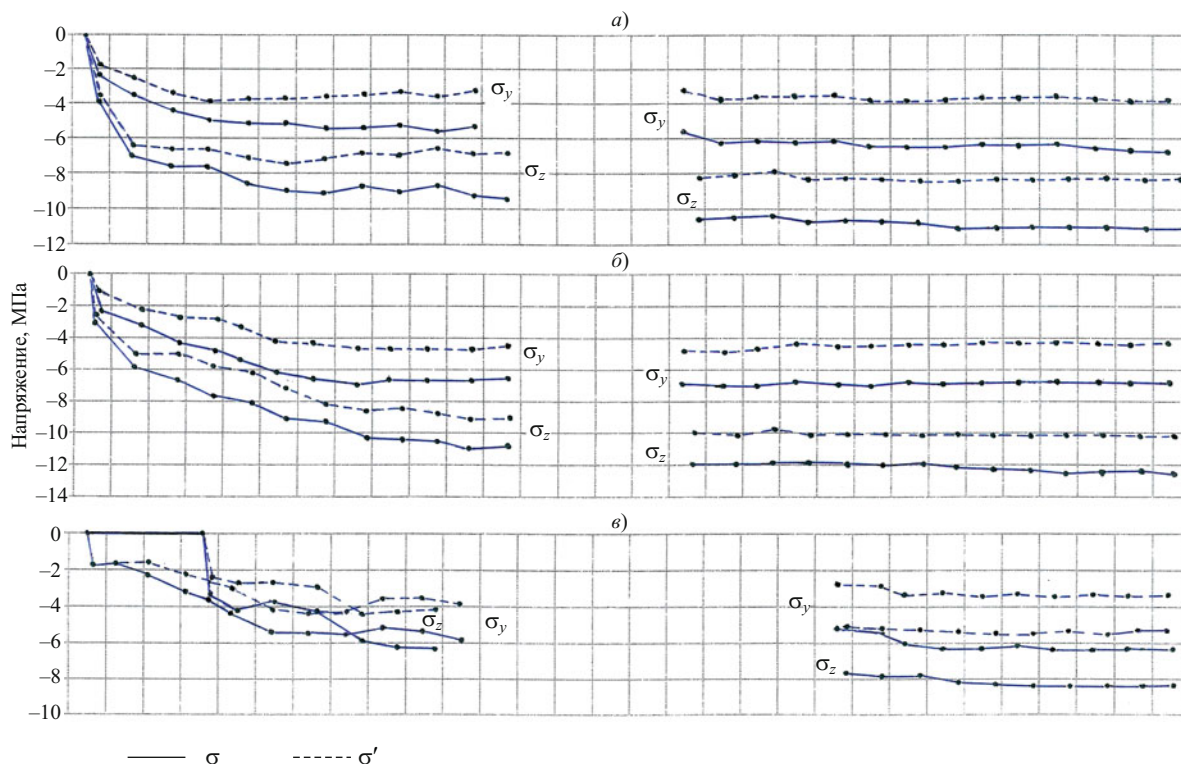


Рис. 6. Консольные σ_y и арочные σ_z напряжения в секции 31, отм. 424,5 м в 1,0; 5,0 и 13,5 м от напорной грани, а, б и в соответственно

Выводы

1. Наблюдения за контрольно-измерительной аппаратурой (КИА), установленной в первых столбах плотины в процессе возведения сооружения, показали, что наиболее интенсивно водонасыщение и набухание бетона в напорном фронте происходили в первые годы после наполнения водохранилища, однако этот процесс продолжается до настоящего времени. К 1987 г. влага в монолитный бетон проникла на глубину до 5,5 м, а максимальное приращение влажности у грани составило 1,6 %.

Поровое давление воды в монолитном бетоне у грани возрастало по мере поднятия УВБ до 1989 г., а затем начало спадать. На расстоянии 5 – 5,5 м от НГ в 2009 г. давление составило 0,007 МПа. На линии дренажа, расположенной в 8,1 м от НГ, за весь период эксплуатации сооружения в монолитном бетоне давления не отмечалось. Несмотря на отсутствие давления в монолитном бетоне процесс водонасыщения плотины продолжился уже диффузионно-капиллярным путем, о чем свидетельствуют результаты инструментальных обследований, выполненных в 2009 г., показавшие, что в галереях на отм. 440,0 м и ниже влажность бетона стенок с верхнего бьефа на 10 – 20 % превышает влажность бетона с нижнего.

Таким образом, за 30 лет эксплуатации сооружения влага проникла до середины первого столба,

и этот вывод подтверждается расчетами, выполненными с использованием коэффициента фильтрации бетона, полученного в натурных условиях.

2. Влажностные напряжения, возникшие от набухания бетона у напорной грани, находятся в пределах от 1,82 до 2,52 МПа и зависят от напора над отметкой установки приборов. В ряде случаев набухание бетона у НГ обнаружено еще до перекрытия отметки водой, что связано с процессом теплопереноса, вызванного сезонным охлаждением напорной грани; максимальные влажностные напряжения бетона у напорной грани от внутренней диффузии составили 0,91 МПа.

3. Исследования деформаций во влагоизолированном бетоне по образцам, выделенным в сооружении, показали, что за счет контракционной усадки, обусловленной гидратацией цемента, после омоноличивания (цементации межсекционных швов) к 2010 г. на верхних отметках плотины вследствие уменьшения длины арки могли произойти необратимые смещения сооружения в нижний бьеф в ключевой секции величиной до 33 мм.

4. Обработка данных многолетних наблюдений за эксплуатационной КИА, установленной в морозостойкой зоне низовой и напорной граней плотины, показали, что в ненапряженных образцах (“конусах”) наблюдается деструктивное набухание бетона, причем для бетона на портландцементе деструкция начинается через 9 – 10 лет, а на шлакопортландцементе — уже через 3 – 4 года по-

сле укладки бетона в блок. Деформации деструктивного набухания постоянно нарастают, приближаясь к предельной растяжимости бетона. Пропорционально нарастают деформации в “конусах” увеличиваются и расчетные значения сжимающих напряжений в плотине, ошибочно принимаемые исследователями как признак “сближения берегов”.

Недостатки существующей методики определения напряжений в бетонных сооружениях, выявленные в результате проводимых исследований, показали необходимость ее уточнения, а данные многочисленных наблюдений за напряженным состоянием плотин требуют соответствующей корректировки.

Список литературы

1. Александровский С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. — М.: Стройиздат, 1973.
2. Александровская Э. К., Логинова В. А., Соколов И. Б. и др. Исследования набухания бетона плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Известия ВНИИГ. 1978. Т. 125. С. 94 – 96.
3. Александровская Э. К. Напряжения в плотине Красноярской ГЭС в период строительства и временной эксплуатации // Гидротехническое строительство. 1974. № 4. С. 19 – 24.
4. Рассказчиков В. А., Соколов И. Б. Методика и результаты определения влажностных напряжений, возникающих в бетонных плотинах после наполнения водохранилища // Известия ВНИИГ. 1982. Т. 155. С. 39 – 44.
5. Рассказчиков В. А. Исследования влажности гидротехнического бетона в сооружениях диэлькометрическим методом // Энергетическое строительство. 1983. № 7. С. 69 – 71.
6. А. с. 894573 (СССР). Устройство для определения деформаций бетона в сооружениях / В. А. Рассказчиков // Открытия. Изобретения. 1981. № 48.
7. ГОСТ 21718-84. Материалы строительные. Диэлькометрический метод измерения влажности. — М.: Издательство стандартов, 1984.
8. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения. — М.: Наука, 1977.
9. Жиленков В. Н. О противодействии в бетонных плотинах // Известия ВНИИГ. 1961. Т. 68. С. 177 – 196.
10. ГОСТ 19426-74. Бетоны: Методы определения коэффициента фильтрации воды. — М.: Издательство стандартов, 1974.
11. Соколов И. Б., Логунова В. Л. Фильтрация и противодействие воды в бетоне гидротехнических сооружений. — М.: Энергия, 1977.
12. А. с. 1429000 (СССР). Способ определения коэффициента фильтрации бетона в напорных сооружениях и устройство для его осуществления / В. А. Рассказчиков // Открытия. Изобретения. 1988. № 37.
13. Соколов И. Б., Епифанов А. П., Рассказчиков В. А. Оценка набухания бетона в напорном фронте плотин // Известия ВНИИГ. 1988. № 204. С. 11 – 17.
14. Дерюгин Л. М., Зинченко Н. А., Моисеенко А. С. Качество бетона плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Энергетическое строительство. 1981. № 7. С. 27 – 28.
15. Дерюгин Л. М. К вопросу оценки прироста прочности гидротехнического бетона в поздние сроки // Энергетическое строительство. 1990. № 4. С. 26 – 28.
16. Рекомендации по наблюдениям за напряженно-деформированным состоянием бетонных плотин / ВНИИГ. Л., 1982.
17. Гаркун Л. М., Лим К. А. Предельная растяжимость бетона Саяно-Шушенской плотины // Труды координационных совещаний по гидротехнике. Бетоны для водопропускных сооружений. — Л.: Энергия, 1980. С. 54 – 56.
18. Газиев Э. Г. Анализ современного напряженно-деформированного состояния арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2010. № 9. С. 48 – 57.
19. Тетельмин В. В. Плотина Саяно-Шушенской ГЭС. Состояние. Процессы, прогноз. — М.: Либком, 2011.
20. Епифанов А. П., Стефаненко Н. И. Из опыта безопасной эксплуатации Саяно-Шушенской арочно-гравитационной плотины // Гидротехническое строительство. 2008. № 11. С. 5 – 10.

Совершенствование методик расчета и конструкций намывных золошлакоотвалов для повышения их эксплуатационной безопасности

Фролов А. Н., инженер (ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»)

Предложены решения по повышению эксплуатационной безопасности намывных золошлакоотвалов с учетом их гидротермического режима. Дана оценка минимальных размеров отстойных прудов и верховой поверхности золошлакоотвалов.

Ключевые слова: золошлакоотвал, надводный откос, отстойный пруд, намыв, верховая поверхность, гидротермический режим, осаждение, осветление, конструктивно-технологические решения.

Гидравлическое удаление золошлаковых отходов с тепловых электростанций (ТЭС) является традиционным способом, который применяется практически на всех электростанциях Российской Федерации, оборудованных пылеугольными энергоблоками. Насосы, другое используемое оборудование при правильном техническом обслуживании обеспечивают достаточно надежное удаление отходов и возврат воды обратно на ТЭС. При поблочной реконструкции электростанций дальнейшее применение способа не требует существенной переделки внутристанционных систем гидрозолоудаления (ГЗУ). Можно прогнозировать на последующие 20 лет, что гидравлический способ будет и дальше использоваться, в том числе в проектах реконструкции ТЭС, с удалением золошлаковых отходов в соотношениях твердой и жидкой фаз, равных Т:Ж $\geq 1:20$ или в виде более высококонцентрированной пульпы.

В этой связи целесообразна модернизация систем гидравлического удаления отходов, конструкций золошлакоотвалов (ЗШО) и технологий намыва. Однако ЗШО намывного типа имеют ряд недостатков и повышенный в 100 раз и более риск аварии (вероятность риска аварии $< 10^{-2}$ 1/год) по сравнению с грунтовыми плотинами. Аварийные ситуации, возникающие на ЗШО, приводят к гидродинамической аварии с разрушением ограждающих дамб и поступлением водозольного потока на прилегающую территорию и к невозможности подачи на сооружение пульпы, возврата с него на ТЭС осветленной воды.

На намывном золошлакоотвале наличие отстойного пруда необходимо для осаждения золы и осветления воды, возвращаемой обратно на электростанцию (рис. 1). В то же время при увеличении площади отстойного пруда и объема воды в нем, особенно при примыкании пруда к ограждающим дамбам, риск гидродинамической аварии существенно возрастает. Например, для ЗШО Каширской ГРЭС при равных отметках уровня отстойного пруда в двух секциях по результатам расчета (проведенного совместно с Д. В. Стефанишиным на осно-

ве параметрической теории риска [1]) получено, что риск аварии при площади пруда 12 га — $0,8 \cdot 10^{-4}$ 1/год, а для секции с площадью пруда 25 га — $3,0 \cdot 10^{-4}$ 1/год.

Таким образом, применение конструкций ЗШО с уменьшенными размерами отстойного пруда приводит к повышению их эксплуатационной безопасности. При этом требуется, с учетом специфических особенностей эксплуатации ЗШО в зимний и другие периоды года, обеспечить на выходе с золошлакоотвала концентрацию золы в воде $c_v \leq c_{\text{доп}}$, где $c_{\text{доп}}$ — допустимая концентрация золы в осветленной воде, обеспечивающая нормальное функционирование оборудования в системе ГЗУ.

Неэффективное осаждение золы на золошлакоотвале является одним из факторов, препятствующих наращиванию сооружения в высоту, так как концентрации золы в воде на выходе с ЗШО $c_v \geq c_{\text{доп}}$ могут привести к засорению и снижению пропускной способности каналов, водоводов водоврата осветленной воды, значительному истиранию побудительных сопел и других элементов внутристанционной системы ГЗУ.

Надводный откос и отстойный пруд, длина которых L_n и $L_{\text{оп}}$ соответственно (рис. 1), огражденные дамбами, в статье обозначены термином: *верховая поверхность*, что по мнению автора, адекватнее терминов *карта намыва*, *чаши накопителя*.

Учет различий в гидротермических режимах ЗШО. По результатам обследований золошлакоотвалов на более чем 20 ТЭС, измерений температуры пульпы и осветленной воды в зимний период, в том числе при экстремально низких температурах воздуха, получено, что на большинстве ЗШО зимой вся его поверхность покрыта снегом, в отстойном пруду образуется лед. Однако на ЗШО ТЭЦ-20 (г. Новгород) и на оперативном ЗШО Игумновской ТЭЦ лед в отстойном пруду практически отсутствовал. Отличия в состоянии верховой поверхности различных золошлакоотвалов в зимний период связаны с дополнительным теплом, поступающим на сооружение с пульпой, величина которого зависит от установленного на ТЭС оборудования. Так, если

на ТЭС установлены котлы с жидким шлакоудалением и мокрые золоуловители, то температура поступающей на золошлакоотвалы пульпы зимой была $t_{\text{п}} > +10^{\circ}\text{C}$.

На основе особенностей эксплуатации золошлакоотвалов в зимний период с минимальными температурами воздуха предложена следующая их классификация по гидротермическому режиму: нетеплонагруженные (холодные), среднетеплонагруженные, теплонагруженные (теплые) [2]. Подобным образом, по гидротермическому режиму золошлакоотвалов, можно классифицировать оборотные системы ГЗУ, а также варианты гидравлического складирования: в оперативный и основной ЗШО, раздельное золо- и шлакоудаление, намыв высококонцентрированной пульпой.

Для оценки гидротермического режима предложены величины степени теплонагруженности q и критерия термического состояния η :

$$q = S_{\text{п}}^{\text{кк}} / (F_{\text{нр}} + F_{\text{оа}}),$$

$$\eta = 1 + t_{\text{о}}^{\text{нс}} / (t_{\text{п}}^{\text{кк}} + t_{\text{о}}^{\text{нс}}) \text{ при условии } \text{Т:Ж} \geq 1:20,$$

где $S_{\text{п}}^{\text{кк}}$ — тепловой поток, поступающий на ЗШО с пульпой; $F_{\text{нр}}$ — площадь русловых потоков пульпы на надводном откосе; $F_{\text{оа}}$ — площадь активной зоны отстойного пруда; $t_{\text{п}}^{\text{кк}}$, $t_{\text{о}}^{\text{нс}}$ — температуры, $^{\circ}\text{C}$, поступающей пульпы и осветленной воды на выходе с ЗШО.

При глубинах отстойного пруда 1 – 1,5 м (максимально до 2 м около водосбросного колодца) золошлакоотвал нетеплонагруженного типа характеризуется $q < 100 \text{ Вт/м}^2$ и $\eta < 1,1$, а для ЗШО теплонагруженного типа — $q > 400 \text{ Вт/м}^2$, $\eta > 1,3$.

Гидротермический режим ЗШО оказывает влияние на состояние его конструктивных элементов [3]. Зимой, если теплый русловой поток или отстойный пруд примыкает к ограждающей дамбе, то часть низового откоса, а также участок около дренажных канав могут находиться в талом состоянии. На ЗШО нетеплонагруженного типа подвижка льда может привести к разрушению колодца, что невозможно из-за отсутствия льда на ЗШО теплонагруженного типа. Поэтому для теплонагруженного ЗШО, помимо водосбросного колодца, водоотведение может быть организовано с использованием сифонного водосбросного устройства, плавучей насосной станции.

Определение гидротермического режима позволяет при проектировании намывного ЗШО и систем ГЗУ выполнять необходимые расчеты и для повышения безопасности эксплуатации применять соответствующие конструктивно-технологические

решения. При этом расчеты различных параметров сооружения в зимний и другие периоды года рекомендуется производить по известным методикам, но с учетом различий в гидротермическом режиме. Например, испарение с теплонагруженного ЗШО рассчитывается по зависимостям с незамерзающих водоемов и с водоемов, в которых температура воды на 5°C и более выше, чем температура воздуха, а испарение с поверхности ЗШО нетеплонагруженного типа — по формуле ГГИ [4]. Следствием увеличения испарения на ЗШО теплонагруженного типа, расположенных в зонах с избыточным увлажнением, является то, что их водный баланс отрицателен. Соответственно, если не добавлять дополнительный объем воды в оборотную систему ГЗУ, то уровень отстойного пруда будет постепенно понижаться.

Выявлено, что в зимний период более эффективная и надежная эксплуатация ЗШО и системы ГЗУ осуществляется, если температура пульпы $t_{\text{п}}^{\text{кк}} > 5^{\circ}\text{C}$, в пруду имеет место повышенная температура воды ($t_{\text{оп}} > 2^{\circ}\text{C}$). Поэтому для уменьшения теплообмена с поверхности ЗШО и, соответственно, повышения гидротермического режима ЗШО в зимний период могут быть применены следующие мероприятия: уменьшение длины надводного откоса, в том числе намыв “под лед”; устройство котлованов на надводном откосе; уменьшение размеров секции (карты намыва) или отстойного пруда; подача дополнительных объемов теплой воды на ЗШО или в систему ГЗУ; применение теплоизолирующих покрытий; растворение в пульпе веществ, понижающих температуру замерзания воды; повышение температуры пульпы путем применения сгустителей, других устройств по сокращению количества жидкой фазы; теплоизоляция пульпопроводов, элементов системы возврата осветленной воды и внутристанционной системы ГЗУ (каналов, водоводов и др.).

Из вышеперечисленных мероприятий наиболее эффективны уменьшение длины надводного откоса, отстойного пруда и размеров секции ЗШО.

В северных регионах может быть целесообразно увеличение теплообмена с золошлакоотвала (понижение гидротермического режима). Для этого рекомендуются создание на надводном откосе направляющих, поперечных валов из золы и шлака, котлованов; увеличение пути движения транзитного потока в пруду; схема складирования с основным сооружением мерзлого, нетеплонагруженного типа, при поступлении пульпы в который с оперативного ЗШО талого типа не будет оттаивания основания ограждающих дамб.

На конечной стадии заполнения ЗШО или при невозможности в зимний период намыва такого надводного откоса, чтобы отстойный пруд не при-

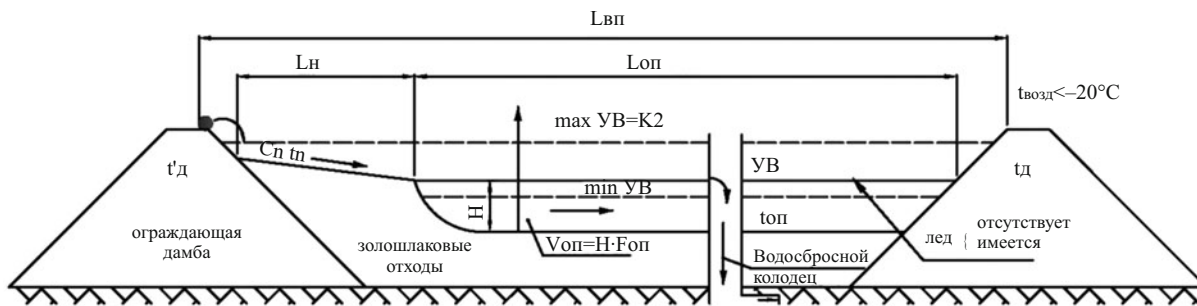


Рис. 1. Схема намыва золошлакоотвала с примыканием отстойного пруда к ограждающей дамбе

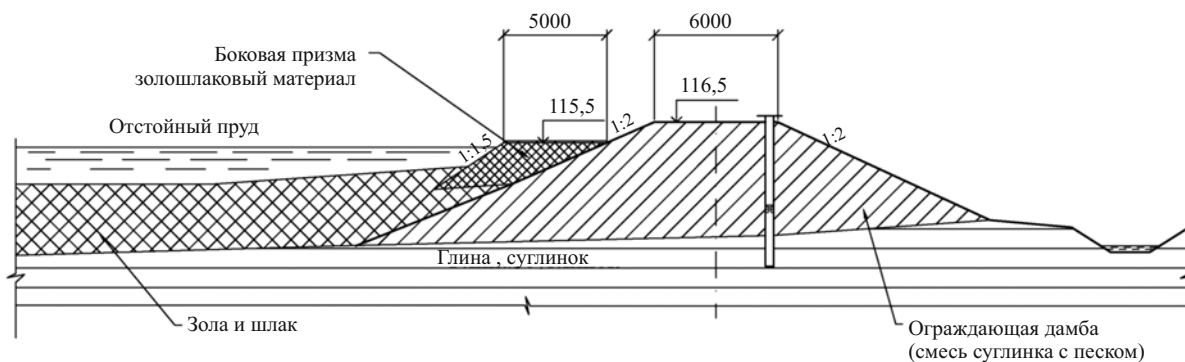


Рис. 2. Боковая призма у верхового откоса ограждающей дамбы золошлакоотвала

мыкал к верховому откосу ограждающих дамб по всему периметру, предлагается отсыпать из золошлаковых отходов дополнительную боковую призму (рис. 2). При устройстве боковой призмы отстойный пруд удаляется от дамбы, при этом понижается кривая депрессии и вероятность развития трещины отслаивания по контакту талой и мерзлой зон в теле дамбы с её последующим размывом потоком воды, исключается волновое воздействие на дамбу.

Согласно расчету ширины призмы в 5 м достаточно, чтобы снизить в теле дамбы, выполненной из суглинка, кривую депрессии на 0,9 м ниже глубины сезонного промерзания $h_{\text{пром}}$, в месте подхода пруда к верховому откосу. Подобная призма на эксплуатируемом ЗШО Каширской ГРЭС отсыпалась вдоль откоса послойно пионерным способом с автомашин, уклон откоса призмы — естественный.

Назначение минимальных размеров отстойного пруда и верховой поверхности секции золошлакоотвала. Размеры отстойного пруда и верховой поверхности секции ЗШО определяются расчетом по методикам осаждения золы в русловых потоках на надводном откосе и осветления воды от частиц золы в отстойном пруду. Для определения эффективности осаждения (осветления) золы на ЗШО при его эксплуатации в безморозный период методики расчета предложены В. Г. Пантелеевым и Э. Л. Добкиным [5]. Данные методики могут использоваться и при расчетах эффективности осаж-

дения золы в зимний период на ЗШО теплонегруженного типа.

В результате исследований, выполненных зимой на золошлакоотвалах нетеплонегруженного типа, получено, что эффективность осаждения золы кузнецкого угля в русловых потоках на надводном откосе по сравнению с безморозным периодом меньше (рис. 3). В основном повышение концентрации золы в русловом потоке на урезе отстойного пруда происходит вследствие протекания пульпы в жестком русле (наледи, промерзшем ложе).

Концентрацию зольных частиц в русловом потоке на урезе отстойного пруда в зимний период предлагается определять по зависимости (при $X = L_p; L_p w_{50} / h v > 1$)

$$c_{\text{зим}} = 0,97 c_{\text{и}} \exp \left[-0,04 \left(\frac{L_p w_{50}}{h v^*} \right)^{0,5} \right], \quad (1)$$

где $c_{\text{и}}$ — концентрация золы в русловом потоке в месте выпуска пульпы на ЗШО, мг/л; L_p — длина русла от места выпуска до уреза, м; w_{50} — гидравлическая крупность частиц диаметром d_{50} в спокойной воде, температура которой равна температуре потока, м/с; h — глубина потока, м; v^* — динамическая скорость, м/с.

Концентрация золы в русле на урезе отстойного пруда зимой на ЗШО нетеплонегруженного типа,

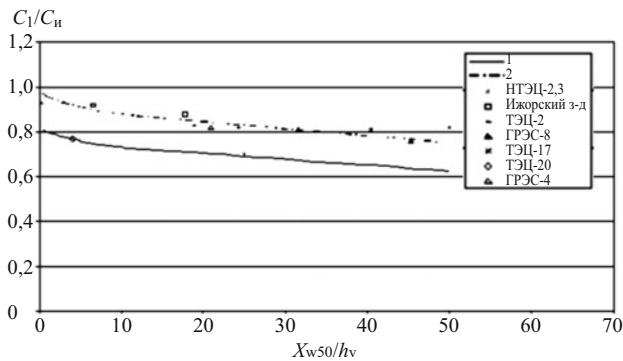


Рис. 3. Изменение относительной концентрации золы в русловых потоках на ЗШО в зимний и безморозный периоды:

1 — средненные данные В. Г. Пантелеева; 2 — аппроксимирующая зависимость результатов измерений зимой; $c_1/c_{и}$ — отношение концентраций золы в русловом потоке и в месте выпуска пульпы, результаты: для ЗШО ТЭЦ-20 теплонагруженного типа — зимний период, ЗШО НТЭЦ-2,3 — безморозный период (зола кузнецкого угля)

если одинаковы другие расчетные параметры, больше, чем в безморозный период: $c_{зим} \geq 1,12c_{лет}$.

На основе рассмотрения гидродинамической схемы взаимодействия транзитного потока с дном отстойного пруда ЗШО нетеплонагруженного типа и поверхностью льда (по аналогии с решением, изложенным для открытого потока в [6]) были получены зависимости расширения транзитной струи в потоке и изменения скорости потока вследствие образования льда. Рассматривалась упрощенная схема, так как не учитывалось изменение по длине пруда плотности, температуры потока и шероховатостей поверхностей льда и дна, движение транзитного потока под свободно плавающим льдом принималось за пределами начального участка плавно изменяющимся. Отметим, что при использовании подобного подхода не удалось получить адекватные натурным данным зависимости, когда транзитные потоки протекали вдоль верхового откоса ограждающих дамб ЗШО (вдольбереговые).

Так как в зимний период количество русел на надводном откосе нетеплонагруженного ЗШО сокращается, как правило, до одного, то расход потока, втекающего в отстойный пруд зимой, приблизительно в 2 раза больше, чем расход потока, протекающий по основному руслу в безморозный период. Тогда из полученных зависимостей скорость потока в зимний период $v_{зим}$ на расстояниях x от уреза пруда, больших 70 – 100 м (за пределами начального участка) может быть определена как

$$v_{зим} = 2v_{лет} \frac{b_{0лет} h_{0лет}}{b_{0зим} h_{0зим}} \cdot \frac{H_{лет}}{H_{зим}} \frac{1}{\exp\left(\frac{\lambda_{л}}{2H_{зим}} x\right)}, \quad (2)$$

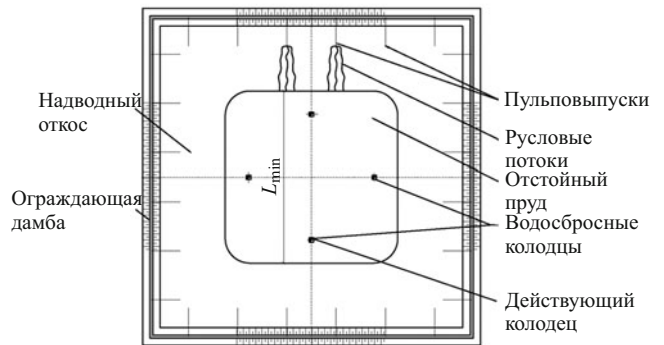


Рис. 4. Конструкция золошлакоотвала с четырьмя колодцами

где $v_{лет}$ — скорость потока летом, м/с; b_0, h_0 — ширина и глубина потока в месте втекания в отстойный пруд в летний и зимний периоды соответственно, м; $H_{лет}, H_{зим}$ — глубина отстойного пруда в летний и зимний периоды, м; $\lambda_{л}$ — коэффициент гидравлического трения нижней поверхности льда.

Расхождение расчетов, выполненных по формуле (2), и по ширине транзитного потока $b = f(x)$ с результатами натурных измерений на ряде ЗШО было порядка $\pm 20\%$.

Из формулы (2) следует, что скорости потока зимой уменьшаются по сравнению с летним периодом, однако из-за промерзания отстойного пруда они могут быть сопоставимы по величине ($v_{зим} \leq v_{лет}$). Таким образом, фиксируемое на многих ЗШО ухудшение осветления воды в зимний период происходит из-за промерзания пруда и неэффективного осаждения золы на надводном откосе. Кроме того, максимум объемов поступающих на золошлакоотвал с ТЭС отходов приходится на зимний период. Например, на ЗШО Южно-Кузбасской ГРЭС в зимний период 2009/10 г. намывалось золошлаковых отходов среднемесячно в 2,5 раза больше, чем в безморозный период 2009 г.

На основе выполненных исследований оказалось возможным сопоставить результаты расчетов по осаждению золы для зимнего и безморозного периодов эксплуатации ЗШО. Расчеты выполнялись при условиях, что на ЗШО поступает пульпа расходом $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$ с соотношением твердой и жидкой фаз 1:20 (50 г/л), а допустимая величина концентрации золы в осветленной воде $c_{в} = 240 - 250 \text{ мг/л}$ (в оборотной системе ГЗУ установлены насосы типа Д, ЦН). Сжигаемый на ТЭС уголь — кузнецкий или экибастузский, зола с электрофильтров на выпуске из пульпопровода имеет средний диаметр $d_{50} = 0,05 \text{ мм}$. Частицы данных зол по сравнению с золами от сжигания других углей наиболее плохо осаждаются в воде; соответственно, полученные значения длин отстойного пруда ($L_{оп}$) являются максимальными. Учитывались стесненное осаждение золы в отстойном пруду, на участке

от уреза воды и свободное осаждение золы, когда её концентрация в транзитном потоке была меньше 10 г/л.

В расчетах задавались различные длины надводного откоса L_n , определялись длина отстойного пруда $L_{оп}$ и длина всей верховой поверхности ЗШО $L_{вп}$. При назначении минимальной длины надводного откоса $L_n = 50$ м учитывались результаты расчетов устойчивости ограждающих дамб в случае возведения ЗШО на максимальную высоту. Результаты расчетов, если на ТЭС сжигается кузнецкий уголь, приведены в таблице.

Из расчетов следует: наихудшие условия осаждения золы в отстойном пруду могут быть при температуре воды, близкой к температуре её замерзания в осенний (весенний) период, вследствие уменьшения скорости осаждения частиц в воде.

Эффективность осаждения золы на надводном откосе в несколько раз меньше, чем в отстойном пруду. При увеличении длины осаждения золы кузнецкого угля на надводном откосе с 50 до 600 м сокращение длины отстойного пруда может составить только 26 м. Соответственно, уменьшение площади верховой поверхности ЗШО целесообразно путем проведения специальных мероприятий по повышению эффективности осаждения (осветления) в первую очередь в отстойном пруду.

По результатам расчетов минимальные размеры отстойного пруда в случае примыкания колодцев к дамбе составляют 350×350 м. Если колодцы расположены в центре секции, то минимальные размеры пруда — 700×700 м. При минимальных размерах пруда площади верховой поверхности ЗШО — 16 га и 56 га (колодцы у дамбы или в центре).

Глубину отстойного пруда в зимний период $H_{зим} = 1,0$ м предлагается назначать в качестве критерияльных значений минимального (предупреждающего К1) уровня воды, тогда минимальные объ-

емы воды, которые необходимо иметь в ЗШО для обеспечения эффективного осветления, при принятых в расчетах условиях будут 120 и 460 тыс. м³ (колодцы у дамбы или в центре).

Относительно малые расчетные размеры отстойных прудов золошлакоотвалов были получены вследствие того, что: 1) допустимые концентрации золы в осветленной воде обоснованы исходя из обеспечения нормального функционирования оборудования в системе ГЗУ; 2) происходит естественная коагуляция осаждаемых в пруду частиц; 3) минимальные фракции различных зол имеют размеры более 5 мкм. Дополнительным фактором является установка на большинстве ЗШО шандорных колодцев, свободное истечение в которые происходит из поверхностного слоя пруда. Подобное водоотведение рекомендуется и при проектировании, реконструкции сооружений нетеплонагруженного типа.

Конструктивно-технологические решения по уменьшению площади и объема отстойного пруда, по эффективному заполнению поверхности ЗШО. В статье [7] по результатам проведенного анализа затрат получено, что решения по минимизации площади отстойного пруда на золошлакоотвале могут быть экономически эффективны в основном вследствие увеличения емкости складирования. Также может быть целесообразно устройство дополнительных сооружений и конструкций для доочистки воды от частиц золы за пределами ЗШО, в системе возврата осветленной воды на ТЭС.

По результатам расчетов осаждения золы в различные периоды года целесообразно разделить верховую поверхность ЗШО, при выходе отходов с ТЭС в объеме до 500 тыс. т в год, на отдельные секции площадью от 20 до 60 га. Наличие двух и более секций позволяет уменьшить общий объем воды на ЗШО, сократить площадь пыления с надводного откоса. Дополнительно обеспечивается резервирование (уменьшается риск функционального отказа) и, при необходимости, намыв переключается на другую секцию.

Из специальных решений [8], позволяющих уменьшить площадь, объем отстойного пруда и повысить эффективность осветления воды на устройствах водоотведения, для использования на ЗШО рекомендуются: управление намывом и водоотведением, устройство в отстойном пруду грунтовых струенаправляющих дамб.

В первом случае необходимое осветление достигается последовательным включением выпусков пульпы и отводом воды из колодцев, установленных таким образом, чтобы длина пути осаждения золы в пруду была максимальной. Кроме того, следует более эффективно использовать площадь пруда путем организации нескольких транзитных потоков, например для отвода воды одновременно

Результаты расчетов длины отстойного пруда и верховой поверхности ЗШО

Период	$t_n, ^\circ\text{C}$	$t_{оп}, ^\circ\text{C}$	$L_n, \text{м}$	$c_0, \text{г/л}$	$L_{оп}, \text{м}$	$L_{вп}, \text{м}$
Лето	25	20	50	40,6	245	295
Лето	25	20	100	35,4	242	342
Лето	25	20	600	27,1	219	819
Осень	5	2	50	41,2	296	346
Зима	3	1	50	46,0	258	308
Зима	3	1	100	42,1	257	357

Примечание. $t_n, t_{оп}$ — температуры пульпы, поступающей на ЗШО, и отстойного пруда, принятые в расчетах; c_0 — концентрация золы на урезе пруда

применять два или более колодца. При расположении отстойного пруда в центре секции для уменьшения его размеров предложено устанавливать четыре водосбросных колодца с каждой стороны пруда (рис. 4). Размеры пруда определяются по допустимой эффективности осветления от места выпуска пульпы до наиболее дальнего колодца [9]. Такое использование колодцев позволяет сократить площадь пруда в 2 – 3 раза по сравнению с конструкцией, в которой колодцы устанавливаются в центре пруда.

Устройство струенаправляющих дамб позволяет увеличить путь транзитного потока в отстойном пруду. Подобное решение может использоваться на эксплуатирующихся ЗШО путем отсыпки из золошлаковых отходов пионерным способом одной, двух струенаправляющих дамб.

Из специальных решений [8], повышающих эффективность управления намывом и осаждением золы на надводном откосе, рекомендуются: рассредоточенная подача пульпы; намыв с технологических, дополнительных дамб, отсыпаемых на откосе пионерным способом из золошлаковых отходов; устройство вблизи выпусков пульпы направляющих валов (из золы, шлака) для равномерного замыыва откоса; разработка в летний период на откосе котлованов-отстойников для более эффективного осаждения золы в зимний период.

В соответствии с результатами исследований движения русловых потоков на надводном откосе и транзитных потоков в отстойном пруду рассредоточенную подачу пульпы (на нетеплоагрессивном ЗШО в бесснежный период, на теплоагрессивном ЗШО во все периоды года) рекомендуется производить из торцевых выпусков, устанавливаемых на расстоянии порядка 70 м.

Выводы

Намывные золошлакоотвалы вследствие поступления с пульпой дополнительного тепла могут в зимний период иметь различный гидротермиче-

ский режим, что надо учитывать при их проектировании и эксплуатации.

Для повышения эксплуатационной безопасности определены минимальные размеры отстойного пруда и секции золошлакоотвала, предложены конструктивно-технологические решения по уменьшению размеров пруда и эффективному заполнению верховой поверхности ЗШО.

Перспективно, с учетом климатических условий характерных для различных регионов России, дальнейшее совершенствование конструкций золошлакоотвалов, в том числе с разделением их на секции оптимальных размеров, создание эффективных систем гидравлического удаления.

Список литературы

1. Беллендир Е. Н., Ивашинов Д. А., Стефанишин Д. В., Финягинов О. М., Шульман С. Г. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. В 2-х томах. — СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2003, 2004.
2. Пантелеев В. Г., Фролов А. Н. Классификация термического режима намывных сооружений в зимний период эксплуатации // Гидротехническое строительство. 1990. № 1. С. 31 – 34.
3. Фролов А. Н., Зайцева И. В. Новые технологии сжигания твердого топлива и проблемы при удалении и складировании золошлаковых отходов // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2010. Т. 260. С. 86 – 97.
4. Рекомендации по расчетам водного баланса крупных озер и водохранилищ. — Л.: Гидрометеиздат, 1989.
5. Золошлаковые материалы и золоотвалы // Пантелеев В. Г., Мелентьев В. А., Добкин Э. Л. и др. / Под ред. В. А. Мелентьева. — М.: Энергия, 1976.
6. Знаменский В. А. Гидрологические процессы и их роль в формировании качества воды. — Л.: Гидрометеиздат, 1981.
7. Фролов А. Н. Влияние эффективности осветления воды в пруду-отстойнике на выбор оптимальной системы ГЗУ // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1989. Т. 217. С. 60 – 65.
8. Фролов А. Н. Уменьшение размеров отстойного пруда с целью повышения эксплуатационной безопасности золошлакоотвалов // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2011. Т. 262. С. 91 – 99.
9. Пат. на полезную модель № 101460. Намывное сооружение / Фролов А. Н., Зайцева И. В. // Бюллетень изобретений. 2011. № 2.

Оценка влияния ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище на энергетические показатели работы гидроэлектростанций

Александровский А. Ю., доктор техн. наук, Хасянов С. В. инженер
(Национальный исследовательский университет "МЭИ")

Рассматривается влияние ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище на энергетические показатели работы гидроэлектростанции на примере Саяно-Шушенской ГЭС. Определяется изменение энергетических показателей работы Красноярской ГЭС при использовании этих ограничений на Саяно-Шушенской ГЭС.

Ключевые слова: ГЭС, безопасность гидротехнических сооружений, энергетические показатели

Безопасность гидротехнических сооружений (ГТС) гидроузла, населения и хозяйственных объектов, расположенных в долине реки ниже по течению, окружающей среды, а также надежность функционирования электроэнергетического объекта в значительной мере определяются режимом использования водных ресурсов водохранилища.

Характеристика динамики изменения уровня воды в водохранилище — скорость повышения или снижения горизонта в расчетном интервале времени в диспетчерских графиках не регламентируется. Однако эта характеристика имеет важное и часто определяющее значение для безопасности гидротехнических сооружений.

Колебания уровня воды водохранилища в процессе его эксплуатации сопровождаются перестройкой напряженно-деформированного и фильтрационного состояния массива основания. При быстрой сработке водохранилища в массиве могут возникать зоны избыточного давления, в которых развиваются процессы разрушения массива. При этом разрушение происходит за счет прорастания крупных проницаемых трещин, в то время как концентрация маленьких трещин может остаться прежней [1].

Также быстрое наполнение или понижение уровня воды может неблагоприятно сказываться на положении кривой депрессии насыпной (намывной) плотины и берегов, что приводит к снижению безопасности ГТС.

В результате возникновения явлений, оказывающих отрицательное воздействие на безопасность ГТС, возникает необходимость использования определенных ограничений при назначении режимов работы водохранилища.

Следует иметь в виду, что при расчете пропускных максимальных расходов расчетной вероятности превышения ограничения по скорости наполнения водохранилища учитываются, однако эти ограничения не распространяются на весь годовой период времени.

Применение ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище приводит к изменению режима работы водохранилища и, как следствие, к изменению режима работы гидроэлектростанции [2]. В свою очередь, изменение режима работы станции, расположенной выше по течению реки, может оказать влияние на режим работы нижерасположенных станций.

В настоящей статье рассмотрим влияние ограничения по скорости изменения уровня воды в водохранилище на энергетические показатели работы гидроэлектростанции на примере Саяно-Шушенской ГЭС, а также оценим последствия применения этого ограничения на аналогичные показатели работы Красноярской ГЭС.

Саяно-Шушенский гидроэнергетический комплекс помимо регулирования стока преимущественно в энергетических целях, используется для нужд водного транспорта, коммунального хозяйства и срезки максимальных расходов воды для предотвращения наводнений. Проектная установленная мощность СШГЭС составляет 6400 МВт ($10 \cdot 640$ МВт), среднегодовая выработка электроэнергии — 23,5 ТВт · ч. Гидроэлектростанция является первой ступенью Енисейского каскада ГЭС, в который также входят Майнская и Красноярская ГЭС.

Устойчивость и прочность плотины Саяно-Шушенской ГЭС обеспечиваются не только действием собственного веса (60 %), но и работой верхнего арочного пояса передающего нагрузки на скальные берега (40 %), а следовательно, прочностью основания и устойчивостью примыкания плотины.

В конце 2011 г. было завершено строительство на правом берегу реки берегового водосброса, основным назначением которого является снижение нагрузок на водобойный колодец. Максимальная пропускная способность берегового водосброса составляет 4000 м³/с.

Проектная отметка нормального подпорного уровня (НПУ) — 540 м, форсированного подпорного уровня — 544,5 м. После завершения ремонтных

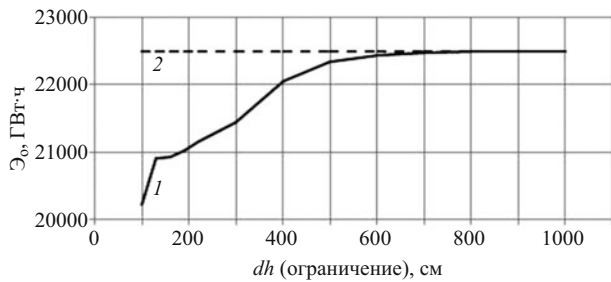


Рис. 1. Изменение среднегодовой выработки Саяно-Шушенской ГЭС в зависимости от ограничения по скорости изменения уровня воды в водохранилище: 1 – при работе ГЭС с ограничениями, 2 – при работе ГЭС без ограничений

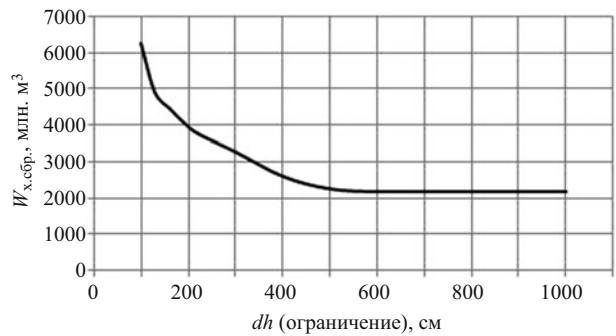


Рис. 2. Изменение среднегодового объема холостых сбросов Саяно-Шушенской ГЭС в зависимости от ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище

работ в теле плотины (1997 г.) отметка НПУ была снижена до 539 м, а ФПУ — до 540 м. После аварии 17 августа 2009 г. на период восстановления гидроэлектростанции отметка верхнего бьефа не должна превышать 536 м.

Площадь водосбора бассейна реки составляет 179 900 км². Среднегодовой сток в створе — 46,7 км³.

Водоохранилище Саяно-Шушенской ГЭС — сезонного регулирования; полный объем — 31,3 км³, полезный — 15,3 км³; длина — 320 км и площадь — 621 км².

Саяно-Шушенская ГЭС используется для регулирования мощности в объединенной энергосистеме Сибири. Согласно проектной документации, Саяно-Шушенский гидроэнергетический комплекс в энергообъединении выполняет следующие функции:

выдачу в систему активной и реактивной мощности и энергии;

частотный резерв мощности и аварийный резерв системы.

В настоящее время недостаточная пропускная способность электрических сетей не позволяет полностью использовать мощность Саяно-Шушенской ГЭС в энергосистеме.

Ниже приведены результаты водноэнергетических расчетов по оценке влияния ограничения по скорости изменения уровня воды в водохранилище на энергетические показатели работы Саяно-Шушенской ГЭС для двух вариантов. Первый вариант соответствует работе станции в условиях недостаточной пропускной способности линий электропередач. В этом варианте максимальная мощность станции составляет 4000 МВт. В качестве второго варианта рассматривалось использование проектной установленной мощности станции 6400 МВт.

Для оценки влияния ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище были выполнены водохозяйственные и водноэнергетические расчеты, в результате которых были получены показатели работы гидроэлектростанции при раз-

личных значениях ограничений. В качестве показателей работы гидроэлектростанции приняты: $N_{\text{гар}}$ — гарантированная зимняя мощность ГЭС обеспеченностью 90 %; \mathcal{E}_0 — среднегодовая выработка электроэнергии; $W_{\text{х.сбр.}}$ — среднегодовой объем холостых сбросов. Расчеты выполнялись подекадно по гидрологическому ряду наблюдений за стоком с 1903 по 2005 г.

В качестве правил управления водными ресурсами водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС использовались действовавшие правила. Если режим работы по диспетчерскому графику нарушал требования по ограничению скорости изменения уровня воды в водохранилище, то водо- и энергоотдача ГЭС корректировались с учетом этих ограничений. Расчеты выполнялись по разработанной в МЭИ программе “Каскад” [3].

Ограничения по скорости изменения уровня воды в водохранилище при сработке устанавливались в декабре, январе, феврале, марте и апреле. Ограничения по скорости изменения уровня воды в водохранилище при наполнении устанавливались в

Ограничение dh на Саяно-Шушенской ГЭС, см	\mathcal{E}_0 , млн. кВт · ч	$N_{\text{гар}}$, МВт
100	16 943	621
200	17 002	853
300	17 025	863
400	17 087	865
500	17 123	865
600	17 151	865
700	17 164	871
800	17 164	872
900	17 164	872
1000	17 164	872

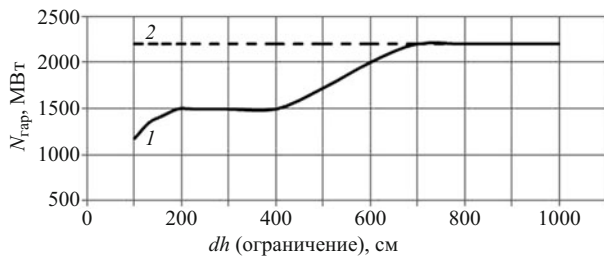


Рис. 3. Изменение гарантированной зимней мощности Саяно-Шушенской ГЭС в зависимости от ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище

мае, июне, июле. Ограничения не устанавливались в августе, сентябре, октябре и ноябре.

Ограничения по скорости изменения уровня воды в водохранилище устанавливались одинаковыми как для летнего, так и для зимнего периодов.

Результаты расчетов по первому варианту представлены на рис. 1, 2 и 3.

На рис. 1 изображен график влияния ограничения по скорости изменения уровня воды в водохранилище на среднесуточную годовую выработку электроэнергии Саяно-Шушенской ГЭС. График показывает, что наибольшее влияние на выработку электроэнергии гидроэлектростанцией оказывает диапазон допустимых колебаний уровня воды в водохранилище в пределе до 500 см в декаду. Рост выработки в диапазоне допустимых колебаний от 100 до 500 см составляет 2150 млн. кВт · ч, что равняется 10 % от среднесуточной выработки ГЭС при работе без ограничений (22 500 млн. кВт · ч). При ограничении более чем 500 см в декаду влияние не так значительно, а после 700 см практически незаметно.

Снижение выработки на ГЭС в результате уменьшения допустимой скорости изменения уровня воды в водохранилище можно объяснить уменьшением регулирующей способности водохранилища, что приводит к увеличению холостых сбросов воды и, как следствие, к уменьшению выработки электроэнергии.

На рис. 2 представлена зависимость холостых сбросов воды от ограничения по скорости изменения уровня воды в водохранилище. Следует отметить, что при установлении ограничений обеспеченность, при которой появляются холостые сбросы воды на ГЭС, возрастает с 70 до 98 %, т.е. это может привести к ежегодным холостым сбросам.

На рис. 3 представлено влияние ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище на гарантированную зимнюю мощность ГЭС. На рисунке видно, что на гарантированную мощность ГЭС влияет диапазон ограничений до 700 см в декаду, причем это влияние достаточно значительное. Уменьшение допустимого диапазона колебаний уровня воды в водохранилище с 700 до 400 см при-

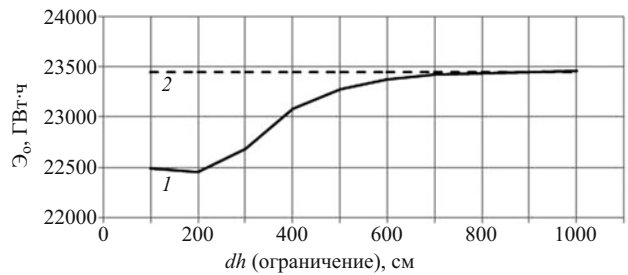


Рис. 4. Изменение среднесуточной годовой выработки Саяно-Шушенской ГЭС в зависимости от ограничения по скорости изменения уровня воды в водохранилище: 1 – при работе ГЭС с ограничениями, 2 – при работе ГЭС без ограничений

водит к уменьшению гарантированной мощности на 700 МВт, или более чем на 30 %. Это приводит к уменьшению энергоотдачи ГЭС в зимний период, когда имеет место максимум электропотребления. В результате снижается эффективность использования ГЭС в покрытии пиков нагрузки и регулировании частоты в энергосистеме, а значит уменьшаются и маневренные мощности в ней.

Результаты расчетов по второму варианту представлены на рис. 4, 5 и 6.

Во втором варианте за счет увеличения используемой мощности среднесуточная выработка ГЭС больше. В сравнении с первым вариантом характер зависимости практически не изменился. В этом варианте диапазон ограничений, оказывающий влияние на среднесуточную выработку ГЭС, несколько расширился. Установление ограничения в размере 600 см в декаду, в отличие от первого варианта, приводит к снижению выработки на ГЭС 80 млн. кВт · ч (в первом варианте это значение составляет менее 10 млн. кВт · ч).

На рис. 5 приведена зависимость холостых сбросов воды от допустимых скоростей изменения уровня воды в водохранилище. В этом варианте обеспеченность, при которой появляются холостые сбросы, возрастает с 30 до 70 %.

На рис. 6 представлено влияние ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище на гарантированную зимнюю мощность ГЭС для второго варианта. Вид данной характеристики практически не отличается от первого варианта.

В таблице показаны результаты расчетов по оценке влияния изменения режима работы Саяно-Шушенской ГЭС при применении ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище на энергетические показатели Красноярской ГЭС. Энергетические показатели работы Красноярской ГЭС в зависимости от варианта использования мощности Саяно-Шушенской ГЭС не различаются.

Из представленных в таблице результатов расчетов видно, что применение ограничений на Саяно-Шушенской ГЭС в основном влияет на средне-

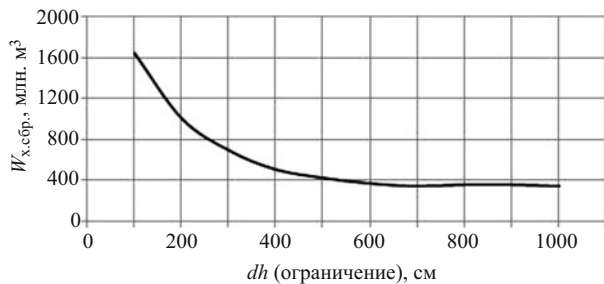


Рис. 5. Изменение среднего годового объема холостых сбросов Саяно-Шушенской ГЭС в зависимости от ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище

многолетнюю выработку электроэнергии Красноярской ГЭС. Гарантированная зимняя мощность практически не изменяется.

Проведенные расчеты показали, что установление ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище может достаточно сильно повлиять на энергетические показатели работы Саяно-Шушенской ГЭС, в особенности на гарантированную зимнюю мощность ГЭС. Это оказывает влияние также на среднегодовую выработку расположенной ниже по течению реки Красноярской ГЭС. В результате установления таких ограничений может возникнуть проблема нерационального использования водных ресурсов водохранилищ этих гидроэлектростанций и, как следствие, снижение эффективности использования в энергосистеме Сибири.

Выводы

1. Учет требований по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений приводит к необходимости корректировать Правила использования водных ресурсов водохранилищ.

2. Введение ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище может значи-

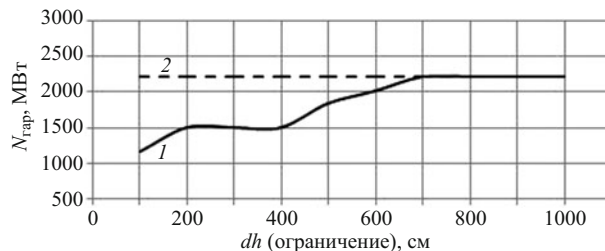


Рис. 6. Изменение гарантированной зимней мощности Саяно-Шушенской ГЭС в зависимости от ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище: 1 – при работе ГЭС с ограничениями, 2 – при работе ГЭС без ограничений

тельно повлиять на водноэнергетические режимы, показатели работы гидроэлектростанции и частоту холостых сбросов воды.

3. Изменения водного режима работы Саяно-Шушенской ГЭС с учетом ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище оказывает влияние на энергетические показатели работы Красноярской ГЭС.

Список литературы

1. Савич А. И., Бронштейн В. И., Ильин М. М. Геомониторинг на участках крупных гидротехнических сооружений в районах повышенного геодинамического риска // Гидротехническое строительство. 2000. № 4. С. 50 – 55.
2. Мурашов С. В., Дубинина В. Г., Александровский А. Ю. Требования рыбного хозяйства и их учет при разработке правил использования водных ресурсов водохранилищ ГЭС // Гидротехническое строительство, 2009. № 12. С. 28 – 32.
3. Александровский А. Ю., Силаев Б. И., Пугачев Р. В., Якушов А. Н. Программный комплекс для проведения водохозяйственных и водноэнергетических расчетов каскадов ГЭС “Каскад” / Свидетельство о государственной регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам программы для ЭВМ № 2011613087 от 19 апреля 2011 г.

Пространственно-временная изменчивость гидрохимических параметров Угличского водохранилища

Кудрина Е. В., аспирант, Ахременко А. И., кандидат техн. наук
(Ярославский государственный технический университет)

Анализируются изменения качества воды в Угличском водохранилище за 2007 – 2011 гг. Рассматриваются факторы, влияющие на химический состав воды, и существующие тенденции его изменения.

Ключевые слова: водохранилище, гидрохимический режим, ионный состав, концентрация, ПДК, мониторинг, Угличское водохранилище.

Водоохранилища Волжского каскада являются объектами федерального значения и играют большую роль в жизни прилегающих к ним территорий, обеспечивая потребности гидроэнергетики, судоходства, водоснабжения и др. Угличское водохранилище — объект многоцелевого назначения. Поскольку водоснабжение прилегающей к нему территории в основном связано с забором воды из водохранилища, то оценка ее качества представляет несомненный интерес.

Гидрохимический режим Угличского водохранилища, в основном, зависит от качества воды, поступающей из Ивановского водохранилища, а также сточных вод предприятий, расположенных на его берегах [1].

Состав природной воды, как качественный, так и количественный, зависит от условий, в которых происходит его формирование. К абиотическим факторам формирования качества воды относят прежде всего характеристики водосборной площади водохранилища: геологическое строение, рельеф, характер и типы почвенного покрова и растительности. Кроме того, большую роль играет объём и характер водного стока, водообмен [2].

Бассейн Угличского водохранилища занимает площадь 60 049 км², представляет собой большей частью равнинную местность, заболоченность которой составляет 11 %, а залесенность — 42 %.

Вследствие неглубокого вреза речных русел и водохранилища естественное дренирование происходит только в покровных слоях. К водоносным породам относятся подстилающие и дочетвертичные породы, представленные в основном юрскими отложениями и частично отложениями карбона. Воды, насыщающие четвертичные породы, залегают близко к дневной поверхности (на глубине 0,5 – 1,5 м) и интенсивно питают реки.

Коренные породы не оказывают существенного влияния на химический состав воды рек, так как обычно глубина их залегания превышает глубину вреза речных долин. Моренные отложения, залегающие на морёных известняках, богаты известковыми валунами, что сказывается на химическом составе грунтовых вод.

Таким образом, первичное формирование ионного состава речных притоков водохранилища протекает в условиях избыточного увлажнения и однородных почвенно-геологических условий, из чего следует, что химический состав воды по всей аква-

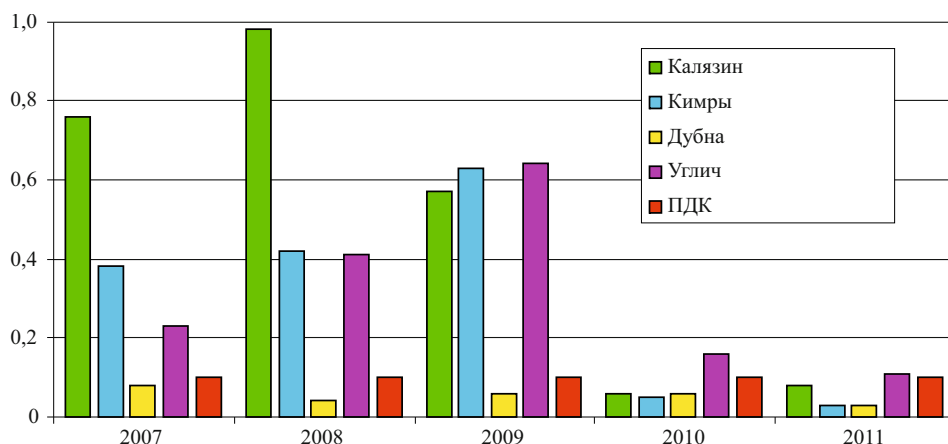


Рис. 1. Содержание железа в воде Угличского водохранилища за 2007 – 2011 гг.

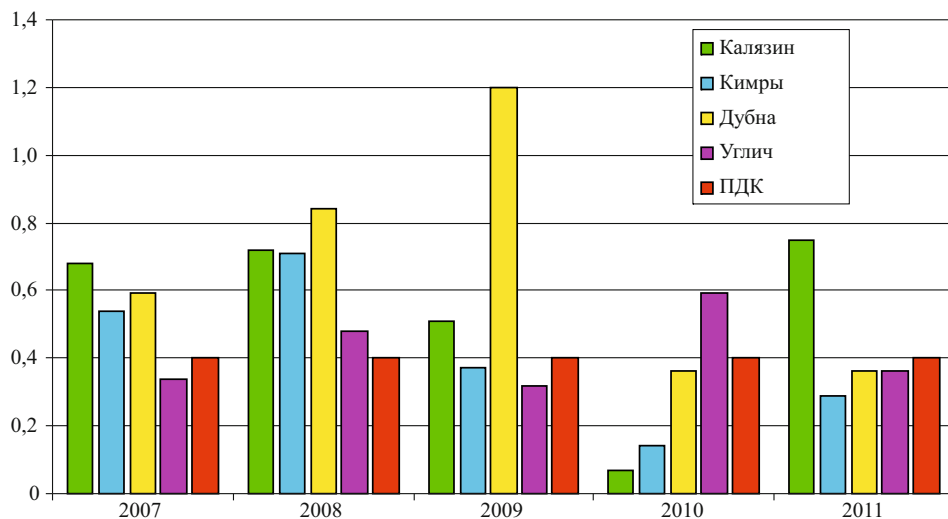


Рис. 2. Содержание аммонийного азота в воде Угличского водохранилища за 2007 – 2011 гг.

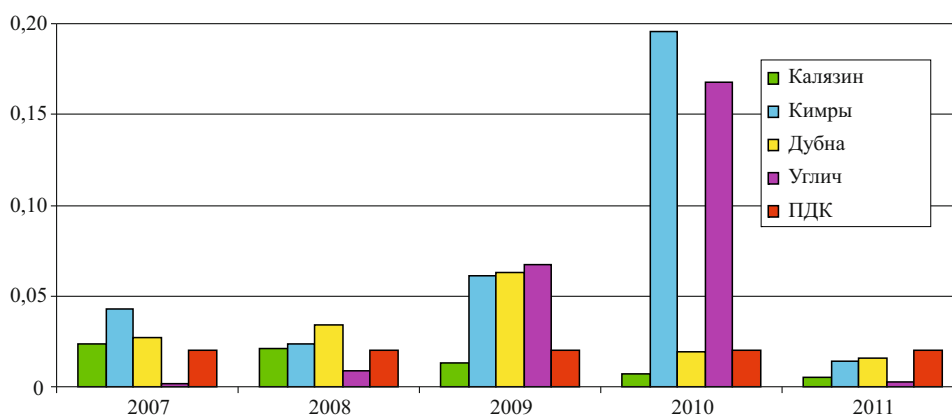


Рис. 3. Содержание нитритов в воде Угличского водохранилища за 2007 – 2011 гг.

тории Угличского водохранилища довольно однообразен. Формирование качества воды происходит под влиянием различных факторов, таких, как внутриводоёмные процессы, антропогенная нагрузка, характер питания, климатические условия, гидрологические характеристики водохранилища и др.

В настоящее время мониторинг качества воды Угличского водохранилища осуществляется на основании данных лабораторных анализов предприятий коммунального хозяйства городов Дубна, Кимры, Калязин и Углич. Пробы отбирались в поверхностном горизонте выше и ниже сброса сточных вод городов Дубна, Кимры, Калязин. Анализ материалов исследования Угличского водохранилища в 2007 – 2011 гг. позволил проследить пространственно-временную изменчивость его гидрохимических параметров [3].

Главными источниками соединений железа в поверхностных водах являются процессы химического выветривания горных пород, сопровождающиеся их механическим разрушением и растворением. В процессе взаимодействия с содержащимися в природных водах минеральными и органическими веществами образуется сложный комплекс

соединений железа, находящихся в воде в растворенном, коллоидном и взвешенном состояниях. Значительное количество железа поступает с подземным стоком и со сточными водами предприятий металлургической, металлообрабатывающей, текстильной, лакокрасочной промышленности и с сельскохозяйственными стоками. Фазовые равновесия зависят от химического состава вод, pH, Eh и в некоторой степени от температуры. Являясь биологически активным элементом, железо влияет на интенсивность развития фитопланктона и качественный состав микрофлоры в водоеме. Концентрация железа подвержена заметным сезонным колебаниям. Обычно в водоемах с высокой биологической продуктивностью в период летней и зимней стагнации заметно увеличение концентрации железа в придонных слоях воды. Концентрация $Fe_{\text{общ}}$ в воде Угличского водохранилища колеблется от 0,05 до 1 мг/л (рис. 1) и в целом превышает ПДК, которая составляет 0,1 мг/л. Наилучшие показатели отмечаются в последние годы (2010 и 2011 гг.).

Азот аммонийный. Превышение в питьевой воде ПДК по содержанию аммония может свидетельствовать о попадании фекальных стоков или

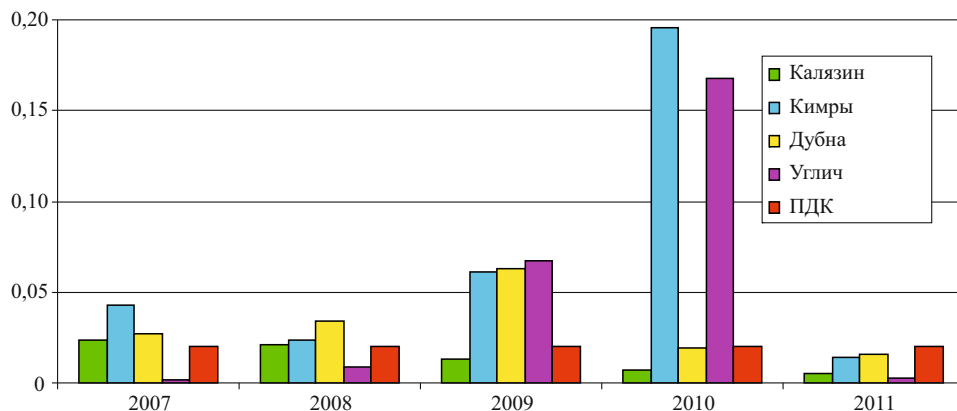


Рис. 4. Содержание фосфатов в воде Угличского водохранилища за 2007 – 2011 гг.

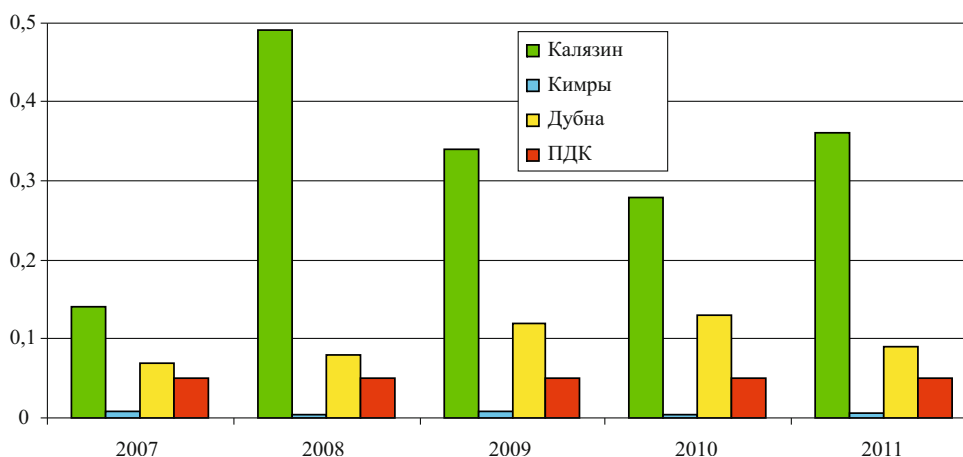


Рис. 5. Содержание нефтепродуктов в воде Угличского водохранилища за 2007 – 2011 гг.

органических удобрений в источник. Содержание аммония (рис. 2) превышает ПДК по всем створам, которая составляет 0,4 мг/л. Наибольшее превышение наблюдалось в створе г. Дубна в 2009 г.

Нитриты. Сезонные колебания содержания нитритов характеризуются отсутствием их зимой и появлением весной при разложении неживого органического вещества. Наибольшая концентрация нитритов наблюдается в конце лета. Осенью содержание нитритов постепенно уменьшается. Одной из особенностей распределения нитритов по глубине водного объекта являются хорошо выраженные максимумы. Для нитритов ПДК установлена в размере 0,02 мг/дм³ в пересчете на азот. Содержание нитритов (рис. 3) до 2009 г. превышало ПДК по всем створам. По сравнению с предыдущими годами содержание нитритов в 2011 г. уменьшилось во всех створах и не превышает ПДК.

Фосфор — это один из основных элементов, необходимых для роста растений и животных. Он входит в состав солей фосфатов. Присутствие фосфатов в воде может объясняться распадом органических пестицидов, которые содержат фосфаты.

На формирование режима фосфатов Угличского водохранилища оказывает влияние сброс промышленных и сточных вод. Влияние сточных вод в основном проявляется в местах выпуска стоков и на расстоянии до 500 м ниже выпуска. Так, по результатам лабораторных анализов, представленных городскими очистными сооружениями, видно, что концентрация фосфатов выше места выпуска сточных вод ниже, чем после сброса. Содержание фосфатов находится в пределах от 0,06 до 0,1 мг/л и не превышает ПДК, которая составляет 0,2 мг/л (рис. 4). После очистных г. Калязин происходит увеличение концентрации общего фосфора в воде водохранилища. В точке наблюдений 500 м выше очистных г. Калязин концентрация общего фосфора составила 0,060 мг/дм³, а после очистных — 0,084 мг/дм³.

Содержание нефтепродуктов в воде Угличского водохранилища во всех створах, кроме г. Кимры, превышало ПДК, которая составляет 0,05 мг/л (рис. 5). Наибольшее превышение наблюдалось в створе г. Калязин в 2008 г.

Анализируя данные качества воды в Угличском водохранилище, представленные городскими очи-

стными сооружениями, и данные при отборе проб в ходе санитарного обследования, можно сделать вывод, что вода в Угличском водохранилище в 2010 – 2011 гг. по ряду показателей (содержание железа, азота аммонийного, нитритов) стала менее загрязненной.

Список литературы

1. Ахременко А. И., Беляева Е. В., Гросс А. Р., Михайлов Е. А. Экологические условия Угличского водохранилища // Эко-

- логия и жизнь: Сборник статей XIV Международной научно-практической конференции. — Пенза, 2008. С. 221 – 223.
2. Кудрина Е. В., Ахременко А. И. Анализ изменения качества воды Угличского водохранилища за последние годы // Формирование и реализация экологической политики на региональном уровне: материалы V всероссийской научно-практической конференции (8 – 9 декабря, 2011 г.) — Ярославль: ЯГПУ, 2011. Ч. I. С. 89 – 91.
3. Ведомости данных лабораторных анализов качества воды Угличского водохранилища за 2007 – 2011 гг. // Материалы ФГУ “Управление эксплуатации Угличского водохранилища.”

Осаждение частиц наносов в аванкамере насосной станции

Мухаммадиев М. М., доктор техн. наук, Уришев Б. У., кандидат техн. наук,
Носиров Ф. Ж., инженер (Ташкентский государственный технический университет)

Рассмотрено распределение взвешенных частиц на дне водопроводящих сооружений, предложено новое уравнение по определению длины траектории падения частиц на дне аванкамеры насосной станции с прямым уклоном, приведены данные натурных наблюдений.

Ключевые слова: распределение взвешенных частиц, аванкамера насосной станции, уравнение по определению длины траектории падения частиц на дне аванкамеры.

Надежной методики расчета распределения взвешенных частиц наносов по длине потока для аванкамеры насосной станции пока нет. Существующие методы таких расчетов [1 – 4] разработаны в основном для отстойников и регулирующих сооружений постоянного сечения, в которых средняя скорость потока принимается не изменяющейся по длине. Для русел переменного сечения в работе [1] предложена интегральная зависимость по расчету распределения объемной концентрации взвешенных частиц наносов по длине русла, — на наш взгляд, она вполне пригодна для оценки степени мутности потока. При равномерном турбулентном потоке с малыми скоростями однородные по гидравлической крупности взвешенные частицы, расположенные на одной высоте, по утверждениям некоторых исследователей [4, 5], осаждаются, распределяются на дне по нормальному закону Гаусса. При этом среднюю длину траектории падения частицы рекомендуется определять выражением [4]

$$L_{cp} = \frac{v_x \cdot h}{w}, \quad (1)$$

где h — высота расположения частиц в начале движения; v_x — средняя по глубине h скорость потока; w — гидравлическая крупность частиц; L_{cp} — медиана Гауссовского распределения.

Выражение (1) можно считать справедливым, если отсутствуют или ничтожно малы пульсационные составляющие скорости и оно получено для прямоугольного русла.

На рис. 1 показана схема траектории осаждения частицы при неравномерном распределении скоростей потока по вертикали и постоянной средней скорости v_x по длине [4]. Траектория падения частицы определяется характером изменения скорости потока по вертикали. Например, при максимальных значениях скорости, которые имеют место в верхней части эпюры, траектория частицы будет выпуклой вниз, а в придонном слое, где минимальные значения скорости, — выпуклой вверх.

Рассмотрим движение частицы, находящейся в точке A , при отсутствии пульсационных составляющих скоростей, т.е. при $u_z = 0$. Частица, имея горизонтальное направление и двигаясь со скоростью v_x , за время dt пройдет расстояние $dx = v_x dt$. Одновременно эта частица под действием силы тяжести опускается со скоростью $dz = v_z dt$. Отсюда получим следующее уравнение:

$$dxv_z = v_x dz, \quad (2)$$

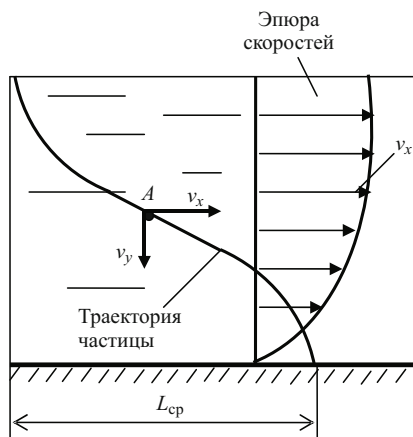


Рис. 1. Схема траектории движения частицы

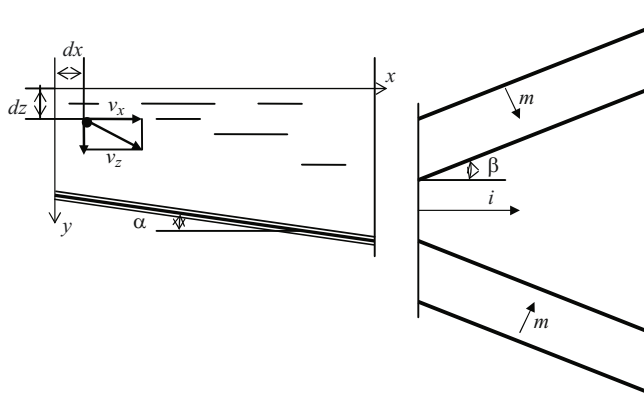


Рис. 2. Схема к выводу уравнения движения частицы:

a — продольная схема аванкамеры; *b* — плановая схема аванкамеры

которое описывает траекторию падения частицы.

Уравнение траектории взвешенной частицы, которая движется со скоростью v_x и опускается со скоростью v_z в условиях отсутствия пульсационных составляющих скоростей в аванкамере насосной станции в основном зависит от величины v_x . Эту величину в произвольном сечении с площадью ω можем выразить через расход воды Q :

$$v_x = \frac{Q}{bh + mh^2} = \frac{Q}{b_1h_1 + b_1xtg\beta + h_1xtg\alpha + x^2tg\alpha tg\beta + mh^2 + 2xtg\alpha h_1m + x^2tg^2\alpha m}, \quad (3)$$

где b , m , h — соответственно ширина по дну, коэффициент откоса и глубина воды в аванкамере; b_1 , h_1 — параметры площади живого сечения в начале аванкамеры.

Ширина по дну и глубина воды в аванкамере определяются следующими формулами:

$b = b_1 + xtg\beta$; $h = h_1 + xtg\alpha$, где β — угол расширения аванкамеры; α — угол наклона аванкамеры к горизонту (рис. 2).

Подставляя (3) в (2), получим

$$(b_1h_1 + b_1xtg\alpha + h_1xtg\beta + x^2tg\alpha tg\beta + mh^2 + 2xtg\alpha h_1m + x^2tg\alpha m)dx = \frac{Q}{v_z} dz.$$

Проинтегрировав полученное значение, записываем

$$\left[\frac{x^3}{3} tg\alpha(mtg\alpha + tg\beta) + x^2tg\alpha(h_1m + \frac{1}{2} b_1tg\alpha) + \frac{x^2}{2} h_1tg\beta + mh_1^2x + b_1hx \right] = \frac{Q}{v_x} z + C.$$

Значение C определяем с учетом начальных условий. При $x = 0$ и $z = 0$ получаем $C = 0$. Таким образом, искомое уравнение движения падающей частицы принимает вид

$$z = \frac{v_z}{Q} \left[\frac{x^3}{3} tg\alpha(mtg\alpha + tg\beta) + x^2tg\alpha(h_1m + \frac{1}{2} b_1tg\alpha) + \frac{x^2}{2} h_1tg\beta + \omega_1x \right], \quad (4)$$

где ω_1 — площадь живого сечения в начале аванкамеры.

Такое же уравнение траектории падения частицы для прямоугольного русла было получено И. Е. Михайловым [4], уравнение (4'). При использовании этого уравнения он предложил принимать вместо v_z гидравлическую крупность наносов w . Однако, как показывает сравнение результатов расчетов движения наносов с их измеренными величинами, при этом наблюдаются некоторые отклонения, связанные с разностью значений v_z и w [3].

Действительно, скорость падения частиц зависит от множества параметров, в том числе от их размеров, удельного веса, а также степени мутности потока. Связь скорости v_z и степени мутности a можно выразить зависимостью [3]

$$v_z = \frac{a_0 - a_k}{a_0} \bar{w}_0, \quad (5)$$

где a_0 — мутность потока в начале аванкамеры, кг/м^3 ; a_k — критическая мутность потока, кг/м^3 ; w_0 — средневзвешенная гидравлическая крупность, м/с :

$$\bar{w}_0 = 0,01 \sum w_i p_i,$$

где w_i — гидравлическая крупность отдельных фракций частиц; p_i — процентное содержание отдельных фракций.

Величину критической мутности потока можем определить по формуле [3]

$$a_k = 0,25 a_0^{0,7} \frac{v}{3\sqrt{H\bar{w}_0}}. \quad (6)$$

Таким образом, уравнение (4) имеет вид

$$z = \frac{a_0 - a_k}{Q a_0} \bar{w}_0 \left[\frac{x^3}{3} \text{tg}\alpha (m \text{tg}\alpha + \text{tg}\beta) + x^2 \text{tg}\alpha (h_1 m + \frac{1}{2} b_1 \text{tg}\alpha) + \frac{x^2}{2} h_1 \text{tg}\beta + \omega_1 x \right]. \quad (7)$$

Вышеприведенное уравнение получено с применением следующих допущений: отсутствуют турбулентность, возникающая вдоль течения при расширении потока, и взаимное влияние осаждающихся частиц наносов.

Для построения траектории падающей частицы при оговоренных условиях движения потока в фиксированном русле воспользуемся уравнением (7).

Правомочность уравнения (7) можем проверить на примере аванкамеры насосной станции М-II-2 Каршинского управления эксплуатации малых насосных станций. Аванкамера имеет длину 36 м, а начальная ее часть длиной 29 м проложена горизонтально без уклона. Концевая часть аванкамеры длиной 7 м имеет уклон $i = 0,5$. Угол расширения аванкамеры $\beta = 17^\circ$; коэффициент откоса $m = 1,5$; ширина подводящего канала $b_1 = 3,0$ м; глубина воды в канале, соответствующая расходу $Q = 7,8$ $\text{м}^3/\text{с}$, составляет $h_1 = 1,95$ м; скорость потока в начале аванкамеры 0,7 м/с. Для горизонтальной части аванкамеры уравнение, с учетом $\text{tg}\alpha = 0$ имеет вид

$$z = \frac{a_0 - a_k}{Q a_0} \bar{w}_0 \left[\frac{x^2}{2} h_1 \text{tg}\beta + b_1 h_1 x + m h_1^2 x \right]. \quad (8)$$

Полученные пробы в аванкамере и их лабораторный анализ показали, что средневзвешенная гидравлическая крупность частиц наносов составляет $\bar{w}_0 = 0,049$ м/с, при этом $a_0 = 3,39$ кг/м^3 . Критическую мутность потока определяем по формуле (6). Результаты расчета представлены на рис. 3.

Частицы наносов с вышеприведенными параметрами падают на дно на расстоянии 22,8 м от начала аванкамеры. Проведенный анализ показал, что длина пути осаждения наносов зависит от их гидравлической крупности: чем больше эта величина, тем меньше длина траектории частиц. На-

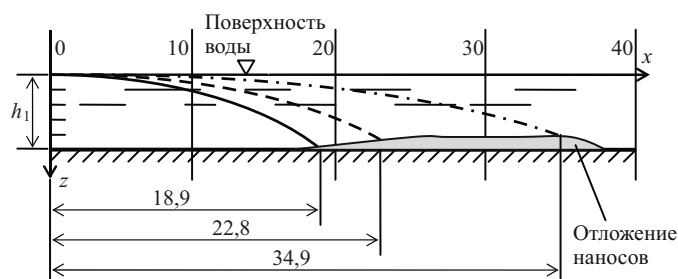


Рис. 3. Траектория и длина пути осаждения частиц:

— при $\bar{w}_0 = 0,061$ м/с; --- при $\bar{w}_0 = 0,049$ м/с; - · - · - при $\bar{w}_0 = 0,0281$ м/с

пример, при $\bar{w}_0 = 0,061$ м/с длина траектории частиц по уравнению (8) составляет 18,9 м, а при $\bar{w}_0 = 0,0281$ м/с — 34,9 м. Фракционный состав и гидравлическая крупность образцов наносов, взятых из отложений на дне аванкамеры насосной станции М-II-2, показали незначительное расхождение между значениями \bar{w}_0 в местах их падения на рис. 2,4. и расчетными величинами по уравнению (8). Например, на расстоянии 18,9 м от начала аванкамеры имелись отложения с фракциями 0,3 – 0,45 мм и с гидравлической крупностью $\bar{w}_0 = 0,049 – 0,068$ м/с, на расстоянии 22,8 м с фракциями 0,15 – 0,25 мм и с $\bar{w}_0 = 0,035 – 0,053$ м/с, а на расстоянии 34,9 м — с фракциями 0,01 – 0,05 мм и с $\bar{w}_0 = 0,0125 – 0,028$ м/с.

Полученные нами данные подтверждаются результатами исследований, приведенными в работах [6, 7], где подчеркивается, что при переменных сечениях водопроводящего сооружения большие фракции осаждаются в начальных участках, а мелкие фракции доходят до конца участка.

Таким образом, сопоставление результатов расчета по уравнению (8) с натурными данными показывает, что на стадии проекта аванкамеры с помощью предложенных нами уравнений (7) и (8) можно наметить места приблизительного падения частиц для принятия адекватных мер по предотвращению заилиения.

Список литературы

1. *Арифжанов А. М.* Метод расчета распределения частиц наносов в руслах переменного сечения // Гидротехническое строительство. 2004. № 2. С. 44 – 45.
2. *Ибад-заде Ю. А.* Транспортирование воды в открытых каналах. — М.: Стройиздат, 1983.
3. *Кавешников Н. Т.* Методы расчета осаждения наносов и параметров мутности потока в отстойниках // Гидротехническое строительство. 1997. № 10. С. 26 – 30.
4. *Михайлов И. Е.* Траектория и длина пути осаждения взвешенных частиц // Гидротехническое строительство. 2002. № 1. С. 28 – 32.
5. *Михайлов И. Е.* Распределение однородных частиц на дне при их осаждении в равномерном малоскоростном турбулентном потоке в отстойниках // Гидротехническое строительство. 2004. № 11. С. 30 – 35.
6. *Мухаммедов Я. С.* Динамика твердого стока от водозабора до НС № 1 Каршинского магистрального канала // Вопросы русловой гидротехники с учетом усиливающейся роли антропогенной деятельности в речных бассейнах Средней Азии. Ташкент, 1990. С. 45 – 51.
7. *Мухаммадиев М. М., Носиров Ф. Ж., Уришев Б. У.* Повышение эффективности работы водоприемных устройств насосных станций // Гидротехническое строительство. 2010. № 1. С. 11 – 13.

Водозаборный гидроузел для деривационной ГЭС на р. Мерке

Лавров Н. П., доктор техн. наук (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет),

Логинов Г. И., кандидат техн. наук (Кыргызско-Российский Славянский университет),

Борисенко Д. А., инженер (ПКТИ “Водоавтоматика и метрология”),

Шипилов А. В., аспирант (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)

Сформулированы технологические условия водозабора из горных рек в деривацию малых ГЭС. Описаны особенности конструкции автоматизированного водозаборного узла, построенного в 2010 г. для деривационной ГЭС на р. Мерке (Казахстан) по патентам авторов.

Ключевые слова: водозабор из горных рек, технологические условия, технические характеристики малой ГЭС на р. Мерке, пескогравелировка, направление совместных исследований КРСУ и СПбГПУ.

Ранее нами была предложена и обоснована компоновочная схема сооружения для водозабора из горно-предгорных участков рек в деривационные водоводы малых ГЭС [1, 2]. В основу конструкции водозаборного сооружения для деривационных ГЭС (ВСДГ) был заложен принцип переменного забора воды из различных слоев речного потока. Так, в зимний период эксплуатации при пропуске чистой воды забор в деривацию производится из нижних слоев, содержащих меньший объем шуги. В теплый период забор воды осуществляется из верхних и средних слоев с меньшим содержанием речных наносов. Поисковые и научные исследования физической модели разработанной конструкции ВСДГ проводились группой исследователей Кыргызско-Российского Славянского университета в рамках проекта МНТЦ № KR-1130 на модельной русловой установке и гидротехнической модельной площадке АООТ “Кыргызводпроект” в период с 2006 по 2010 г. в масштабах 1:25 и 1:10 [3]. В результате были получены зависимости для определения пропускной способности ломаного в плане наносозащитного порога, промывного тракта, автоматических водосливов верхнего бьефа и водоприемной камеры, отверстия зимнего водозабора и других водопроводящих элементов ВСДГ; уточнены их конструктивные параметры с учетом гидроморфометрических характеристик малых рек среднеазиатского региона.

На основании результатов моделирования было определено, что устройство водозаборного сооружения по предложенной компоновочной схеме на горно-предгорных участках рек в должном объеме выполняет необходимые технологические операции [3]. Это:

обеспечение практически бесперебойного водозабора и подачи воды по заданному графику водопотребления, связанному с энергопотреблением, в

том числе при меженных летних и частично при зимних расходах в реке;

поддержание предельного уровня воды в верхнем бьефе сооружения для обеспечения командования над уровнем воды в водоприемнике и подачу постоянного расхода в деривацию (с точностью до 5 %);

защиту от поступления в отводящий канал фракций наносов диаметром частиц более 3 – 10 мм, шуголедовых образований и плавающих тел;

свободный пропуск паводков, селевых масс и частично шуголедовых образований через сооружение по транзиту в нижний бьеф;

обеспечение максимально возможного значения коэффициента водозабора в летнюю межень до $\alpha = 0,9$, в зимний период эксплуатации до $\alpha = 0,8$;

возможность одновременной работы водосбросных и водоприемных сооружений при пропуске паводков;

исключение обратной гидравлической связи (подтопления) со стороны нижнего бьефа с верхним бьефом при сбросе паводковых расходов в условиях промывки отводящего зарегулированного русла;

сопряжение верхнего и нижнего бьефов водозаборного сооружения без образования размывов и занесения (заиления) подводящего и отводящего зарегулированных русел гидроузла;

обеспечение возможности монтажа и демонтажа вспомогательного оборудования в отверстия и затворы сооружения (шугосбросы, сороудерживающие решетки, шандоры, рыбопропускные устройства, устройства обогрева затворов, а также другие элементы для обеспечения бесперебойной работы ВСДГ, в том числе в зимнее время);

создание эффективных гидравлических структур потока элементами сооружения, способствующими

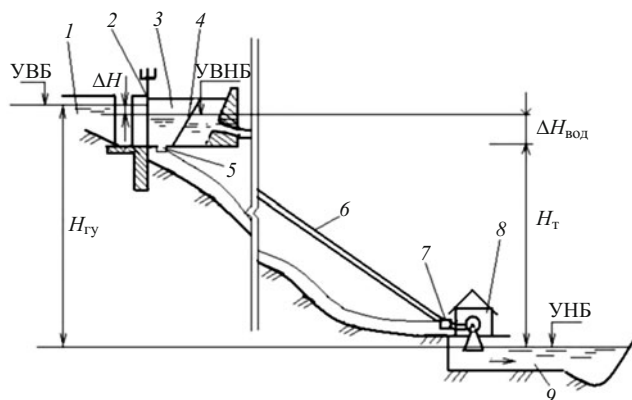


Рис. 1. Схема создания напора МГЭС на р. Мерке: 1 — верхний бьеф водозаборного сооружения; 2 — подпорные устройства водозаборного сооружения; 3 — напорный бассейн; 4 — сороудерживающие сооружения; 5 — пескогравиеловка; 6 — турбинный трубопровод; 7 — сбросной клапан; 8 — здание ГЭС; 9 — нижний бьеф ГЭС (отводящий канал); H_T — напор нетто ГЭС; $H_{ГЧ}$ — напор брутто ГУ (напор гидроэнергетической установки), $\Delta H_{\text{вод}}$ — потери напора в турбинном трубопроводе

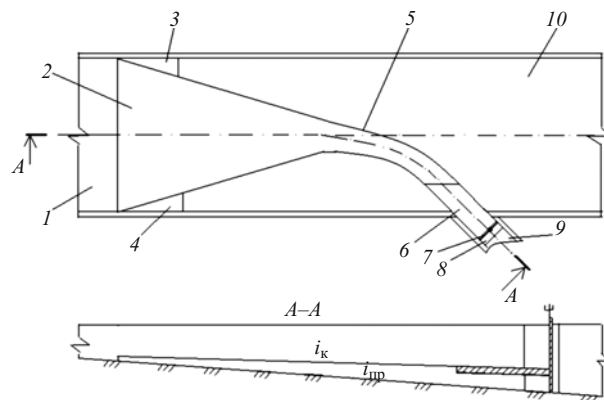


Рис. 2. Компонентная схема пескогравиеловки: 1 — подводящий участок напорного бассейна; 2 — траншея; 3 и 4 — наносонаправляющие козырьки; 5 — галерея; 6 — плита; 7 — затвор; 8 — сопрягающий участок; 9 — промывной тракт; 10 — транзитный участок напорного бассейна

ших надежному водозабору и наносозащите в пределах сооружения;

доступность к элементам сооружения при ремонте и эксплуатации при всех гидрологических режимах реки;

безопасность условий работы и жизнедеятельности эксплуатационного персонала.

Впоследствии выполнение этих технологических операций разработанной конструкцией ВСДГ было подтверждено результатами натурных исследований гидротехнических сооружений деривационной ГЭС на реке Иссык-Ата [2, 3].

Вместе с тем были выявлены некоторые проблемы в функционировании водозаборного сооружения и его элементов в условиях отрицательных температур воздуха, т.е. в зимнее время. В частности, происходит обмерзание полотнища и закладных частей затворов авторегулятора уровня и стабилизатора расхода, затруднен сброс шуги и льда в нижний бьеф гидроузла в период их интенсивного транспорта по реке.

Следует отметить, что основы конструирования и методики физических исследований ВСДГ базировались на материалах разработок и исследований проблем водозабора (преимущественно для ирригационных систем), выполненных такими учеными Киргизии, как Я. В. Бочкарев, Э. Э. Маковский,

Гидроморфометрические характеристики р. Мерке

Водоток	Площадь водосбора, км ²	Длина водотока, км	Средний уклон, i	Средняя высота бассейна, м
Р. Мерке	535	73	0,05	3009,0

Г. В. Соболин, И. К. Рудаков, С. С. Сатаркулов, Б. И. Мельников, А. В. Филончиков, А. И. Рохман и др. [3].

В 2010 г. после проведения консультаций и согласования со специалистами Киргизского НТЦ “Энергия” и ПКТИ “Водоавтоматика и метрология” Кыргызской Республики была рекомендована к применению аналогичная компоновка водозаборного сооружения для деривационной ГЭС на р. Мерке (Республика Казахстан). При этом в качестве заказчика выступала сельская управа одноименного села Мерке, для покрытия графика электроснабжения которого в плане развития населенного пункта было заложено строительство деривационной ГЭС с установленной мощностью 1,5 МВт. В качестве подрядчика выступило общество с ограниченной ответственностью ТОО “Ремкомстрой” с головным предприятием, расположенным в селе Мерке.

Р. Мерке является притоком р. Чу и характеризуется относительно развитой гидрографической сетью, состоящей из более 15 водотоков протяженностью менее 10 км каждый. Основные гидроморфометрические характеристики источника водоподачи на гидростанцию — р. Мерке [3] приведены в таблице.

Меженный период источника приходится в основном на холодное время года и характеризуется относительно устойчивыми расходами воды: $Q_{\min} = 1,8 \dots 1,9 \text{ м}^3/\text{с}$. К характерным относится максимальный расход, прошедший в 1933 г. и равный $57,7 \text{ м}^3/\text{с}$, а также расходы расчетной обеспеченности: $Q_{1\%} = 61 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{10\%} = 39,9 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{75\%} = 3,6 \text{ м}^3/\text{с}$. Расстояние от истока реки до створа водозабора для малой ГЭС составляет 47 км.

На этапе ТЭО сотрудниками КНТЦ “Энергия” (г. Бишкек) была обоснована схема напорной деривации МГЭС на р. Мерке, приведенная на рис. 1.



Рис. 3. Ломаный в плане наносозащитный порог с криволинейным профилем гребня (слева) в составе ВСДГ на р. Мерке на этапе строительства

Запроектированная, а в последствии построенная деривационная ГЭС на р. Мерке имеет следующие основные технические характеристики:

диаметр турбинного трубопровода — 1400 мм, количество водоводов — 1 шт;

длина турбинного трубопровода (напорной деривации) — 1300 м;

расходы, подаваемые в напорную деривацию: $Q_{\max}^d = 3,5 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{\min}^d = 1,75 \text{ м}^3/\text{с}$;

количество агрегатов — 3 шт.;

напор гидроэнергетической установки $H_{гг} = 65 \text{ м}$;

единичная мощность агрегата — 500 кВт;

тип турбин — горизонтальные РО-75 с диаметром рабочего колеса $D_1 = 460 \text{ мм}$.

Общим в конструкции ВСДГ на р. Иссык-Ата [2] и на р. Мерке является наличие средств гидравлической автоматизации процессов водозабора: авторегулятора уровня воды на речном (сбросном) пролете водозаборного сооружения и стабилизатора расхода воды в головной части деривации. Одинаковы по конструкции также элементы защиты деривации от льда и шуги в виде шандоров на гребне наносозащитного порога и сдвоенного затвора на промывном тракте ВСДГ [2, 3].

Отличительной особенностью гидроузла на р. Мерке от ранее описанного [2] на р. Иссык-Ата является размещение за береговым водоприемником и короткой открытой деривацией напорного бассейна, из которого вода подается в турбинный трубопровод. Необходимость применения более дорогостоящей напорной деривации была продиктована сложными топографическими и геологическими условиями местности по возможной трассе безнапорной деривации.

Вторым отличием гидроузла на р. Мерке является то, что для защиты турбинного трубопровода и



Рис. 4. Водозаборное сооружение для деривационной ГЭС (ВСДГ), построенное в 2010 г. на р. Мерке в Меркенском районе Джамбульской области, Казахстан

агрегатов МГЭС от мелких фракций донных наносов (менее 10 мм) в напорном бассейне устроена пескогравелиловка, компоновочная схема которой приведена на рис. 2. Необходимость устройства пескогравелиловки была обусловлена проведенными исследованиями конструкции ломаного в плане наносозащитного порога в составе ВСДГ, которые показали, что в водоприемную камеру сооружения и в напорный бассейн МГЭС могут попадать фракции речных наносов размером от 3 до 10 мм. И хотя, по данным исследований [2, 3], их количество составляет менее 3 – 4 % от объема наносов, транспортируемых рекой в паводковый период, это является неприемлемым по условиям эксплуатации выбранного гидромеханического оборудования МГЭС.

В ходе проектирования продольный уклон дна пескогравелиловки был задан равным $i_{пр} = 0,08$, а уклон дна транзитного участка камеры напорного бассейна $i_k = 0,008$.

Третьим отличием сооружения на р. Мерке является то, что оно имеет в своем составе ломаный в плане наносозащитный порог с гребнем, выполненным с переменным уклоном, значение которого увеличивается от начала порога к его конечному участку (рис. 3). Такая конструкция наносозащитного порога, по данным модельных исследований, способствует увеличению поперечной составляющей скорости воды в циркуляционном вальце, создаваемом вдоль внешней вертикальной поверхности порога для отражения наносов от водоприемной камеры и их транспорта по промывному тракту [4]. Модельные и натурные испытания данной компоновки показали, что сочетание действия наносозащитного порога с переменным уклоном гребня и пескогравелиловки позволило обеспечить вывод из отбираемого в деривацию потока опасных фракций наносов размером менее 10 мм. При этом сброс воды в промывной тракт пескогравелиловки состав-

ляет не более 10 – 15 % транспортируемого расхода.

В ноябре 2010 г. строительство водозаборного гидроузла для Меркенской ГЭС, включающего регулируемое подводящее русло, автоматизированное водозаборное сооружение типа ВСДГ и напорный бассейн с пескогравелировкой (рис. 4), было завершено. Малая Меркенская ГЭС начала выработку электроэнергии.

При разработке описываемой конструкции ВСДГ были применены три патента КР, полученные в КРСУ и КАУ авторами данной статьи.

Проведенное в 2012 г. натурное обследование водопроводящих элементов деривационной ГЭС на р. Мерке после года их эксплуатации подтвердило, что попадание донных наносов в деривацию отсутствует. Выполнение сдвоенного затвора промывного тракта высотой менее $0,8H$ (H — напор в верхнем бьефе ВСДГ) позволило улучшить условия пропуска шуги через створ сооружения на р. Мерке. Однако в кратковременный период интенсивного шугохода наблюдалось скопление шуги у противоположного водоприемнику берега, т.е. перед сбросным водосливом.

В настоящее время в СПбГПУ совместно с КРСУ продолжаются исследования водозабора из горных рек с учетом рыбозащиты и зимних условий эксплуатации водозаборных сооружений [5].

Получен патент РФ на полезную модель съемной конструкции рыбохода для ВСДГ [6].

Опыт исследования, проектирования и эксплуатации автоматизированного водозаборного сооружения для деривационных ГЭС на реках Иссык-Ата и Мерке может быть использован при строительстве и реконструкции малых ГЭС на горных реках с подобными гидрологическими и геоморфологическими характеристиками.

Список литературы

1. Лавров Н. П. и др. Водозаборное сооружение для деривационных ГЭС: Пат. КР № 607, МКП Е 02 В 13 / 00 // Бюллетень изобретений. 2003. № 11.
2. Лавров Н. П., Логинов Г. И., Торопов М. К. Водозаборное сооружение для деривационной ГЭС на р. Иссык-Ата // Гидротехническое строительство. 2008. № 12.
3. Гидротехнические сооружения для малой энергетики горно-предгорной зоны / Под ред. Н. П. Лаврова. — Б.: Салам, 2009. 504 с.
4. Логинов Г. И. Совершенствование водозаборных гидроузлов для целей ирригации и гидроэнергетики: Автореф. ... канд. техн. наук. Бишкек, 2004. 20 с.
5. Лавров Н. П., Логинов Г. И., Шитилов А. В. Новые типы водозаборных сооружений для малых ГЭС // Гидротехника XXI век. 2012. № 1(8). С. 51 – 53.
6. Лавров Н. П., Афонин Е. А., Некрасов П. Ю. Рыбоход для водозаборного сооружения деривационных ГЭС: Пат. РФ на полезную модель № 112215, МКП Е 02 В 8 / 08 // Бюллетень изобретений. 2012. № 1.

Сопоставительный анализ эффективности новой формулы для распределения осреднённых скоростей в продольно-однородных турбулентных потоках

Высоцкий Л. И., доктор техн. наук, Высоцкий И. С., кандидат техн. наук
(Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина)

Приведенные данные проверки приемлемости предложенной в [1] методики расчета распределения осредненных скоростей в продольно-однородных потоках значительно расширяют диапазон используемых с этой целью опытных данных.

Ключевые слова: канал, скорость потока, методика расчета.

В работе [1] на основе открытия [5] обоснована новая пятислойная модель строения продольно-однородных турбулентных потоков, в которой поток делится на пристенный слой и турбулентное ядро. Пристенный слой делится на слой с отрицательной турбулентной вязкостью и два слоя с положительной возрастающей (сначала быстрее, а затем медленнее) турбулентной вязкостью. Турбулентное ядро делится на зоны, в которых турбулентная вязкость линейно связана с расстоянием от стенки, а затем сохраняет свою величину постоянной, что соответствует зонам с логарифмическим и параболическим распределением осреднённых скоростей. Границы перечисленных слоев, в отличие от существующих моделей, считаются подвижными и зависящими от числа Рейнольдса и относительной эквивалентной шероховатости. Закономерность распределения турбулентной вязкости по нормали к стенке считается универсальной и определяется параметрами a и A . Первый параметр a связан с толщиной пристенного слоя $\delta_{ст}$:

$$\delta_{ст} = a \frac{v}{u_*}. \quad (1)$$

Второй параметр A связан с положением границы раздела эпюры распределения осреднённых скоростей в турбулентном ядре δ_A на логарифмическую и параболическую части:

$$\delta_A = AL, \quad (2)$$

где L — либо r_0 (для круглых труб), либо H (для плоских потоков).

Формулы для распределения осредненных скоростей имеют вид [1]:

при гладких стенках:

при $\delta_{ст} \leq z \leq AL$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{\bar{u}_{ст}}{u_*} + \frac{1}{\kappa} \left(\ln \frac{z}{\delta_{ст}} - \frac{z - \delta_{ст}}{L} \right),$$

при $z > AL$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{\bar{u}_{ст}}{u_*} + \frac{1}{\kappa} \left(\ln \frac{AL}{\delta_{ст}} - A + \frac{\delta_{ст}}{L} \right) + \frac{1}{\kappa A} \left[\frac{z}{L} \left(1 - 0,5 \frac{z}{L} \right) - A + \frac{A^2}{2} \right],$$

при $\delta_{ст} = AL$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{\bar{u}_{ст}}{u_*} + \frac{1}{\kappa A} \left[\frac{z}{L} \left(1 - 0,5 \frac{z}{L} \right) - A + \frac{A^2}{2} \right],$$

при шероховатых стенках:

при $\Delta \leq z \leq AL$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = 8,5 + \frac{1}{\kappa} \left(\ln \frac{z}{\Delta} - \frac{z - \Delta}{L} \right),$$

при $z > AL$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = 8,5 + \frac{1}{\kappa} \left(\ln \frac{AL}{\Delta} - A + \frac{\Delta}{L} \right) + \frac{1}{\kappa A} \left[\frac{z}{L} \left(1 - 0,5 \frac{z}{L} \right) - A + \frac{A^2}{2} \right],$$

при $\Delta = AL$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = 8,5 + \frac{1}{\kappa A} \left[\frac{z}{L} \left(1 - 0,5 \frac{z}{L} \right) - A + \frac{A^2}{2} \right],$$

где $k = 0,4$ — константа Кармана; $\bar{u}_{ct} = \bar{u}|_{z=\delta_{ct}}$ — скорость на границе пристенного слоя; u_* — динамическая скорость; Δ — высота выступа шероховатости (эквивалентной шероховатости).

В пределах $0 < z < \delta_{ct}$ значения безразмерных осреднённых скоростей u/u_* представлены зависимостями в табличной форме.

Напомним условия, которым удовлетворяет приведенная универсальная формула для распределения осредненных скоростей:

- 1) она удовлетворяет в пределах $10^{11} > Re_d > 3500$ граничным условиям на стенке и оси потока;
- 2) формуле Кольбрука — Уайта для λ ;
- 3) постоянству константы Кармана $k = 0,4$;
- 4) постоянству дефицита средней скорости $D = 4$ для круглых труб и $D = 2,6$ для плоских потоков;
- 5) всем экспериментальным данным И. Никурадзе для гладких и вполне шероховатых поверхностей, опытными данными А. Ф. Шевелева, МИИГС, а также многим другим, в том числе и новейшим (М. Загаролла, Д. Остерлунд);
- 6) опытными данными для плоских потоков, как при спокойном, так и бурном состоянии потока;
- 7) формула подтверждает наличие слоя в турбулентном ядре с логарифмическим законом распределения скоростей;
- 8) формулы не требуют введения поправок Ван Дрифта, Д. Коулза, Д. Ротта, Л. Гао и П. Жульена;
- 9) наблюдается закономерное изменение толщин трех характерных (условных) слоев потока — пристенного, логарифмического и параболического. Причем пристенный слой по мере увеличения числа Рейнольдса уменьшается со значения L до Δ ;
- 10) граница между слоем с параболическим распределением осредненных скоростей и остальной частью потока с увеличением числа Рейнольдса от малых до очень больших значений смещается в сторону стенки, причем относительное расстояние от стенки до указанной границы $z_A = z_A/r_0 = A$ уменьшается от 1 до 0,1735. Причем $z_A \approx 1$ означает, что все живое сечение турбулентного потока занято пристенным слоем;
- 11) при числе Рейнольдса порядка 10^4 наблюдается исчезновение слоя с логарифмическим распределением скоростей, а поток при меньших числах Re_d состоит из пристенного слоя и ядра с параболическим распределением скоростей;

Т а б л и ц а 1

Исходные данные для сопоставления распределения осреднённых скоростей в трубах

Жидкость	Раствор сахара	Воздух	Воздух	Вода	Газ
Литература	[8]	[7]	[7]	[8]	[11]
Re_d	26 000	40 200	420 000	3 200 000	7 000 000
d , мм	247	247	247	100	102,2
ν , мм ² /с	37,5	15,0	15,0	0,75	0,2425

Полученные по предлагаемой методике параметры потоков в круглых трубах

Re_d	$\frac{\eta_0}{\delta_{СТ}}$	$\frac{\delta_{СТ}}{\eta_0}$	a	A	$\frac{u_{СТ}}{u^*}$	$\frac{V}{u^*}$	$\frac{u_m}{u^*}$	$\frac{V}{u_m}$	λ	D
26 000	9,48	0,1055	75,53	0,1844	16,46	18,16	22,16	0,820	0,0242	4,00
40 200	14,06	0,0711	74,75	0,1805	16,40	19,11	23,11	0,827	0,0219	4,00
420 000	118,2	0,00846	73,12	0,1742	16,25	24,30	28,30	0,859	0,0136	4,00
3 200 000	519	0,00131	73,60	0,1736	16,16	28,86	32,86	0,878	0,00960	4,00
7 000 000	1515	0,00066	72,34	0,1735	16,11	30,63	34,63	0,884	0,00853	4,00

Т а б л и ц а 3

Сопоставление расчетных и опытных значений осредненных скоростей в круглых трубах

Re_d	26 000			40 200			420 000			3 200 000			7 000 000		
$\frac{y}{\eta_0}$	$\frac{u}{u_m}$			$\frac{u}{u_m}$			$\frac{u}{u_m}$			$\frac{u}{u_m}$			$\frac{u}{u_m}$		
	опыт	расчет	%	опыт	расчет	%	опыт	расчет	%	опыт	расчет	%	опыт	расчет	%
0,10	0,697	0,738	-5,8	0,695	0,743	-6,9	0,775	0,785	-1,3	0,800	0,814	-1,7	0,800	0,820	-2,5
0,20	0,775	0,805	-3,8	0,773	0,808	-4,2	0,828	0,838	-1,2	0,855	0,860	-0,6	0,848	0,864	-1,7
0,30	0,822	0,850	-3,3	0,833	0,853	-2,4	0,878	0,876	+0,2	0,892	0,893	-0,1	0,872	0,895	-2,5
0,40	0,860	0,890	-3,5	0,868	0,892	-2,8	0,892	0,909	-1,9	0,927	0,927	+0,6	0,920	0,922	-0,2
0,50	0,885	0,924	-4,4	0,900	0,925	-2,7	0,918	0,936	-1,9	0,945	0,945	0,0	0,936	0,945	-1,0
0,60	0,914	0,951	-4,0	0,921	0,952	-3,4	0,927	0,959	-3,4	0,956	0,956	-0,1	0,965	0,969	+0,1
0,70	0,941	0,973	-3,3	0,947	0,973	-2,8	0,963	0,977	-1,4	0,968	0,978	1,1	0,982	0,978	+0,8
0,80	0,965	0,988	-2,4	0,971	0,988	-1,8	0,963	0,990	-2,8	0,985	0,991	-0,6	0,991	0,989	+0,2
0,90	0,973	0,997	-2,5	0,978	0,997	-1,8	0,983	0,997	-1,4	0,998	0,998	0,0	0,997	0,995	+0,2
1,00	1,000	1,000	0,0	1,000	1,000	0,0	1,000	1,000	0,0	1,000	1,000	0,0	1,000	1,000	0,0

12) начиная с момента исчезновения пристенного слоя, т.е. при достижении условий $\delta_{СТ} = \Delta$, параметры a и A становятся зависящими только от относительной шероховатости, причем можно принять, что $a_{КВ} = 37,5$; $A_{КВ} = 0,1735$; $u_{\Delta}/u^* \approx 8,5$;

13) при построении профиля осреднённой скорости расстояния отсчитываются по нормали от стенки. Однако часть профиля от стенки до вершины выступов шероховатости считается разрушенной, а скорость на высоте выступов шероховатости принимается равной скорости, соответствующей профилю на этом расстоянии.

Поскольку провозглашена универсальность формулы и её независимость от необходимости введения каких-либо поправок, её эффективность должна быть подтверждена сопоставительным анализом расчётных и опытных данных, что представляется наилучшим способом установления истины.

Отметим, что подобного рода проверка работоспособности предлагаемой формулы частично уже производилась. Соответствующие результаты сопоставления с опытами при гладких стенках МИИГС (новые стальные и алюминиевые трубы), а также для квадратичной зоны сопротивления (опыты Ф. А. Шевелева) опубликованы в [2]. Кроме того, выполнены сопоставления расчетов с опытными данными И. Никурадзе (для гладких и шероховатых труб) [3]. С той же целью в работе [3] использовались опытные данные М. За-

Исходные данные для сопоставления распределения осреднённых скоростей в напорных каналах

Жидкость	Масло	Вода	Вода	Воздух
Литература	[9]	[13]	[14]	[12]
Re_H	4650	5740	36700	113000
$2H$, мм	220,0	48,8	48,8	127,0
ν , мм ² /с	6,0	1,0	1,0	15,0

Полученные по предлагаемой методике параметры потоков в напорных каналах

Re_d	$\frac{H}{\delta_{CT}}$	$\frac{\delta_{CT}}{H}$	a	A	$\frac{u_{CT}}{u^*}$	$\frac{V}{u^*}$	$\frac{u_m}{u^*}$	$\frac{V}{u_m}$	λ	D
4650	2,407	0,415	110,70	0,4154	22,55	17,45	23,58	0,740		6,14
5740	3,408	0,2935	94,10	0,2935	19,69	17,90	21,82	0,820	0,00624	3,92
36 700	21,91	0,0456	76,25	0,1808	16,82	21,97	24,57	0,894	0,00414	2,60
113 000	61,44	0,0163	75,17	0,1757	16,68	24,47	27,07	0,904	0,00334	2,60

Расчетные параметры потоков в опытах Лауфера в напорном канале шириной $2H = 12,7$ см

$2H$, см	Re_H	$\frac{H}{\delta_{CT}}$	$\frac{\delta_{CT}}{H}$	a	A	$\frac{u_{CT}}{u^*}$	$\frac{V}{u^*}$	$\frac{u_m}{u^*}$	$\frac{V}{u_m}$	λ	D
12,7	27 600	16,83	0,0594	76,85	0,1843	16,91	21,34	23,94	0,891	0,00439	2,6
	54 500	31,51	0,0317	75,72	0,1780	16,75	22,84	25,44	0,898	0,00383	2,6

Значения безразмерных осреднённых скоростей для условий опытов Д. Лауфера

Re_H	27 600	$\frac{r}{r_0}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
		$\frac{u}{u_m}$	0,756	0,819	0,861	0,898	0,929	0,955	0,974	0,989	0,997	1,000
	54 500	$\frac{r}{r_0}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
		$\frac{u}{u_m}$	0,764	0,823	0,864	0,901	0,931	0,956	0,975	0,989	0,997	1,000

гаролы в аэродинамической трубе в широком диапазоне чисел Рейнольдса (до $35 \cdot 10^6$), а также опытные данные Д. Остерлунда с погранслойнными течениями. Результаты сопоставления можно оценить как очень хорошие.

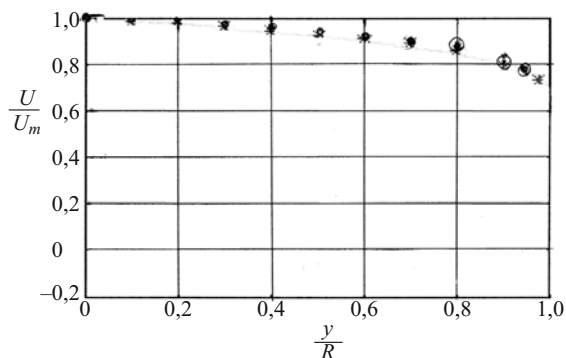


Рис. 1. Профиль осредненной скорости в трубе при $Re_d = 3\ 200\ 000$, $\nu = 0,75\ \text{мм}^2/\text{с}$, $V = 24,3\ \text{м/с}$, $d = 100\ \text{мм}$, * — опыт, \odot — расчет

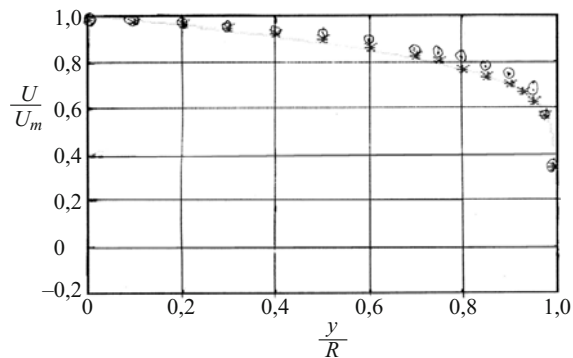


Рис. 2. Профиль осредненной скорости в трубе для воздуха при $Re_d = 40\ 200$, $\nu = 15\ \text{мм}^2/\text{с}$, $V = 2,44\ \text{м/с}$, $d = 247\ \text{мм}$, * — опыт, \odot — расчет

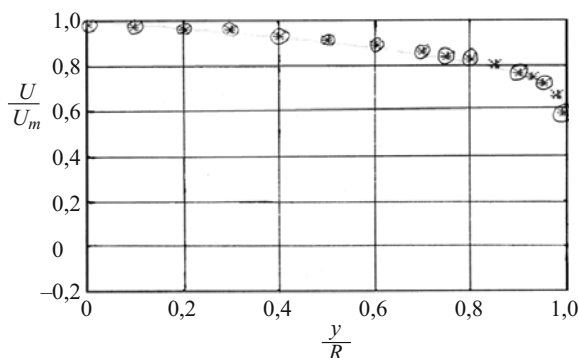


Рис. 3. Профиль осредненной скорости в трубе при $Re_d = 420\ 000$, $\nu = 15\ \text{мм}^2/\text{с}$, $V = 25,51\ \text{м/с}$, $d = 247\ \text{мм}$, * — опыт, \odot — расчет

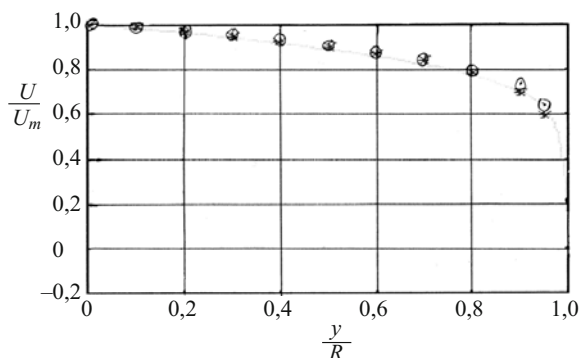


Рис. 4. Профиль осредненной скорости в трубе для сахарного раствора при $Re_d = 26\ 000$, $\nu = 37,3\ \text{мм}^2/\text{с}$, $V = 3,812\ \text{м/с}$, $d = 25,4\ \text{мм}$, * — опыт, \odot — расчет

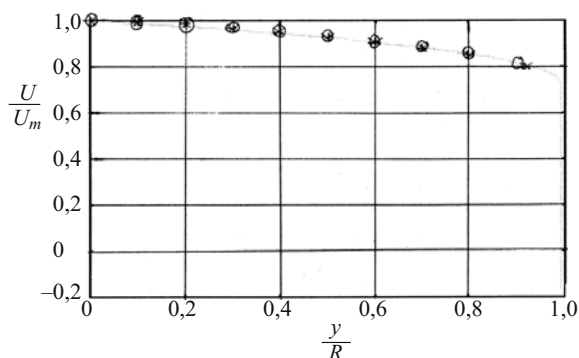


Рис. 5. Профиль осредненной скорости в трубе для натурального газа при $Re_d = 7\ 000\ 000$, $\nu = 0,2425\ \text{мм}^2/\text{с}$, $V = 16,6\ \text{м/с}$, $d = 102,26\ \text{мм}$, * — опыт, \odot — расчет

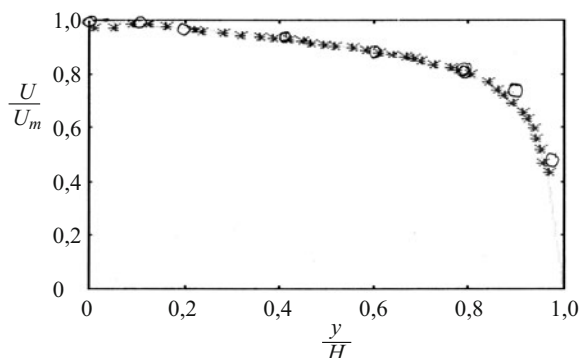


Рис. 6. Профиль осредненной скорости в плоском напорном канале для воды при $Re_d = 36\ 700$, $\nu = 1\ \text{мм}^2/\text{с}$, $V = 0,663\ \text{м/с}$, $2H = 48,8\ \text{мм}$, * — опыт, \odot — расчет

Сопоставления были продолжены. В работе [4] опубликованы данные сравнения расчетов с опытами П. Приноса и А. Цериса, выполненных для потоков со свободной поверхностью как в спокойном, так и в бурном состоянии. Там же использовались опытные данные А. Томинаги и И. Незу, В. Роди и И. Незу со спокойными и бурными потоками, данные А. Х. Кардосо и Г. Гаста, Х. Эккельмана (масло в канале конструкции Рейхарда), а также А. Гюнтера в напорном прямоугольном канале, Д. Сабота в круглой трубе. Во всех случаях результаты расчетов и опытов находятся в хорошем согласии.

Ниже приводятся дополнительные результаты указанного сопоставительного анализа. С этой целью использовались наиболее известные результаты экспериментальных исследований ряда авторов, расширяющие диапазон используемых жидкостей и видов продольно однородных течений. В частности, применительно к течениям в гладких трубах были заимствованы данные, сведения о которых приведены в табл. 1, где представлены характеристики используемых жидкостей.

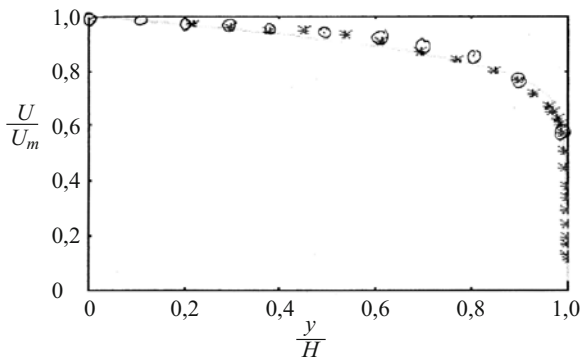


Рис. 7. Профиль осредненной скорости в плоском напорном канале для воздуха при $Re_d = 113\ 000$, $\nu = 15\ \text{мм}^2/\text{с}$, $V = 13,35\ \text{м/с}$, $2H = 127\ \text{мм}$, * — опыт, \odot — расчет

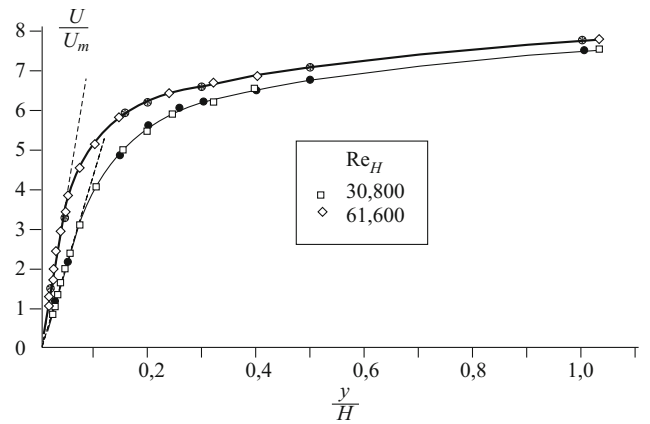


Рис. 8. Сопоставление расчетных и опытных данных по Лауферу при $Re_H = 27\ 600$ и $54\ 500$ в пристенной зоне

В табл. 2 представлены расчетные параметры потоков.

Табл. 3 содержит расчетные и опытные значения осреднённых скоростей.

Для наглядности эти данные сопоставляются на рис. 1 – 5.

Аналогичные результаты получены и для напорных широких прямоугольных каналов высотой $2H$. Число Рейнольдса для них определяется формулой

$$Re_H = \frac{VH}{\nu}. \quad (3)$$

Данные размещены в табл. 4, 5 и на рис. 6, 7.

Представляется, что приведённые результаты сопоставительного анализа работоспособности предложенного в статье [1] метода расчета распределения осреднённых скоростей в продольно-однородных потоках наглядно демонстрируют высокую степень совпадения расчетных данных с опытом как в случае круглых труб, так и плоских напорных каналов.

Кроме использованных выше опытных данных были привлечены данные опытов Д. Лауфера [8], считающиеся классическими. В работе [8] значение числа Рейнольдса выражено через максимальную скорость, поэтому пришлось пересчитать его на среднюю скорость. При этом было учтено приведенное Д. Лауфером соотношение $u_* = 0,4254\ \text{м/с}$ для $H = 12,7\ \text{см}$. Принимая дефицит средней скорости равным $D = 2,6$, получим $V = u_m - Du_* = u_m(1 - 2,6 \cdot 0,425) = 0,8865u_m$.

Поэтому

$$Re_{H,V} = \frac{u_m \cdot H}{\nu} \cdot 0,8865 \text{ — при } H = 12,7\ \text{см}.$$

Полученное число $Re_{H,V} = 61600 \cdot 0,8865 = 54500$ принималось за расчетное. Отношение высоты канала к его ширине составляло 12:1, так что условия двумерности течения выполнялись.

Для второй серии опытов $Re_{H,V}$ составляло

$$Re_{H,V} = 3080 \cdot 0,8865 = 27600.$$

Расчетные параметры потоков в опытах Лауфера в напорном канале приведены в табл. 6.

Расчетные значения безразмерных (отнесенных к максимальной скорости) осреднённых скоростей приведены в табл. 7.

Сопоставление расчетных и опытных данных приведено на рис. 8, 9.

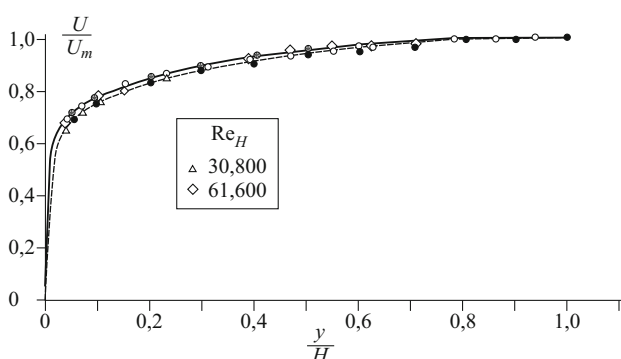


Рис. 9. Сопоставление расчетных и опытных данных по Лауферу при $Re_H = 27600$ и 54500

Выводы

1. Приведенные данные проверки приемлемости предложенной в работе [1] методики расчета распределения осреднённых скоростей в продольно однородных потоках значительно расширяют диапазон используемых с этой целью опытных данных.

2. Несмотря на отсутствие в предлагаемых формулах для распределения осреднённых скоростей каких либо поправок, они с высокой точностью описывают профили скоростей как в круглых трубах, так и в плоских напорных каналах и потоках со свободной поверхностью.

Список литературы

1. *Высоцкий Л. И., Высоцкий И. С.* О гидравлическом расчете осредненных параметров турбулентных течений в круглых трубах и плоских каналах // Гидротехническое строительство. 2009. № 1. С. 42 – 48.
2. *Высоцкий Л. И.* Один подход к расчету распределения температуры в турбулентных потоках // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2001. С. 4 – 87.
3. *Высоцкий Л. И.* Построение сквозной для всех зон сопротивления формулы для распределения осредненных скоростей в продольно — однородных турбулентных потоках // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений: Межвуз. научн. сб. — Саратов: СГТУ, 2005. С. 7 – 63.
4. *Высоцкий Л. И.* Плоские продольно-однородные течения // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений: Межвуз. научн. сб. — Саратов: СГТУ, 2007. С. 4 – 70.
5. *Высоцкий Л. И., Высоцкий И. С.* Явление возникновения течения с отрицательной турбулентной вязкостью в продольно-однородном турбулентном потоке жидкости // Научные открытия 2009. Сборник кратких описаний, научных открытий, научных гипотез. — М.: РАЕН, 2010. С. 25 – 27.
6. *Bogue D. C., Metzner A. B.* Velocity profiles in turbulent pipe flow // Ind. Ang Eng. Chem. Fundamentals. V. 2. № 2. 1963. P. 143.
7. *Brekhovskikh L. M., Goncharov V. V.* Mechanics of continua and wave dynamics // Springer-Verlag, Berlin, 1994.
8. *Brodkey R., Wallace J., Brodkey R., Eckelmann H.* Some properties of truncated turbulence signals in bounded shear flows // J. Fluid mech. 1974. 63, 09 – 224.
9. *Eckelmann H.* The structure of the viscous sublayer along a smooth boundary // J. Fluid Mech. 1974. V. 65. Part 3.
10. *Karnik U.* Measurements of the turbulent structure dawnstream off a tube bundll at high Reynolds numbers // J. Fluid Eng. V. 116. 1994. P. 848.
11. *Landau L. D., Lifshitz E. M.* Fluid mechanics, Pergamon Press, Oxford, 1987.
12. *Laufer J.* Investigation of turbulent flow in a two — dimensional // Natl. advisoru Comm. Aeronaut. Tech. Repts. № 1053. 1951.
13. *Liu Z. C., Adrian R. J., Hanratty T. J.* A study of streaky structure in a turbulent channel flow with particle image velocimetry // V Institutes. Symposium on applied of laser technology to Fluid Mechanics. Lisbon. 1996. P. 171 – 179.
14. *Niederschulte M. A., Adrian R. J., Hanratty T. J.* Measurements of turbulent flow in a channel at low Reynolds numbers // Exp Fluids 9: 1990. P. 222 – 231.
15. *Nikuradse J.* Forschung aufden Gebeite des Ingenierrwesens. 1932. End. B.3. Sept — oct. Regularitu of turbulent flow in smooth pipes // Translation in Purdue Research Foundation Tech. Memo. PUR — 11. 1949.

Были ли повышенные колебания второго гидроагрегата до аварии на Саяно-Шушенской ГЭС 17 августа 2009 г.?

Селезнев В. С., директор, Лисейкин А. В., ведущий геофизик (ГС СО РАН),
Громыко П. В., геофизик (СФ ГС СО РАН)

Анализируются сейсмические колебания, излучаемые гидроагрегатами Саяно-Шушенской ГЭС до, в момент и после аварии в августе 2009 г.

Ключевые слова: авария на Саяно-Шушенской ГЭС 17 августа 2009 г., колебания второго гидроагрегата, сейсмические записи, амплитуды колебаний.

Дискуссии о том, были ли перед аварией на Саяно-Шушенской ГЭС повышенные вибрации на втором гидроагрегате реально или неисправный прибор показывал повышенные значения, продолжаются до сих пор [1 – 6]. Странным кажется то обстоятельство, что из показаний десяти датчиков системы виброконтроля только на одном (датчик радиальных вибраций турбинного подшипника) значения вибраций превышают норму.

Можно ли сейчас попытаться решить этот вопрос? Теоретически можно. Будем рассуждать следующим образом. В 4,43 км от Саяно-Шушенской ГЭС есть сейсмологическая станция “Черемушки” (рис. 1). Записи колебаний за последние годы в цифровом виде сохранены. Все события за годы до аварии, в момент аварии и запуски гидроагрегатов после аварии, на них отражены. Изучая записи колебаний, полученных на сеймостанции и на временных станциях, установленных во время запуска после аварии новых гидроагрегатов, мы видим, что некоторые колебания, излучаемые гидроагрегатом, хорошо регистрируются как вблизи гидроагрегата, так и на сеймостанции. Попытаемся изучить эти колебания. Любые изменения в режиме работы гидроагрегата хорошо видны и на станции, установленной вблизи гидроагрегата, и на станции “Черемушки”. Есть проблема: перед аварией работал не один, а девять гидроагрегатов (включая второй). Как определить вклад каждого, если они ра-

ботали на одной и той же частоте? Попытаемся выделить те участки записи, где работали все гидроагрегаты, кроме второго, в одном и том же режиме, а потом выделим те участки, где работали эти же агрегаты плюс второй. За два года работы таких ситуаций было много. Проанализируем эти записи и поймем, как изменялась интенсивность сейсмических колебаний от второго гидроагрегата с течением времени, в том числе и перед аварией.

Для анализа сейсмических записей в ГС СО РАН разработана и запатентована [7, 8] методика обработки данных, позволяющая выделять из сейсмической записи источник колебаний определенной частоты и отслеживать изменения амплитуд колебаний с течением времени. Суть методики заключается в следующем. Для первоначального анализа зарегистрированных сейсмограмм используется методика построения текущих спектров (или спектрограмм). Принцип построения текущих спектров следующий: по сейсмической записи скользят временным окном, для каждого положения которого рассчитывается амплитудный спектр. Множество таких спектров образуют двумерное изображение, по одной координате которого откладывается текущее время, по другой – частота. Амплитудам спектров соответствует цветная шкала, большие амплитуды отображаются более яркими (например, красными) цветами, а низкие – более темными (например, синими). Текущий спектр позволяет на качественном уровне определить, как меняется амплитудно-частотный состав записи с течением времени, и выделять из всей записи источники определенной частоты. Для выполнения количественных оценок предлагается строить графики изменения амплитуд колебаний на фиксированных частотах по формуле

$$A_{\omega}(t) = \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right|,$$

где $f(\tau)$ – зарегистрированный сейсмический сигнал; ω – частота, для которой строится график; t – текущее время; T – интервал времени (окно), в котором опре-

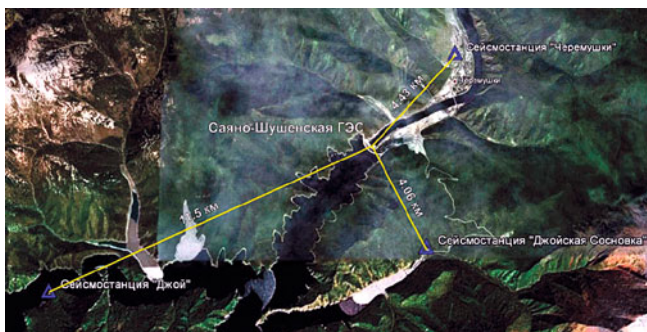


Рис. 1. Схема наблюдений станциями сейсмологической сети Саяно-Шушенской ГЭС, перед аварией работала только сеймостанция “Черемушки”

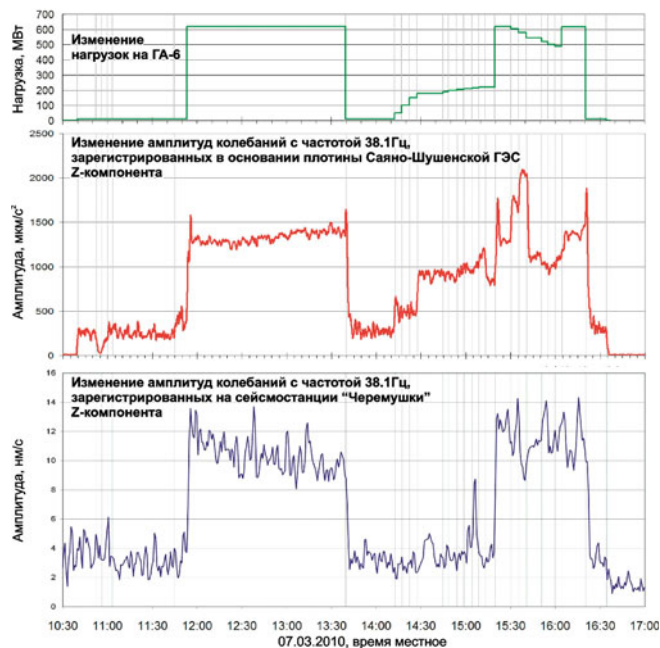


Рис. 2. Пример связи изменений режимов работы гидроагрегата № 6 с регистрируемыми колебаниями в основании плотины и на сейсмостанции “Черемушки”

деляется амплитуда (в нашем случае $T = 10$ с); $A_{\omega}(t)$, $|\dots|$ – модуль комплексного числа.

На рис. 2 показаны графики изменения амплитуд сейсмических колебаний на частоте 38,1 Гц (лопастная частота). Видно, что с увеличением нагрузки на гидроагрегате амплитуды колебаний возрастают, и эта особенность наблюдается и по регистрации в основании плотины Саяно-Шушенской ГЭС возле гидроагрегата № 6 и на удалении 4,43 км от ГЭС на сейсмостанции “Черемушки”. Таким образом, даже имея записи только с удаленной сейсмической станции (такая ситуация была перед аварией), можно отслеживать работу гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС.

Исследования по совместному анализу данных регистрации сейсмостанции “Черемушки” и данных по изменениям режимов работы гидроагрегатов за сутки до аварии показали следующее. Изменения режимов работы гидроагрегатов фиксируются на графиках изменения амплитуд колебаний на “лопастной” частоте 38,1 Гц: увеличение нагрузки гидроагрегатов сопровождается ростом амплитуд колебаний. При этом регистрируемый сигнал формировался в результате совместного влияния работы девяти действовавших гидроагрегатов. Для выделения из регистрируемого сигнала составляющей, связанной с работой только ГА-2, был произведен следующий прием обработки. За время наблюдений были выделены и проанализированы два временных интервала: интервал 1 (16.08.2009 с 22:00 по 23:00) и интервал 2 (с 16.08.2009 23:48 по 17.08.2009 00:19), на которых каждый из гидроагрегатов, кроме второго, работал с постоянной нагрузкой. На первом интервале ГА-2 был остановлен, на втором — работал под нагрузкой 600

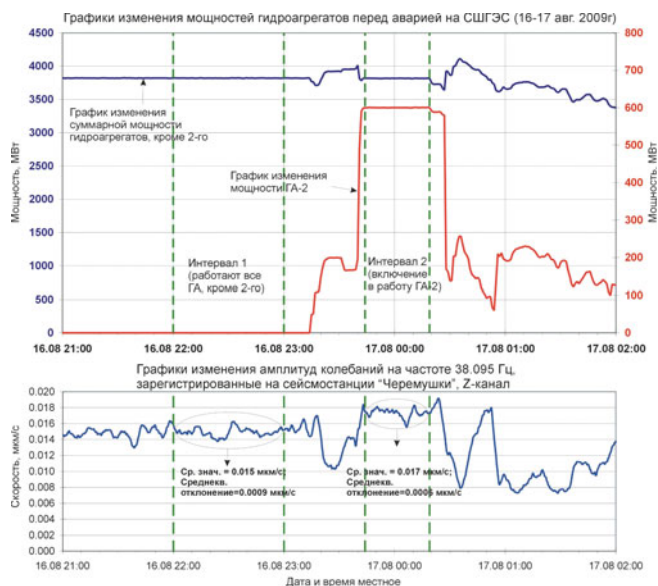


Рис. 3. Анализ колебаний второго гидроагрегата на “лопастной” частоте 16 – 17 августа 2009 г.

МВт. По данным регистрации сейсмостанции “Черемушки” были рассчитаны средние значения и дисперсии амплитуд колебаний на частоте 38,1 Гц для первого и второго интервала.

Выяснилось, что дисперсия колебаний в интервалах 1 и 2 практически не изменилась и составила 0,0006 мкм/с. Таким образом, можно заключить, что при включении в работу ГА-2 не произошло аномально высоких выбросов в амплитудах колебаний по сравнению с выбросами, связанными с работой остальных гидроагрегатов. Также установлено, что средние значения амплитуд колебаний возрастают на 0,002 мкм/с от интервала 1 к интервалу 2, и эта величина является составляющей зарегистрированных колебаний, связанной с работой только ГА-2 (по состоянию на 16 – 17 августа 2008 г.).

Итак, за сутки до аварии на Саяно-Шушенской ГЭС по данным регистрации на сейсмостанции “Черемушки” не наблюдалось “аномальных” изменений амплитуд колебаний, связанных с работой аварийного гидроагрегата (воздействия от ГА-2 не отличались от воздействий других гидроагрегатов). Это, в свою очередь, может свидетельствовать в пользу того, что физическое состояние ГА-2 16 – 17 августа 2009 г. оставалось стабильным.

Проведены исследования по анализу данных с сейсмостанции “Черемушки” за период с 1 января 2009 г. до момента аварии 17 августа 2009 г. Рассмотрены сейсмические записи, охватывающие интервалы до ремонта гидроагрегата № 2, месяц после ремонта и в течение одного месяца до момента аварии. Выделены и проанализированы две особенности зарегистрированного волнового поля, которые связаны с работой оборудования Саяно-Шушенской ГЭС:

1. До аварии в волновом поле уверенно выделялись колебания с частотой 2,381 Гц (оборотная частота гидроагрегатов). По записям сейсмостанции на

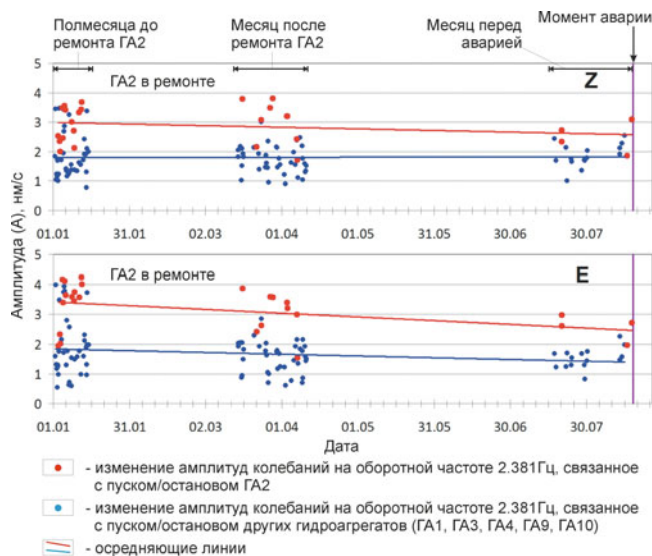


Рис. 4. Графики изменения значений амплитуд колебаний на оборотной частоте, зарегистрированных сейсмостанцией “Черемушки” в моменты пуска или останова гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС

этой частоте наблюдались ступенчатобразные скачки амплитуд, соответствующие по времени моментам пуска или останова ГА-2, а также других агрегатов (ГА-1, ГА-3, ГА-4, ГА-9 и ГА-10). Амплитуды скачков, соответствующие пуску или останову ГА-2 за все рассмотренные промежутки времени примерно в 1,5 раза выше, чем на остальных гидроагрегатах. При этом не отмечено роста амплитуд этих скачков непосредственно перед аварией (рис. 4).

Следует отметить, что гидроагрегат № 2 был введен в эксплуатацию одним из первых, причем определенный период времени работал на пониженных напорах. Замечено, что еще в строительный период гидроагрегат № 2 испытывал более высокие значения вибрационных воздействий, чем другие гидроагрегаты Саяно-Шушенской ГЭС. Однако амплитуды вибраций за весь период эксплуатации не превышали нормативных значений [9].

2. За 5 мин до аварии наблюдалось повышение амплитуд колебаний на низких частотах (до 5 Гц). Эта особенность наблюдалась многократно до момента аварии. Установлено, что колебания возникали на определенных частотах, которые совпадают с собственными частотами колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Амплитуды колебаний, наблюдаемые непосредственно перед аварией, в целом выше средних значений, однако не максимальные (рис. 5). Установлено, что они возникают при определенных режимах работы гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС: за месяц до аварии при нагрузках 560 – 580 МВт; в течение полумесяца после ремонта ГА-2 при нагрузках 475 – 525 МВт. Также показано, что эта особенность связана не только с работой гидроагрегата № 2; подобные низкочастотные колебания возникали и в тех

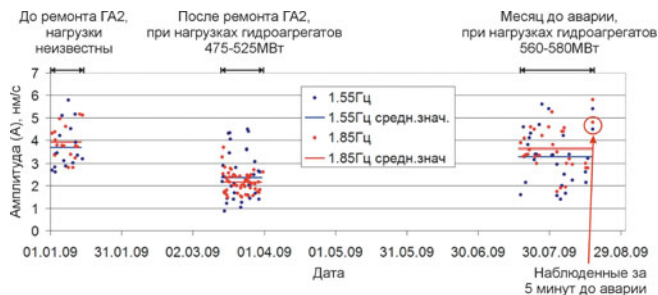


Рис. 5. График амплитуд колебаний, наблюдаемых на сейсмостанции “Черемушки” при определенных нагрузках гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС

случаях, когда агрегат был остановлен, но работали другие.

Выводы

Экспериментально установлено, что перед аварией 17 августа 2009 г. на сейсмограммах сейсмостанции “Черемушки” наблюдались особенности, которые связаны с работой гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС (как аварийного ГА-2, так и других гидроагрегатов). Однако такие же особенности наблюдались неоднократно и до момента аварии (проведен анализ начиная с 1 января 2009 г.). Аномалий, которые бы свидетельствовали о нештатной работе ГА-2 (или других гидроагрегатов) непосредственно перед аварией, по записям сейсмостанции “Черемушки” не выявлено.

Список литературы

1. Акт технического расследования аварии, произошедшей 17 августа 2009 года в филиале “РусГидро” — “Саяно-Шушенская ГЭС имени П. С. Непорожного” / Федеральная служба по экономическому, технологическому и атомному надзору. 2009 // [http://ru.wikisource.org/wiki].
2. Ключач А. А. О вибрации на агрегате № 2 СШГЭС до аварии. Дискуссия // [http://tayga.info/details/2011/02/02/~102283] – 2 февраля 2011 г.
3. Курзин В. Б., Селезнев В. С. О механизме возникновения высокого уровня вибраций турбин Саяно-Шушенской ГЭС // Прикладная механика и техническая физика. 2010. Т. 51. № 4. С. 166 – 175.
4. Лобановский Ю. Продолжение полемики об аварии на СШГЭС или Миф о Саянской катастрофе-2 // [http://tayga.info/details/2011/01/04/~101924] – 4 января 2011 г.
5. Рассохин Г. Авария на Саяно-Шушенской ГЭС: реальность и мифы // [http://www.plotina.net/sshges-rassokhin-3/] – 23 ноября 2011 г.
6. Рассохин Г. Гидродинамические факторы аварии на Саяно-Шушенской ГЭС // [http://www.plotina.net/sshges-rassokhin-5/] – 25 марта 2012 г.
7. Селезнев В. С., Еманов А. Ф. Пересчет волновых полей головных волн фильтрами Винера // Геология и геофизика. 1998. № 4. С. 33 – 40.
8. Селезнев В. С. Симфония катастроф // Наука из первых рук. 2010. № 3. С. 35 – 37.
9. Брызгалов В. И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций. — Красноярск: Сибирский ИД “Суриков”, 1999. 562 с.

5 июня 2012 г. в г. Киото, Япония, в период проведения 80-го Ежегодного собрания и 24-го Конгресса Международной комиссии по большим плотинам ведущие водохозяйственные и гидроэнергетические ассоциации:

Международная комиссия по большим плотинам (The International Commission on Large Dams — ICOLD);

Международная комиссия по ирригации и дренажу (The International Commission on Irrigation and Drainage — ICID);

Международная гидроэнергетическая ассоциация (The International Hydropower Association — ИНА);

Международная ассоциация водных ресурсов (The International Water Resources Association — IWRA)

— приняли Всемирную декларацию по водообеспечению в целях устойчивого развития человечества, текст которой приводится ниже.

Редколлегия журнала
“Гидротехническое строительство”

Всемирная декларация “Водообеспечение для устойчивого развития”

Введение

В 2050 г. население земного шара, вероятно, превысит 9 млрд. человек. Глобальное увеличение численности населения как в сельских местностях, так и в городах, всеобщее повышение жизненных стандартов неизбежно ведут к возрастанию потребности в пресной воде, обеспечении продовольствием и к росту потребления энергии.

Продолжится концентрация населения в городах, где потребность в воде, продовольствии и энергии становится все более острой.

Рост населения, а также ускоренное социально-экономическое развитие приведут к 2050 году к следующим последствиям.

Постоянное повышение требований к обеспечению водой, продовольствием и энергией приводит к сокращению запасов природных ресурсов. Мы должны реагировать на эти изменения, поскольку в то же время происходит следующее.

Благодаря изменению климата распределение водных ресурсов становится более неравномерным и опасность катастроф, вызванных паводками и засухами, будет возрастать.

Запасы используемых источников энергии в природе конечны.

Использование ископаемых углеводородов (уголь, нефть, газ) приводит к загрязнению атмосферы и выделению парниковых газов; к тому же запасы их в природе ограничены.

Использование атомной энергии ограничено в промышленно развитых странах, обладающих технологией ее применения для выработки электроэнергии; сомнения в безопасности использования

атомной энергии приводят к росту протестов населения против широкого ее использования.

Использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии, таких как энергия ветра и солнечная энергия, представляет большой интерес и должно развиваться с максимальной интенсивностью, однако оно связано с необходимостью учета дискретного характера выдачи энергии и необходимостью ее резервирования.

Гидроэнергетика могла бы сыграть роль регулятора мощности и выработки электроэнергии в системе, однако политические и экономические факторы не поощряют ее к этому.

Вода является величайшей ценностью; значение сооружений, обеспечивающих ее накопление и сохранение, будет непрерывно возрастать.

Гидротехнические сооружения, обеспечивающие комплексное использование водных ресурсов, имеют жизненную ценность для развития человечества. Из 40 000 км³ пресной воды, образующейся на поверхности Земли каждый год, только 9000 км³ доступны для использования в настоящее время. Путем создания более 50 000 больших плотин и многочисленных маленьких водохранилищ, построенных за последние 5000 лет, многие населенные пункты получили возможность надежного водообеспечения. Эти гидротехнические сооружения обеспечивают регулирование потребления около 4000 км³ воды в год.

Роль плотин и водохранилищ в обеспечении устойчивого развития общества отражена в ряде деклараций:

World Summit Sustainable Development (2002);

Beijing Declaration on Hydropower and Sustainable Development (2004);

World declaration “Dams and Hydropower for African Sustainable Development” (2008);

Ministerial Declaration of the Fifth and Sixth World Water Fora (2009 – 2012).

В настоящее время человечество столкнулось с проблемами водообеспечения, которые никогда не возникали в прошлом.

Перед лицом величайшего вызова XXI века — необходимости обеспечения устойчивого развития водообеспечения — мы должны укреплять существующую систему, а также развивать дальнейшее строительство гидротехнических сооружений. Это, в свою очередь, потребует адекватного развития законодательной и нормативно-методической базы, а также обеспечения необходимого финансирования. Разрабатываемые мероприятия должны включать также оптимизацию потребления воды путем многоцелевого ее использования в следующих целях:

регулирование паводков и снижение последствий засухи;

ирригация для обеспечения сельскохозяйственного производства пищевых продуктов;

производство энергии, главным образом электроэнергии;

обеспечение населения питьевой водой, а также водой для санитарных нужд и рекреации;

промышленное водоснабжение;

судоходство и навигация;

другие цели.

Имеется необходимость повышения контроля за состоянием и эксплуатацией существующих водохозяйственных сооружений.

Принимая во внимание процессы старения гидротехнических сооружений, рост уровня знаний вследствие научно-технического прогресса, а также происходящее изменение климата на Земле, необходимо усилить контроль за состоянием существующих водохозяйственных сооружений. Например, современные средства мониторинга дают возможность непрерывной оценки состояния гидросооружений для обеспечения их безопасности при катастрофических землетрясениях и экстремальных паводках. Изменение климата, вероятно, может осложнить процессы регулирования работы водохранилищ вследствие изменения гидрологических параметров. В современных условиях оптимизация работы водохранилищ должна быть направлена на задержание большего количества паводковых вод в них с обязательным учетом потребностей территорий в верхнем и нижнем бьефах гидроузлов.

Наличие современных контрольных систем и возможность получения результатов наблюдений в

режиме реального времени позволяют устанавливать уровни водохранилища, обеспечивающие наилучший баланс между безопасной эксплуатацией гидротехнических сооружений и рациональным использованием водных ресурсов.

Имеется необходимость ускорить строительство новых водохозяйственных сооружений для комплексного многоцелевого использования водных ресурсов.

Регулирование паводков и снижение последствий засухи.

Катастрофические паводки и засухи являются основными проблемами регулирования водных ресурсов для многих стран с недостаточно развитой инфраструктурой водохозяйственных гидротехнических сооружений. Каждый год более 200 млн. человек подвергаются воздействию разрушительных паводков. Благодаря изменению климата катастрофические паводки и засухи повторяются более часто и становятся все более разрушительными. Создание водохозяйственной инфраструктуры является ключевой компонентой в предотвращении водных катастроф, особенно в развивающихся странах.

Ирригация для обеспечения сельскохозяйственного производства пищевых продуктов.

Сельскохозяйственные территории, занятые ирригацией, составляют около 277 млн. гектар, или 18 % всех площадей пахотных земель. Ирригация делает сельскохозяйственные земли более продуктивными, на них занято около 40 % всех работающих в сельском хозяйстве и производится более 30 % с/х продукции.

Согласно распределению населения на земном шаре большее количество производимых в мире пищевых продуктов должно приходиться на регионы с продолжительными засушливыми сезонами. Поскольку размеры пахотных земель в этих регионах ограничены, повышение эффективности сельского хозяйства может быть достигнуто путем расширения ирригационных площадей. Подсчитано, что 80 % всех пищевых продуктов, необходимых для увеличившегося населения Земли, может быть получено только за счет мелиорации и ирригации земель.

Производство электроэнергии.

Гидроэлектростанции вырабатывают в настоящее время около 16 % всей электроэнергии в мире. Более 50 % от всей национальной выработки энергии вырабатывают гидроэлектростанции в 65 странах, более 80 % — в 32 странах и полностью обеспечивают электроснабжение гидроэлектростанции в 13 странах. Высокая оперативность выработки электроэнергии этим возобновляемым источником энергии является определяющей при выборе системы энергоснаб-

жения и соответствия параметров регулирования этой энергосистемы требованиям заказчика. При этом должны учитываться возможности развития других возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергия и энергия ветра, выработка электроэнергии которыми более дискретна и больше зависит от природных условий. Таким образом, запасенная водой энергия, превращенная в электроэнергию на гидроэлектростанциях и гидроаккумулирующих электростанциях, улучшает надежность энергосистем наиболее эффективным способом без загрязнения окружающей среды.

В настоящее время степень использования экономически эффективных гидроэнергетических ресурсов в мире составляет всего 30 %. Превращение неиспользуемого гидропотенциала в реальную электроэнергию даст возможность сократить потребление ископаемого углеводородного топлива, снизив тем самым выделение парниковых газов, и улучшить управление водными ресурсами.

Обеспечение населения питьевой водой, а также водой для санитарных нужд и рекреации.

Один из восьми человек на земном шаре не имеет в настоящее время достаточного количества питьевой воды, а также воды для обеспечения санитарных нужд. С учетом прогнозируемого роста населения планеты, при отсутствии серьезных мероприятий по водосбережению и строительству водохозяйственных сооружений, количество людей, не имеющих достаточного доступа к пресной воде, достигнет 4,2 миллиарда человек к 2025 году.

Одной из главных целей развития человечества в текущем тысячелетии (Millennium Development Goals) названо сокращение вдвое количества населения, не имеющего свободного доступа к пресной воде к 2015 году. Капиталовложения в интенсивное развитие водного хозяйства в развивающихся странах, выделяемые регулярно, помогут в достижении этой цели.

Промышленное водоснабжение.

В процессе изготовления каждый производственный продукт нуждается в пресной воде. В промышленности вода используется для различных целей, таких как мытье, растворение и разбавление, охлаждение и транспорт производственной отрасли промышленности. Среди отраслей промышленности, потребляющих большое количество воды, предприятия по приготовлению пищевых продуктов, целлюлозно-бумажные комбинаты, химические и нефтеперерабатывающие заводы, горно-обогатительные комбинаты, развитие которых повысит ценность природных ресурсов развивающихся стран.

Устойчивое и надежное водоснабжение является неременным условием для создания подобных предприятий.

Судоходство и навигация.

Перевозка грузов внутри страны водным транспортом имеет ряд экономических и экологических преимуществ по сравнению с наземным и воздушным транспортом. Перевозка грузов по водным путям особенно эффективна в случаях больших объемов массовых грузов (строительные материалы), а также крупногабаритных грузов. Для этой цели страны развивают судоходство как по каналам, так и по естественным руслам рек. Контроль мониторинга эксплуатации водохозяйственных сооружений может играть важную роль при эксплуатации многоцелевых водохранилищ.

Защита окружающей среды

Сооружения водосберегающей инфраструктуры могут улучшить экологическое состояние рек за счет правильной эксплуатации, учитывающей воздействие на окружающую среду. В частности, в период маловодных сезонов может быть организован минимальный сброс воды, обеспечивающий необходимые условия для жизни водных животных и растительности. Более того, плотины и водохранилища стабилизируют уровень грунтовых вод на прилегающих территориях. Водоохранилища могут использоваться также для разведения в них новых видов животных и растений, а также для обводнения засушливых земель и лесов.

Мы, таким образом, призываем к объединению усилий по устойчивому развитию водосберегающей инфраструктуры.

Сегодня водохозяйственное и гидроэнергетическое строительство должно осуществляться с учетом обеспечения безопасности, экономичности и экологичности осуществляемых решений. Проблемы водообеспечения, обеспечения продовольствием и снабжения энергией связаны между собой сложной зависимостью и требуют совместного решения.

Основываясь на сложном межграницном характере источников водных ресурсов, мы призываем к сотрудничеству при оптимизации их использования, а именно:

продолжить сотрудничество между инвесторами, правительственными организациями, исследовательскими институтами, частными предпринимателями, гражданскими обществами, местными органами самоуправления и др. в целях создания и использования инфраструктуры для эффективного и устойчивого водообеспечения;

развивать использование трансграничных рек на основе унификации национальных законодательных и нормативных документов и правил для

Поздравление Альберту Дмитриевичу Осипову



23 октября 2012 г. исполнилось 85 лет со дня рождения известного специалиста в области бетона и технологии бетонных работ, заслуженного строителя РСФСР, лауреата премии Совета Министров СССР, автора и старейшего члена редколлегии журнала “Гидротехническое строительство” Альберта Дмитриевича Осипова.

В 1949 г. А. Д. Осипов окончил факультет “Мосты и тоннели” Тбилисского института инженеров железнодорожного транспорта. В 1966 г. защитил кандидатскую диссертацию.

За свою жизнь он накопил богатейший опыт: пять лет общестроительной практики и более сорока лет практики по узкой специализации – бетоны и технология бетонных работ, которой он посвятил себя, трудясь в Научно-исследовательском секторе института Гидропроект (сегодня — ОАО “НИИЭС”) в отделе исследований строительных материалов (1953 – 2000 гг.). Все эти годы, работая сначала в должности зав. отделением, а затем – зам. начальника и начальника отдела, Альберт Дмитриевич Осипов участвовал в проектировании и строительстве более 35 гидротехнических сооружений в СССР и за рубежом. Наиболее крупные из

них: Волго-Донской судоходный канал, Куйбышевская и Сталинградская ГЭС на Волге, Саяно-Шушенская на Енисее, Токтогульская ГЭС в Киргизии, Ингурская арочная плотина в Грузии, Асуанская плотина в Египте, ГАЭС Чаира в Болгарии, гидроузлы Мжара в Марокко и Капанда в Анголе.

Альберт Дмитриевич Осипов награжден орденами и медалями СССР. Многие годы он был членом комитета “Бетон для плотин” Международной комиссии по большим плотинам. А. Д. Осипов имеет ряд изобретений и является автором трех книг и более 100 журнальных статей. Сегодня он активно работает в составе авторитетной редколлегии нашего журнала.

обеспечения оптимального использования водных ресурсов и производства продуктов питания;

улучшать нормативные документы, применяемые для оценки экологических и социальных воздействий различных водосбросных сооружений, и предоставлять их заинтересованным организациям;

финансовым организациям сотрудничать со странами, нуждающимися в осуществлении водного регулирования, обеспечивать их национальное и региональное развитие путем применения инновационных финансовых механизмов.

Заключение

Вода есть жизнь; создание водосберегающей инфраструктуры является первоочередной целью для общества.

Инвестиции в водосберегающие инфраструктуры есть инвестиции в экологически чистую экономику.

Осуществление этих мероприятий может значительно смягчить воздействия, связанные с изменением климата.

В условиях нарастающей потребности в воде, продовольствии и энергии настало время разработать меры, обеспечивающие более равномерное использование водных ресурсов, особенно в развивающихся странах, ввести в действие необходимые политические соглашения.

Для обеспечения устойчивого развития требуется балансированный подход, учитывающий возможности крупных, средних и мелких водохранилищ с минимизацией негативных последствий.

Организации, подписавшие настоящую Декларацию, приглашают к сотрудничеству всех партнеров и инвесторов, разделяющих эти общие взгляды и подходы.

Поздравление Григорию Михайловичу Каганову

Исполнилось 80 лет профессору, Заслуженному деятелю наук РФ, доктору технических наук Григорию Михайловичу Каганову.

После окончания в 1955 г. МИСИ он начал свою трудовую деятельность на строительстве Братской ГЭС мастером, прорабом, ведущим инженером в проектной конторе Братскгэстроя.

Г. М. Каганов является крупным ученым, ряд научных разработок которого реализован при обосновании безопасности уникальных плотин комплексного назначения в период их проектирования, строительства и эксплуатации в СССР и РФ – Саяно-Шушенской, Ингурской, Нурекской, Братской, Усть-Илимской, Андижанской, Кировской, Богучанской, Краснодарского гидроузла и др.; зарубежных – Антонивановцы (Болгария), Аль-Багдади (Ирак), Тери (Индия), (Вьетнам); гидротехнических сооружений АЭС – Кудам - Кулан в Индии и др.

Г. М. Каганов участвовал в экспертизах крупнейших гидроузлов, проводимых Госпланом и Госстроем СССР и РФ, Минэнерго, Минводхозом, МПР, Роскомводом, РусГидро, Гидропроектом и др., в том числе и в экспертизах ряда зарубежных гидроузлов. Он принимает активное участие в работе экспертной комиссии РусГидро, созданной после аварии на Саяно-Шушенском гидроузле для анализа безопасности плотины, в анализе состояния сооружений Богучанского и Краснодарского гидроузлов. Им разработаны предложения и выполнен комплекс расчётов по обоснованию способов усиления плотины Саяно-Шушенского гидроузла.

Г. М. Каганов являлся одним из инициаторов создания в РФ системы обеспечения безопасности гидротехнических сооружений. Под его руководством выполнена первая в РФ инвентаризация гидросооружений, материалы которой были переданы в Правительство РФ. С учётом её результатов в дальнейшем разрабатывался Закон “О безопасности гидротехнических сооружений”. В качестве пилотного проекта по поручению МЧС выполнена первая в РФ Декларация безопасности Краснодарского гидроузла, отдельные идеи которой были учтены в соответствующем нормативном документе.

Г. М. Каганов участвовал в экспертизах и был руководителем ряда разработок основополагающих нормативно-правовых документов, касающихся обеспечения безопасности гидротехнических сооружений. Сформулировал важную государственную проблему обеспечения безопасности многочисленных низконапорных гидроузлов РФ, практически оказавшихся вне действия Закона “О безопасности гидротехнических сооружений”. Под его руководством разработан комплекс предложений, касающихся обеспечения безопасности бесхозных гидротехнических сооружений, а также сооружений, собственниками которых являются неплатежеспособные юридические лица.



Г. М. Каганов является одним из разработчиков в нашей стране оригинальной методики и технологии физического моделирования прочности гидросооружений. В последние годы завершена разработка теории моделирования прочности и устойчивости гидротехнических сооружений при их работе в упругой стадии и в стадии разрушения. На базе обширных расчётных и экспериментальных исследований сформулированы новые физические представления о влиянии ряда существенных факторов на безопасность гидросооружений; разработаны новые конструкции плотин, в том числе с применением эффективных материалов.

Г. М. Каганов внёс значительный вклад в подготовку высококвалифицированных кадров: были подготовлены и защищены 4 докторские диссертации, 13 кандидатских и 2 магистерские, подготавливаются к защите ещё 2 докторские диссертации. Он является автором многочисленных научных статей, а также книг, учебников, учебных пособий и справочников. Принимал активное участие в аттестации научных кадров, являясь членом диссертационного совета Московского государственного университета природообустройства и Российского университета дружбы народов. В течение ряда лет читал созданные им оригинальные курсы лекций аспирантам, проектировщикам, преподавателям институтов и др. Оказывает методическую помощь преподавателям и учёным вузов г. Москвы, регионов РФ и стран СНГ. Читает разработанный оригинальный спецкурс “Безопасность гидротехнических сооружений” сотрудникам министерств и ведомств, в том числе Ростехнадзора. Является автором ряда новых учебных программ.

Почётный работник водного хозяйства, профессор Г. М. Каганов ведёт большую научно-организационную работу, направленную на решение широкого круга проблем обеспечения безопасности гидротехнических сооружений. Он является вице-президентом Академии проблем водохозяйственных наук, действительным членом Российской академии естественных наук и Российской инженерной академии, членом Российского национального комитета по большим плотинам, членом НТС МПР и Московско-Окского бассейнового водного управления, Общественного совета Ростехнадзора. Принимает активное участие в работе ряда рабочих групп министерств и ведомств. Г. М. Каганов – член редколлегии журнала “Гидротехническое строительство”. Является руководителем Экспертного центра по экспертизе деклараций безопасности гидротехнических сооружений при Московском государственном университете природообустройства.

Сердечно поздравляем Григория Михайловича с юбилеем, желаем ему крепкого здоровья, счастья и творческих успехов.

Поздравление Виллену Сергеевичу Шангину

16 октября 2012 г. исполнилось 80 лет известному инженеру-гидротехнику, кандидату технических наук, одному из авторов разработки “токтогульского” метода укладки бетона, активному участнику успешного применения в практике отечественного гидротехнического строительства особо жёстких бетонов, уплотняемых способом укатки, Виллену Сергеевичу Шангину. Он родился в г. Кривой Рог Днепропетровской области. После окончания техникума работал мастером в строительном цехе металлургического завода в г. Макеевке Донецкой области.

В 1954 г. с отличием окончил гидротехнический факультет Ленинградского политехнического института и был направлен на строительство Куйбышевской ГЭС, где работал прорабом по возведению земляной плотины.

В 1956 – 1957 гг. служил в Советской Армии. После демобилизации в 1958 – 1961 гг. работал на строительстве Кременчугской ГЭС в проектной конторе руководителем группы, откуда был откомандирован в Управление строительства “Саратовгэсстрой” в должности начальника технического отдела.

С 1964 по 1987 г. его трудовая деятельность тесно связана с Управлением строительства “Нарын-гидрострой”, где наиболее полно проявились и были использованы его профессиональные знания и опыт, творческие и организаторские способности. Занимая последовательно должности главного технолога, заместителя главного инженера, главного инженера Управления строительства, Виллен Сергеевич сумел осуществить тесное, деловое, творческое сотрудничество и взаимопонимание со всеми участниками процесса строительства (подрядчик, субподрядчики, проектная организация, заказчик, научно-исследовательские институты и др.). Без такой схемы сложившихся взаимоотношений в условиях исключительно сложных природных условий строящихся ГЭС (топографических, инженерно-геологических, сейсмических, транспортных) успешно решать уникальные проблемы, повседневно возникающие в процессе строительства, было невозможно. За эти годы под его техническим руководством и при непосредственном участии в Киргизии были возведены Токтогульская, Курпсайская, Ташкумырская, Шамалдысайская, Атбашинская ГЭС, Папанский гидроузел, начато строительство Камбаратинской ГЭС-2 общей установленной



мощностью 3,1 млн. кВт. Был научно и экспериментально обоснован и нашёл успешное производственное подтверждение новый эффективный метод возведения бетонных плотин, получивший название “токтогульский”. При строительстве Курпсайской ГЭС в условиях жаркого климата была успешно решена проблема перевозки больших объёмов бетонной смеси на расстояние 40 км, что позволило отказаться от строительства бетонного завода на стройплощадке и в комплексе с другими

решениями сократить срок строительства ГЭС до 5 лет. По инициативе Виллена Сергеевича и под его руководством на строительстве был проведен широкомасштабный комплекс опытно-экспериментальных работ и исследований новой прогрессивной технологии бетонных работ способом укатки особожёсткой бетонной смеси. Результаты опытных работ позволили предусмотреть в проекте Ташкумырской ГЭС конструкцию плотины из укатанного бетона, что и было успешно реализовано при её возведении.

Дальнейшая деятельность Виллена Сергеевича связана с институтом “Гидропроект”, с участием в экспертизах проектов, в разработке проектов организации и производства работ целого ряда крупных гидроузлов, технических предложений по сложным проблемам строительства. Он является соавтором четырёх ведомственных технических условий по производству бетонных работ в гидротехническом строительстве. Неоднократно в качестве консультанта выезжал на строительство ГЭС за рубежом. В период 2005 – 2008 гг. работал в УК “Русал” в проекте “Рогунская ГЭС”.

С 2008 года на пенсии.

Виллен Сергеевич имеет звания “Заслуженный строитель Киргизской ССР”, “Заслуженный энергетик СНГ”, является лауреатом премии Совета Министров СССР, награждён орденами Октябрьской Революции, Красного Знамени, медалями “За трудовое отличие”, “За доблестный труд”, тремя медалями ВДНХ СССР. Он автор и соавтор более 20 публикаций по гидротехнической тематике, имеет семь свидетельств на изобретения, является членом редколлегии журнала “Гидротехническое строительство”.

Друзья и коллеги юбиляра сердечно поздравляют Виллена Сергеевича с 80-летием, желают ему крепкого здоровья и счастья.

Новости гидроэнергетики и гидротехники

Строительство Богучанской ГЭС

В течение сентября 2012 г. на строительстве Богучанской ГЭС было уложено 5639,5 м³ бетона, смонтировано 38,2 м³ сборного железобетона, 652 т металлоконструкций, гидромеханического и гидросилового оборудования.

После завершения строительных работ и монтажа кровли над агрегатом № 8 временная торцевая стенка машзала была передвинута на границу между агрегатами № 8 и № 9, что позволило развернуть работы на агрегате № 8. В машзале уложено 458 м² гранитных полов.

В начале сентября выполнен монтаж самого крупногабаритного и тяжелого элемента – ротора ГА № 6. Вес ротора 950 т, диаметр 14 м. Для его монтажа использованы оба крана машзала грузоподъемностью по 525 т каждый. Сборка ротора началась на монтажной площадке в первой половине июня и заняла два с половиной месяца. Параллельно в кратере гидроагрегата производилась сборка статора, вес которого составляет 425 т. Восемнадцатого сентября было смонтировано рабочее колесо ГА № 8. Диаметр его – 7,86 м, вес – 155,6 т.

25 сентября был проведен первый пробный пуск агрегата № 2 на холостом ходу. В течение нескольких минут агрегат работал на скоростях, равных 15, 25, 50 и 100% от нормативной скорости – 90,9 об/мин.

Строительство Загорской ГАЭС-2

На строительстве Загорской ГАЭС-2 начато сооружение напорного трубопровода № 3, осуществляется монтаж армокаркасов. По оценкам специалистов на возведение и обетонирование одного трубопровода требуется около 12 месяцев. Строительство первого напорного трубопровода было начато в октябре 2010 г. В настоящее время оно завершено. Ведется бетонирование второго водовода.

На станционном узле не прекращаются работы по сборке механизмов агрегатов № 1 и № 2. На ГА № 1 монтаж основного оборудования практически завершён, ведется сборка элегазовых комплексов генераторного напряжения 15 кВ. Продолжается возведение машинного зала и здания служебно-производственного комплекса.

Круглосуточно возводится дамба верхнего бассейна в объеме пускового комплекса. На нижнем бассейне продолжается расширение и дноуглубление. Ведется строительство рисбермы. В октябре искусственная перемычка, отсыпанная в правой части нижнего бассейна действующей Загорской ГАЭС, будет разобрана, и нижний бьеф станет об-

щим для двух станций. Во время этого Загорская ГАЭС по согласованию с Системным оператором прекратит работу на один месяц.

Строительство Гоцатлинской ГЭС

На Гоцатлинской ГЭС завершены монтажные работы и проведены гидравлические испытания и ультразвуковое обследование качества сварных швов спиральных камер гидротурбин. Успешное проведение испытаний позволяет приступить к обетонированию спиральных камер. Смонтирован мостовой кран грузоподъемностью 200/32 + 10 т.

По электротехническому оборудованию готовятся к установке: комплектные трансформаторные подстанции внутренней установки 10/0,4 мощностью 1000 кВА и 160 кВА, трансформаторная подстанция наружной установки 10/0,4 кВА, генераторное распределительное устройство ГРУ-10,5 и др.

Строительство Нижне-Бурейской ГЭС

На строительстве Нижне-Бурейской ГЭС верхняя и продольная перемычки подняты до проектных отметок 119,0 и 117,5 м соответственно и укреплены скальным грунтом. Заканчивается возведение скального оголовка, необходимого для отведения потоков воды от верховой перемычки и предотвращения ее размыва. Созданы запасы инертных материалов на правом берегу р. Бурей. ОАО “Бурейгэсстрой” форсированно ведет наращивание низовой перемычки до проектной отметки 115,0 м. Плавсредства ОАО “Нижне-Бурейская ГЭС” перегруппированы с целью оказания содействия строителям при необходимости. Сформированный в настоящее время паводок с расходом около 3000 м³/с безопасен для строительства.

Завершаются работы подготовительного этапа. После намеченного на конец 2012 г. осушения котлована начнутся работы по возведению основных сооружений. Определен генеральный подрядчик строительства – ОАО “Трест Гидромонтаж”.

Восстановление и реконструкция

Саяно-Шушенской ГЭС

В новом здании КРУЭ-500 кВ Саяно-Шушенской ГЭС смонтировано 90% основного оборудования. На данный момент завершено строительство здания распределительного устройства и щитовых устройств, идут отделочные работы. Продолжается монтаж панелей устройств защиты, автоматики и связи, систем собственных нужд переменного и постоянного тока, кабельных металлоконструкций, а

также строительство эстакад для высоковольтных кабельных присоединений трансформаторных блоков и отходящих воздушных линий. В состав КРУЭ-500 кВ в соответствии с проектом входит 19 ячеек типа ЕЛК-3 производства швейцарской фирмы АВВ. Каждая такая ячейка является комплексным аппаратом, который включает в себя выключатели, разъединители, заземлители, измерительные трансформаторы тока и напряжения, а также шкаф управления.

Решение о реконструкции действующего ОРУ-500 кВ было принято руководством ОАО “РусГидро” в 2010 г. Это решение было продиктовано необходимостью замены морально и физически устаревшего оборудования, введенного в работу в период с 1978 по 1985 гг. В ходе комплексной реконструкции будет установлено современное отечественное и импортное оборудование, отвечающее самым высоким требованиям по надежности, а также имеющее большой срок службы – до 50 лет. Кроме этого будет проведена замена всех средств релейной защиты, автоматики и связи на современные микропроцессорные устройства. Одновременно с заменой оборудования предусмотрен переход на более надежную и удобную для эксплуатации схему соединений “3/2”. Таким образом, реконструкция распределительного устройства сократит количество плановых и текущих ремонтов, что повысит надежность работы энергосистемы.

Размещение ОРУ-500 и необходимость ввода в эксплуатацию КРУЭ при работе действующего распределительного устройства повлекли за собой необходимость создания кабельных участков (вставок) для присоединения блоков и отходящих линий к КРУЭ-500. Эти кабельные участки будут выполнены на территории ОРУ-500 с применением высоко-

вольтного кабеля 500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена производства фирмы “Тайхан” (Корея).

Проектная документация КРУЭ – 500 кВ разработана ОАО “Ленгидропроект” и утверждена в июле 2012 г. Работы по строительству здания распределительного устройства и монтажу оборудования ведет ОАО “Гидроэлектромонтаж”. Окончание работ запланировано на май 2013 г.

В здании ГЭС завершается монтаж ГА № 9. Ведется сборка системы автоматизированного управления, технического водоснабжения, регулирования агрегата, щитов управления и защит, а также токопроводов и элегазового генераторного комплекса НЕС-8С, необходимого для коммутации генератора с электрической сетью. До конца текущего года гидроагрегат № 9 будет введен в эксплуатацию. Продолжаются работы на гидроагрегате № 10, идет монтаж системы водяного охлаждения генератора, сборка статора и подпятника. На монтажной площадке ведется сборка ротора главного генератора. На трансформаторной площадке энергоблока Т-5, через который будет осуществляться выдача мощности гидроагрегатов № 9 и № 10, на штатные места установлены трансформаторы фаз “А” и “В”, идет подготовка к установке трансформатора фазы “С”.

Продолжаются работы по замене гидроагрегатов № 5 и 6. В кратере шестого агрегата идет обследование закладных частей и монтаж стабилизирующих ребер в конусе отсасывающей трубы. На гидроагрегате № 5 специалисты ОАО “Саяно-Шушенский Гидроэнергоремонт” ведут демонтаж генератора, систем технического водоснабжения и охлаждения генератора. Планируется, что эти агрегаты вновь войдут в строй в 2013 г.

*Материалы подготовлены пресс-службой ОАО “РусГидро”:
И. Слива, В. Скращук, Л. Лукманова,
А. Бутусова, И. Дворянов, И. Коренюк*

Сдано в набор 23.08.2012. Подписано в печать 18.10.2012. 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 _____

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ СТАТЬИ

Статью в редакцию журнала “Гидротехническое строительство” можно направить по адресу: 109044, г. Москва, Воронцовский переулок, дом 2, стр. 1. ЗАО НТФ «Энергопрогресс» или по E-mail: gts1930@yandex.ru

Статья должна отвечать следующим требованиям.

1. Статью необходимо сопроводить письмом с указанием *сведений об авторах* (фамилия, имя и отчество полностью, место работы, ученая степень и должность, служебный и домашний адреса, номера домашнего и служебного телефонов), *краткой аннотацией*.

2. Принимаются к рассмотрению: статьи, напечатанные *на машинке* (на одной стороне листа через два интервала с полями 3 – 4 см), в двух экземплярах или один экземпляр распечатки статьи, набранной *на компьютере* (шрифт не менее 14 пт с полуторным межстрочным интервалом), плюс электронная версия статьи на диске (3,5" или CD) или по E-mail.

3. *Рисунки* представляются отдельно в двух экземплярах, их нельзя вклеивать в текст. В тексте (на полях) приводятся лишь ссылки на номера рисунков. Следует учитывать, что при печати рисунки уменьшаются, поэтому детали их не должны быть мелкими, однако размер каждого рисунка не должен превышать 200 × 290 мм.

Все *чертежи* выполняются в соответствии с действующими стандартами, аккуратно и четко. *Графики* должны быть выполнены в координатах в единицах измерения СИ (обязательных). Графики или кривые зависимости, если их на рисунке несколько, а также отдельные детали на чертежах, узлы и линии на схемах следует обозначать цифрами (позициями) или буквенными обозначениями. Сокращение слов не допускается.

Фотоснимки с четким контрастным изображением и хорошо проработанными деталями представляются в двух экземплярах, на одном из которых не должно быть никаких надписей и позиций.

4. *Формулы* должны быть четко написаны в отдельные строки (а не в текст). При этом прописные (большие) буквы подчеркиваются двумя черточками снизу, а строчные (маленькие) – двумя черточками сверху. Греческие буквы обводятся красным карандашом, латинские – синим. Индексы пишутся ниже строки, показатели степени – выше. На полях рукописи делаются пометки, поясняющие, какие буквы являются русскими, какие – латинскими, делается разметка букв [на полях или рядом пишется слово “буква” О, З, Ч, I (латинская), П, Ш, У в отличие от цифр 0, 3, 4, I, II Ш, V] в типах оборудования и других случаях. Если формулы набраны на компьютере, но их элементы имеют двойное прочтение, они должны быть размечены так же, как и при написании вручную.

5. *Таблицы* не должны быть громоздкими, все наименования необходимо писать без сокращения слов (за исключением единиц измерения). Численные значения величин в таблицах и в тексте должны быть в единицах измерения СИ (обязательных).

6. Статья должна завершаться *конкретными выводами*, в которых в лаконичной форме (по пунктам) излагаются результаты работы и предложения автора, вытекающие из изложенного материала.

7. *Список литературы* приводится в конце статьи. Он составляется в порядке последовательности ссылок в тексте. Ссылки на литературу в тексте заключаются в квадратные скобки. В списке указывается:

а) для *журнальных статей* – фамилия и инициалы всех авторов, название статьи, журнала, год издания, номер журнала (том);

б) для *книг* – фамилия и инициалы всех авторов, название книги, издательства, год издания;

в) для *сборников и продолжающихся изданий* – фамилия и инициалы всех авторов конкретной статьи, ее название, название сборника или издания, город, издательство, год, выпуск;

г) для *других видов изданий* перечисляются идентичные библиографические данные.

В список литературы не должны включаться неопубликованные материалы, материалы служебного пользования, а также мало распространенные издания и материалы, отпечатанные литографическим или подобным ему способом.

Технические требования к электронной версии статьи. Текст статьи должен быть набран на PC-совместимом компьютере (не Mac) с использованием базовых шрифтов Windows. Рисунки необходимо выполнить в форматах EPS, CDR, BMP, TIFF или JPEG и предоставить отдельными файлами (нельзя заверстывать рисунки в текст статьи). Сканирование графических рисунков нужно производить с разрешением 600 dpi, а фотоснимков, представляемых в электронном виде, – с разрешением не менее 300 dpi.