



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.

№ 4

апрель

2012

Содержание

Расчеты, исследования, эксперименты

Котеров В. Н., Беликов В. В. Исследование и моделирование тепловой конвекции воздуха и переноса локальных осадков при работе эксплуатационного водосброса Саяно-Шушенской ГЭС в зимний период 2

Бухарцев В. Н., Петриченко М. Р. Нестационарная фильтрация в однородном грунтовом массиве 10

Косарев С. Г. Обоснование выбора расчетной зависимости для определения транспорта наносов в процессе развития прорана в теле однородных земляных намывных плотин 13

Косарев С. Г. Методика расчета развития прорана в теле однородных земляных намывных плотин вследствие возникновения аварийных ситуаций 17

Бальзанников М. И., Селиверстов В. А. Исследования водоприемного устройства гидроаккумулирующей электростанции 21

Александровский А. Ю. Зависимость водно-энергетических показателей Эвенкийской ГЭС от стока р. Нижняя Тунгуска и режима использования водных ресурсов водохранилища 27

Кудинов А. Отклик на статью А. А. Клюкача “К вопросу об оценке вибрационного состояния гидроагрегатов ГЭС” [1] 31

Дискуссии

Василевский А. Г., Козлов А. Б. О внедрении “Типового динамического паспорта гидротехнических сооружений электростанций” 32

Бронштейн В. И., Бугаевский А. Г. О динамической безопасности гидротехнических сооружений (комментарии к статье А. Г. Василевского и А. Б. Козлова “О внедрении “Типового динамического паспорта гидротехнических сооружений электростанций”) 35

За рубежом

Пехтин В. А., Беллендир Е. Н., Радченко В. Г. Настоящее и будущее гидроэнергетики Швейцарии 38

Библиография

Соколовский П. С. О монографии “Противофильтрационные завесы гидротехнических сооружений на многолетней мерзлоте” 48

Михайлов Г. К. Европейские инженеры-гидротехники и ученые в области теоретической и прикладной гидродинамики XIX – XX веков 56

Хроника

Новости гидроэнергетики и гидротехники 59

Исследование и моделирование тепловой конвекции воздуха и переноса локальных осадков при работе эксплуатационного водосброса Саяно-Шушенской ГЭС в зимний период

Котеров В. Н., кандидат физ.-мат. наук (Вычислительный центр РАН),
Беликов В. В., доктор техн. наук (ОАО “НИИ энергетических сооружений”)

Цель настоящей работы состояла в оценке расчетным путем (с применением как эмпирических зависимостей, так и математического моделирования) интенсивности обледенения и выпадения осадков (жидких и твердых) на площадках ГЭС.

Ключевые слова: прогноз, условия работы, эксплуатационный водосброс, зимний период.

После аварии на Саяно-Шушенской ГЭС возникла необходимость в прогнозе условий работы эксплуатационного водосброса в зимний период, поскольку ранее в условиях отрицательных температур он не эксплуатировался. С этой целью сотрудниками ОАО “НИИЭС” и Вычислительного центра РАН по заказу ОАО “РусГидро” в осенне-зимний период 2009 – 2010 гг. была выполнена научно-исследовательская работа на тему “Прогнозирование влияния водно-ледяного воздушного облака за водосбросом СШГЭС в зимний период”, некоторые результаты которой излагаются в данной статье.

Как известно, в условиях неработающих агрегатов пропуск воды на Саяно-Шушенской ГЭС в зимний период 2009/2010 г. происходил только через эксплуатационный водосброс, все 11 пролетов которого работали на минимальном открытии (половинная ступень). Несмотря на то что работа на половинной ступени обеспечивала минимальную аэрацию потока и, как следствие, минимальную генерацию водяных капель в водобойном колодце и

минимальный перенос капель и снежуры восходящими к гребню плотины потоками воздуха, это все равно приводило к двум негативным последствиям:

к интенсивному образованию мощных наледей на гранях водосливных лотков и прилегающих к водобойному колодцу площадках (в частности, на крановой эстакаде водосбросной плотины (рис. 1) и на ближайшей к водосбросу части раздельного устоя);

к образованию и переносу (рис. 2) твердых осадков (ледяная крупа, снег), отлагающихся на более удаленных площадках (в частности, на балконе над открытым участком водосброса, на гребне плотины, на крыше машинного зала и т.п.).

Данные эффекты наблюдались в период, когда среднесуточная температура воздуха в районе Саяно-Шушенской ГЭС являлась устойчиво отрицательной. Цель настоящей работы состояла в оценке расчетным путем (с применением как эмпирических зависимостей, так и математического моделирования) интенсивности обледенения и выпадения осадков (жидких и твердых) на площадках ГЭС (рис. 1), в частности на уровне крановой эстакады водосброса, где прямые измерения были невозможны.

1. Натурные исследования

В рамках данной работы были выполнены натурные измерения интенсивности осаждения капельной влаги в нижнем бьефе Саяно-Шушенской ГЭС в осенний период, а также измерения осаждения снежно-ледяной крупы на ее сооружениях (балкон над водобойным колодцем, гребень и основание плотины рядом с машзалом) в конце января 2010 г. при низких отрицательных температурах воздуха (рис. 3, 4). Кроме того, по наблюдениям эксплуатационного персонала получены данные по выпадению осадков в начале января, когда балкон от снега не очищался.

Анализ результатов измерений позволил построить зависимость интенсивности выпадения

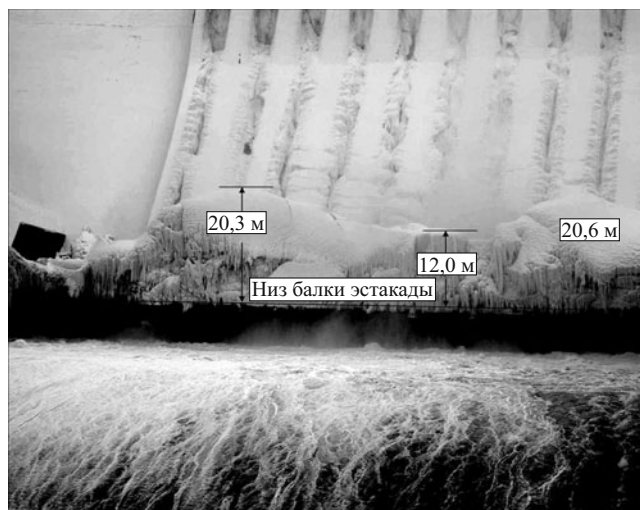


Рис. 1. Высота льда на крановой эстакаде Саяно-Шушенской ГЭС на 12.01.2010 г.



Рис. 2. Шлейф осадков над водосбросом Саяно-Шушенской ГЭС (вид с гребня плотины 27.01.2010 г.)

твердых осадков (снега) на балконе на отметке 440,0 м непосредственно над водобойным колодецем (рис. 5). Из графика видно, что при температуре выше -9°C выпадение осадков полностью прекращается. Величина осадков 2 мм/ч (в пересчете на воду) соответствует выпадению на балконе снега с интенсивностью 0,8 – 1,0 м/сут (с учетом скатывания снега на балкон с верхней части плотины), что и наблюдалось в первых числах января 2010 г.

Было принято (в первом приближении), что интенсивность выпадения осадков на балконе напрямую коррелирует с интенсивностью генерации водяных брызг в месте падения водосбросных струй в водобойный колодець, а последняя коррелирует с интенсивностью нарастания льда на крановой эстакаде, расположенной на разделительных стенках водосбросных лотков, в начале водобойного колодца. С использованием данных по нарастанию сред-

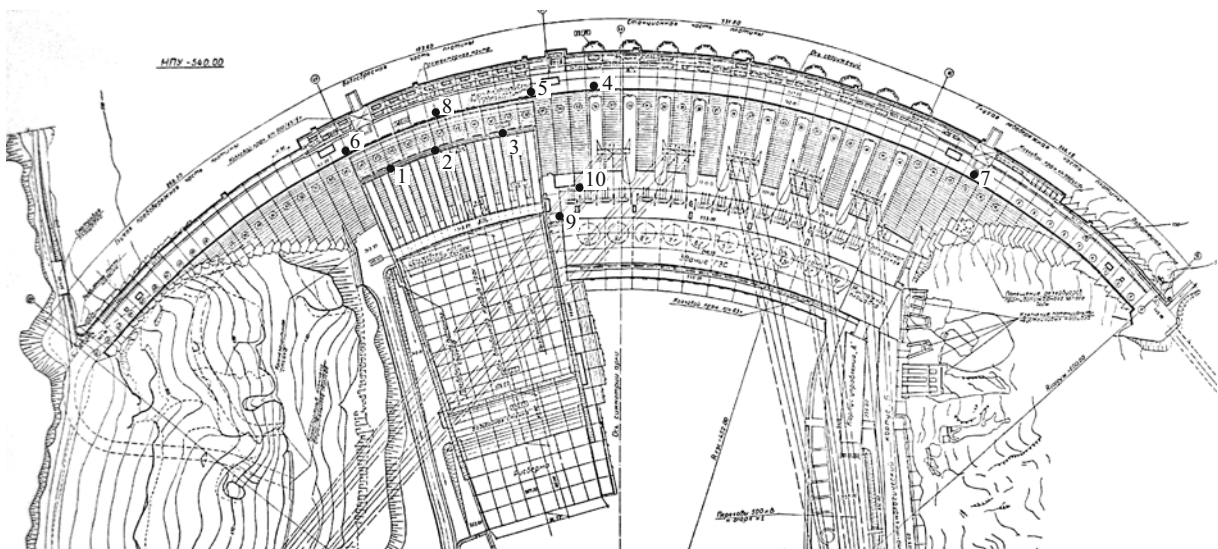


Рис. 3. Точки натуральных измерений интенсивности выпадения осадков на плотине Саяно-Шушенской ГЭС в январе 2010 г.



Рис. 4. Точка измерений № 3. Балкон на отметке 440 м

ней высоты ледяных глыб на эстакаде за период с 28 декабря по 12 января был подобран коэффициент пропорциональности для построения зависимости интенсивности обледенения эстакады от температуры воздуха (при условии, что температура воды находится в пределах $2 - 3\text{ }^{\circ}\text{C}$) и построен соответствующий график, показанный на рис. 5. Из рис. 5 следует, что при температуре выше $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ обледенение прекращается и начинается таяние льда, что полностью было подтверждено натурными наблюдениями. При температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ интенсивность обледенения составит около 1 м/сут , а при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ — около 2 м/сут , что также подтверждалось измерениями высоты ледяных глыб (рис. 1).

При использовании графика рис. 5 следует иметь в виду, что на нем показана интенсивность намерзания льда, а не приращение высоты наледи. В начальные моменты образования наледи эти величины близкие, однако по мере роста высоты наледи начинают действовать другие факторы: лед начинает оплывать под действием собственного веса, появляются трещины, отдельные куски откалываются от основного массива и падают в воду. Поэтому нарастание высоты наледи будет происходить медленнее, чем скорость обледенения, и при достижении определенной высоты может полностью прекратиться.

2. Численное моделирование

Данные натурных исследований позволили провести калибровку уникальной трехмерной численной модели вынужденной конвекции воздушно-ледяного облака над водосбросом Саяно-Шушенской ГЭС, позволяющей рассчитывать параметры этого облака в зависимости от сбросных расходов, температуры воды, температуры наружного воздуха, скорости и направления ветра, состояния атмосферы.

Основой для работы послужила трехмерная компьютерная модель вынужденной конвекции

воздуха и переноса капельной влаги в нижнем бьефе крупного гидроузла, разработанная в 2005 – 2007 гг., откалиброванная и тестированная на натурных данных 2004 г., полученных на ГЭС Капанда (Ангола) при испытаниях ее водопропускных сооружений, и опубликованная в [1 – 3]. В модели полагалось, что основная причина изменения циркуляции воздуха в нижнем бьефе гидроузла состоит в вовлечении больших объемов воздуха в мощные струи трамплинных поверхностных водосбросов и транспортировке воздуха этими струями к поверхности воды в нижнем бьефе. Описанный механизм может считаться ведущим в летний период, когда перепад температур сбрасываемой воды и окружающего воздуха незначителен и вынужденная тепловая конвекция пренебрежимо мала. Однако в условиях Саяно-Шушенской ГЭС в зимний период данный механизм оказывается в значительной степени блокированным из-за сильного обледенения лотков открытого участка водосброса и на первое место выходит другая причина изменения циркуляции воздуха, связанная с тем, что температура сбрасываемой из верхнего бьефа воды существенно превышает температуру окружающего воздуха.

Основные моменты разработанной математической модели и некоторые результаты расчетов приводятся ниже.

2.1. Концептуальная модель процесса

На рис. 6 представлена упрощенная концептуальная модель изучаемого процесса. Некоторые ее положения обосновываются результатами натурных наблюдений.

При работе эксплуатационного водосброса температура воды, забираемой из верхнего бьефа, положительна: $T_{ВБ} > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эта вода, смешиваясь на закрытых участках водосброса с холодным воздухом¹), имеющим температуру $T_0 < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, образует хорошо перемешанную водно-воздушную смесь, температура которой из-за большой теплоемкости воды примерно равна $T_{ВБ}$ (выполненные оценки дают отличие в сотые доли градуса). В водобойном колодце происходит деаэрация воды, сопровождающаяся образованием капельной влаги. Возникающие при этом восходящие потоки “теплого” воздуха (его температура у поверхности воды около $T_{ВБ}$) уносят эту влагу из водобойного колодца (возникает так называемый “тепловой факел”,

¹ В зимний период эксплуатационный водосброс работал при закрытых аэрационных шахтах. Тем не менее визуальные наблюдения показывали, что выходящий из закрытых участков водосброса поток воды оставался сильно аэрированным. Это явление “самоаэрации” связано с тем, что даже в том случае, когда водосброс работал на минимальном режиме, в его приемных камерах создавалось значительное разрежение, обеспечивающее поступление в них достаточного количества воздуха через многочисленные нештатные отверстия (негерметичные швы между бетонными плитами, неплотно прикрытые крышки люков и т.п.).

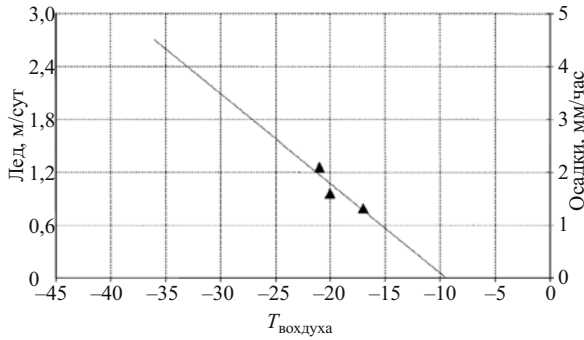


Рис. 5. Интенсивность выпадения осадков (в пересчете на воду) на балконе на отметке 440 м и интенсивность обледенения крановой эстакады в зависимости от температуры наружного воздуха

который, в частности, хорошо виден на рис. 2). Часть капель укрупняется за счет гравитационной коагуляции (см., например, [4]) и выпадает на подстилающую поверхность в районе водобойного колодца, а другие капли переносятся в области с отрицательной температурой воздуха $T < 0^\circ\text{C}$, где происходит их замерзание. Замерзшие капли воды (“ледяная крупа”), находящиеся вне зоны действия интенсивных восходящих потоков воздуха, выпадают в виде твердых осадков на площадках, удаленных от водобойного колодца.

В соответствии с описанными представлениями математическая модель процесса состоит из двух частей:

1) из трехмерной модели вынужденной и тепловой конвекции воздуха в районе гидроузла, учитывающей реальную топографию нижнего бьефа, атмосферный ветер и выброс “теплого” воздуха над водобойным колодцем;

2) из модели переноса и турбулентной диффузии капельной влаги и ледяной крупы, использующей полученные с помощью модели конвекции трехмерные поля скоростей воздуха и коэффициента турбулентного обмена.

2.2. Модель движения воздушных масс в районе гидроузла

Для моделирования вынужденной и тепловой конвекции воздуха в районе гидроузла использовались уравнения баротропного движения слабосжимаемой среды с распределенными источниками/стоками массы [1, 2], описывающими выброс воздуха в водобойном колодце за счет процесса деаэрации и “подсос” таких же объемов воздуха в аэрационные шахты. Нерегулярный (турбулентный) характер движения воздуха учитывался путем введения понятия турбулентного обмена, характеризующегося коэффициентом турбулентной вязкости/диффузии, который рассчитывался при помощи одной из известных двухпараметрических полуэмпирических моделей турбулентности. Для учета сил плавучести (архимедовых сил), обусловленных разницей плотности холодного и более теплого воз-

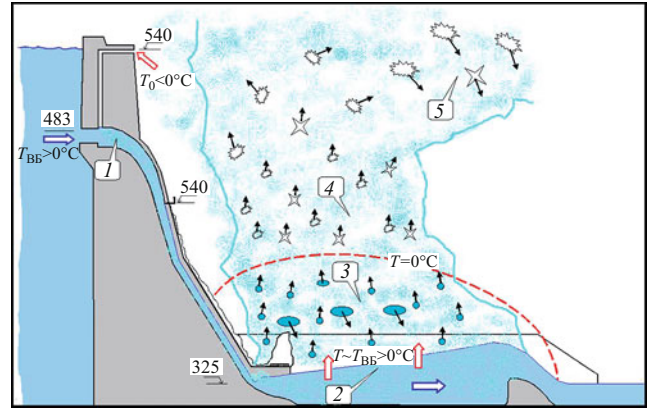


Рис. 6. Концептуальная модель циркуляции воздуха и переноса осадков у эксплуатационного водоброса:

1 — аэрация воды; 2 — деаэрация потока в водобойном колодце с образованием капельной влаги (температура выделяющегося воздуха положительна); 3 — перенос капельной влаги восходящим потоком, укрупнение капель за счет коагуляции; 4 — кристаллизация капель в области с отрицательной температурой (образование ледяной крупы); 5 — перенос ледяной крупы воздушным потоком и выпадение ее на подстилающую поверхность

духа, применялось так называемое приближение Буссинеска, заключающееся в том, что во всех членах уравнений движения, за исключением члена, описывающего архимедову силу, вариации плотности среды не учитываются. В таком приближении основные уравнения модели записывались в виде

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(A \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + g \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \delta_{i3} = 0, \quad i = 1, 2, 3$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial P u_j}{\partial x_j} + C^2 \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \frac{m}{\rho_0} \right) = 0,$$

$$P = \frac{P - P_0}{\rho_0} - g(z - z_0),$$

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho} = \frac{T_0 - T}{T_0} = -\theta,$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial u_j \theta}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} A \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = 0.$$

Здесь t — время; x_i — декартовы координаты ($x_1 = x$, $x_2 = y$; координата $x_3 = z$ направлена вертикально вверх, δ_{i3} — символ Кронекера); u_i — соответствующие компоненты вектора скорости воздушного потока; p и ρ — давление и плотность воздуха; g — ускоренное свободного падения; C — скорость звука; m [кг/(м³с)] — плотность мощности источников ($m > 0$) или стоков ($m < 0$) массы; θ — возмущение температуры. Индексом “0” помечены значения давления и плотности воздуха на уровне $z = z_0$. По повторяющемуся индексу $j = 1, 2, 3$ предполагается суммирование.

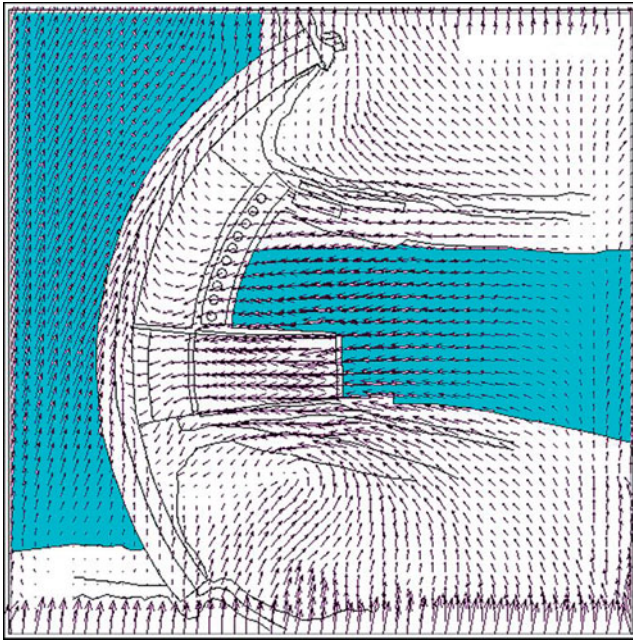


Рис. 7. Рассчитанные величины скорости ветра у подстилающей поверхности

Коэффициент турбулентного обмена A рассчитывался с помощью q - ω модели [5] (см. также [1, 2]):

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial(u_j q)}{\partial x_j} - C_q \frac{\partial}{\partial x_j} \left(A \frac{\partial q}{\partial x_j} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{S}{q} - q\omega \right) = 0$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \omega)}{\partial x_j} - C_\omega \frac{\partial}{\partial x_j} \left(A \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) - \omega \left(C_1 \frac{S}{q^2} - C_2 \omega \right) = 0$$

$$S = A \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_k}, \quad A = C_\mu \frac{q^2}{\omega}.$$

Здесь $C_\mu = 0,09$, $C_q = 1$, $C_\omega = 1,3$, $C_1 = 0,45$, $C_2 = 0,92$ — эмпирические постоянные; S — так называемая диссипативная функция. По повторяющимся индексам $j, k = 1, 2, 3$ предполагается суммирование.

Следует отметить, что выписанная модель не учитывает термодинамический процесс выделения скрытой теплоты кристаллизации при возможном замерзании капельной влаги. В первом приближении это представляется допустимым²⁾.

2 Действительно, при мгновенном замерзании капельной влаги, обеспечивающей характерную водность среды $q = 1 \text{ г/м}^3$, выделяющейся в 1 м^3 энергии достаточно для увеличения температуры воздуха всего лишь на величину $\Delta T = \lambda q / (C_p \rho_0) \approx 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Здесь $\lambda = 334 \text{ Дж/г}$ — теплота кристаллизации воды (или теплота плавления льда); $C_p \approx 1 \text{ Дж/(г} \cdot \text{град.)}$ и $\rho_0 \approx 10^3 \text{ г/м}^3$ — теплоемкость и плотность воздуха.

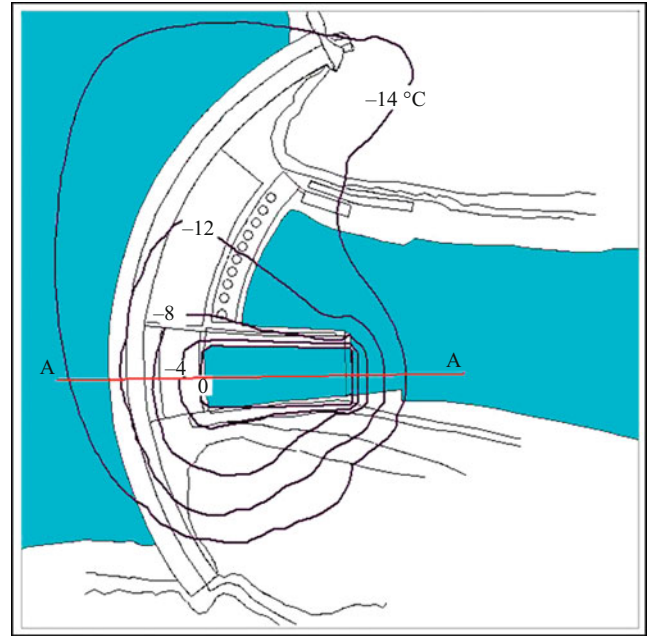


Рис. 8. Изолинии расчетной температуры воздуха у подстилающей поверхности при $T_0 = -15 \text{ }^\circ\text{C}$ и ТВБ = $+3 \text{ }^\circ\text{C}$

2.3. Расчеты ветровой и тепловой конвекции воздуха в нижнем бьефе

Уравнения приведенной выше математической модели численно интегрировались в области $1 \text{ км} \times 1 \text{ км}^2$ вплоть до установления стационарного состояния. Рельеф подстилающей поверхности задавался с учетом сооружений Саяно-Шушенской ГЭС, прилегающих берегов и горизонтов воды в верхнем и нижнем бьефах.

На рис. 7, 8 представлены результаты расчетов конвекции воздуха в окрестности ГЭС, выполненные при следующих значениях определяющих параметров: на границе расчетной области ветер юго-восточный, его скорость $u_0 = 3 \text{ м/с}$, температура воздуха $T_0 = -15 \text{ }^\circ\text{C}$; температура воды в верхнем бьефе на отметке водозабора ТВБ = $+3 \text{ }^\circ\text{C}$. Из рис. 7 видно, что в верхнем бьефе ветер дует вдоль гребня плотины от правого берега к левому. В то же время в нижнем бьефе, как в районе административных зданий, так и над водобойным колодцем ветер направлен в сторону плотины. Это соответствует реальной ситуации, наблюдавшейся, например, на Саяно-Шушенской ГЭС 25–27 января 2010 г. (рис. 2).

Согласно расчетам интенсивность восходящих потоков воздуха над водобойным колодцем существенно зависит от температуры окружающего воздуха T_0 , но под гребнем плотины слабо чувствительна к скорости ветра u_0 (рис. 9). При $T_0 = -15 \text{ }^\circ\text{C}$ отрицательные температуры воздуха наблюдаются уже на уровне крановой эстакады (рис. 10, а, в), в то время как при $T_0 = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ изолиния $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ на поверхности открытого участка водосброса проходит по отметке 375 м (рис. 10, б, в). Это соответствует тому, что, согласно наблюдениям, обледенение от-

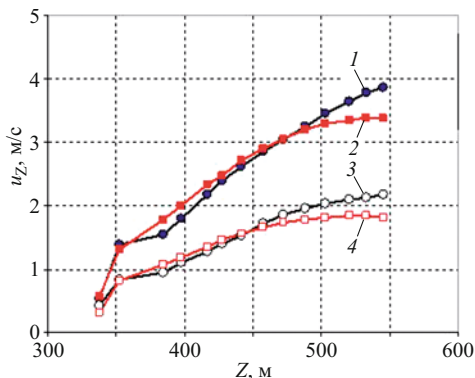


Рис. 9. Вертикальная компонента u_z скорости воздуха над водобойным колодцем

в зависимости от отметки уровня z :

1 — $T_0 = -15^\circ\text{C}$, $u_0 = 3\text{ м/с}$; 2 — $T_0 = -15^\circ\text{C}$, $u_0 = 8\text{ м/с}$; 3 — $T_0 = -5^\circ\text{C}$, $u_0 = 3\text{ м/с}$; 4 — $T_0 = -5^\circ\text{C}$, $u_0 = 8\text{ м/с}$

крытых лотков водосброса началось с их верхней части, а интенсивное нарастание льда на крановой эстакаде — при падении среднесуточной температуры воздуха ниже -10°C .

2.4. Модель переноса локальных осадков, вызванных работой эксплуатационного водосброса

При моделировании переноса осадков, обусловленных работой эксплуатационного водосброса Саяно-Шушенской ГЭС, предполагалось прежде всего, что замерзшая капельная влага представляет собой ледяную крупу с близкой к сферической формой частиц (при низких температурах окружающего воздуха это подтверждается результатами наблюдений).

Пусть $f_w(a_w)$ и $f_i(a_i)$ — функции распределения капель и ледяных частиц с радиусами a_w и a_i , соответственно, нормированные таким образом, что интегралы

$$q_w = \int_0^\infty f_w(a_w) da_w, \quad q_i = \int_0^\infty f_i(a_i) da_i$$

представляют собой массу жидкой и твердой фазы объема среды (так называемые водность и ледность) соответственно. Для расчета этих функций распределения может быть использована система следующих двух кинетических уравнений:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f_k}{\partial t} + \frac{\partial u_x f_k}{\partial x} + \frac{\partial u_y f_k}{\partial y} + \\ & \frac{\partial [u_z - w_k(a_k)] f_k}{\partial z} + \frac{\partial \dot{a}_k f_k}{\partial a_k} - \text{div}(A \nabla f_k) = \\ & = \left(\frac{\delta f_k(a_k)}{\delta t} \right)_{\text{сп}} + \left(\frac{\delta f_k(a_k)}{\delta t} \right)_{\text{кр}} + Q_w, \end{aligned} \quad (1)$$

$k = w(\text{water}), i(\text{ice}).$

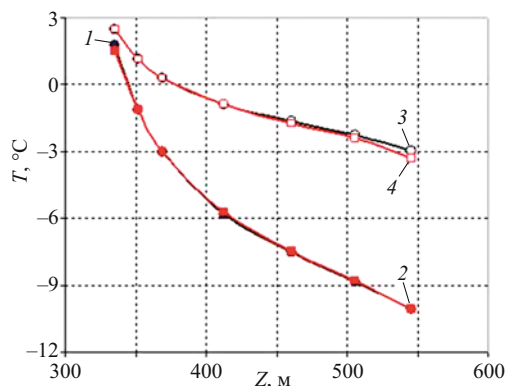
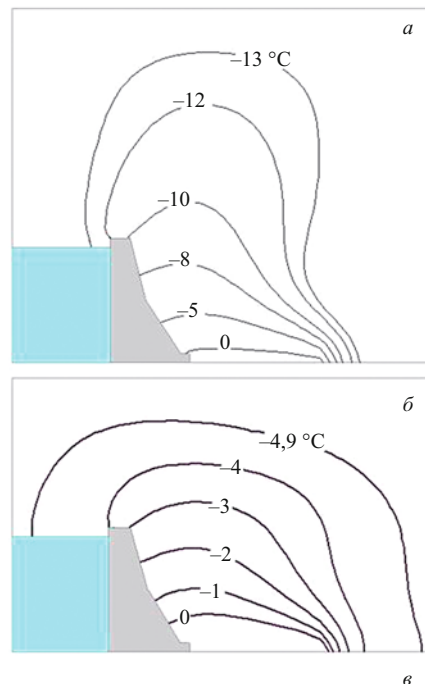


Рис. 10. Изолинии температуры в вертикальной плоскости А-А (см. рис. 8) при $T_0 = -15^\circ\text{C}$ (а) и $T_0 = -5^\circ\text{C}$ (б). Расчетное распределение температуры воздуха вдоль поверхности плотины в сечении А-А (в); обозначения такие же, как на рис. 9

Вторые, третьи и четвертые члены, стоящие в левых частях этих уравнений, описывают перенос осадков потоком воздуха (w_k — скорость осаждения частиц сорта k в гравитационном поле). Следующий, пятый член — изменение размеров частиц, находящихся в одинаковом агрегатном состоянии, за счет их слипания (\dot{a}_k — скорость изменения радиусов частиц за счет этого процесса). Последний член в левой части связан с турбулентной диффузией осадков. В правой части уравнений находятся интегралы столкновений, обусловленные процессом спонтанной кристаллизации капель воды и кристаллизацией капель при их столкновениях с ледяными частицами. Величина Q_w — функция источника капельной влаги.

Следует заметить, что при отрицательных температурах воздуха отдельные капли воды могут долго находиться в переохлажденном состоянии (в облачных структурах капли воды присутствуют и при довольно низких отрицательных температурах,

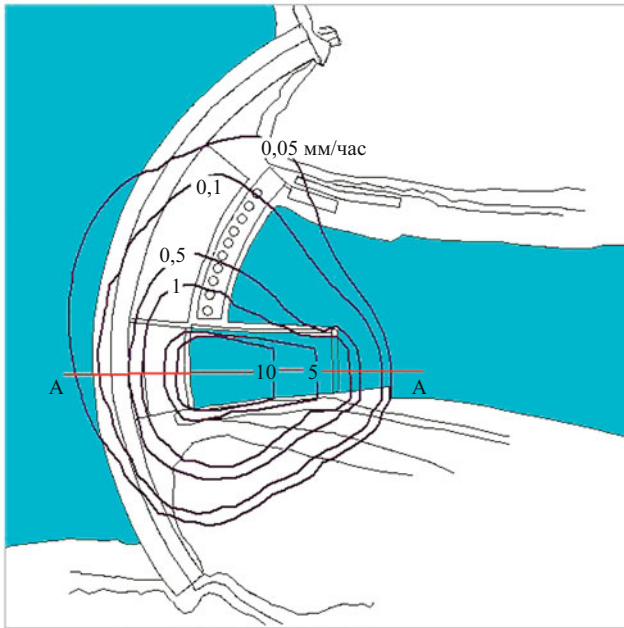


Рис. 11. Изолинии расчетных осадков (в эквивалентных количествах воды), выпадающих на площадках ГЭС при $T_0 = -15\text{ }^\circ\text{C}$ и ТВБ = $+3\text{ }^\circ\text{C}$

во всяком случае, вплоть до $-40\text{ }^\circ\text{C}$). В процессе образования ледяных кристаллов значительную роль играют особые ледяные ядра — так называемые ядра замерзания (или сублимации). Они могут при сравнительно низких температурах инициировать замерзание переохлажденных капель, а также образование ледяных кристаллов из пара (сублимацию). В свободной атмосфере число первичных активных ядер замерзания мало и составляет примерно 3 м^{-3} при температуре воздуха $-10\text{ }^\circ\text{C}$ и 300 м^{-3} при $-20\text{ }^\circ\text{C}$ (см., например, [6]). Однако в приземном слое их количество может быть много большим.

Переход жидкой фазы в твердую (в лед) дает начало быстрому росту последней, в частности, потому, что появляющиеся кристаллы льда сами становятся ядрами замерзания. Поэтому время замерзания капельной влаги при достаточно низких отрицательных температурах определяется в основном только количеством первичных ядер замерзания в единице объема среды. Если не интересоваться деталями переходного процесса, то при достаточном количестве этих ядер может быть использована модель мгновенной кристаллизации, согласно которой капельная влага, попадающая в области с отрицательными температурами воздуха, мгновенно кристаллизуется и образует ледяную крупу с плотностью вещества, близкой к плотности сплошного льда, т.е. к $\rho_i = 0,9\text{ г/см}^3$. Именно такая модель использовалась в представляемой здесь работе.

Так как в рамках модели мгновенной кристаллизации в областях с положительными температурами воздуха $T > 0\text{ }^\circ\text{C}$ существует лишь капельная влага, а в областях с отрицательными температура-

ми $T < 0\text{ }^\circ\text{C}$ — лишь ледяная крупа, то вместо двух уравнений (1) можно рассмотреть лишь одно уравнение для функции распределения f частиц по их радиусам a :

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial u_x f}{\partial x} + \frac{\partial u_y f}{\partial y} + \frac{\partial [u_z - w(a, T)] f}{\partial z} + \frac{\partial \dot{a}(T) f}{\partial a} - \text{div}(A \nabla f) = Q_w. \quad (2)$$

Здесь эффективная скорость осаждения $w(a, T)$ и скорость изменения радиусов частиц $\dot{a}(T)$ зависят, в частности, от температуры T воздуха в рассматриваемой точке пространства:

$$w(a, T) = \begin{cases} w_w(a), & \text{если } T > 0\text{ }^\circ\text{C}, \\ w_i(a), & \text{если } T < 0\text{ }^\circ\text{C}, \end{cases}$$

$$\dot{a}(T) = \begin{cases} \dot{a}_w(a), & \text{если } T > 0\text{ }^\circ\text{C}, \\ 0, & \text{если } T < 0\text{ }^\circ\text{C}, \end{cases}$$

(предполагается, что ледяные частицы не слипаются).

Величина осадков h , измеряемая в метеорологии в мм/ч, может быть вычислена с помощью интеграла

$$h = \frac{1}{\rho_w 0} \int_0^\infty [w(a, T) - u_z] f(a) da$$

Здесь $\rho_w 0 = 1\text{ г/см}^3$ — плотность воды; $f(a)$ и u_z — значение функции распределения и вертикальной компоненты скорости воздуха на подстилающей поверхности ($u_z = 0$ всюду, кроме поверхности водобойного колодца, где происходит деаэрация). В областях выпадения ледяной крупы осадки измеряются в эквивалентных количествах воды.

При решении кинетического уравнения (2) использовалось приближение двух моментов [1, 2].

2.5. Расчет переноса локальных осадков

Уравнения модели переноса осадков при заданных трехмерных распределениях скорости воздуха $u = (u_x, u_y, u_z)$ и коэффициента турбулентного обмена A интегрировались до установления стационарного состояния. Приведем здесь некоторые результаты подобных расчетов, выполненные при использовании полей u и A , представленных в разделе 2.3 настоящей работы.

На рис. 11 приведены расчетные изолинии осадков, выпадающих на площадках ГЭС при рассмотренных метеорологических условиях. Дополняют эти данные графики рис. 12, на которых показаны зависимости интенсивности выпадения осадков h

от отметки уровня точки наблюдения z в сечении А-А, проходящем через середину водобойного колодца (рис. 11). Расчеты неплохо согласуются с результатами натуральных измерений, проведенных 26–27 января 2010 г. на балконе, расположенном над открытым участком водосброса (рис. 4, 5), и на гребне плотины, если принять, что количество образующейся во всем водобойном колодце капельной влаги составляет $Q_D = 10 \text{ м}^3/\text{с}$, а начальный средний радиус капель $a_{w0} = 280 \text{ мкм}$.

Выводы

Натурные измерения интенсивности выпадения осадков над водосбросом Саяно-Шушенской ГЭС в конце января 2009 г. при низких отрицательных температурах воздуха позволили построить простые эмпирические зависимости скорости обледенения крановой эстакады и раздельной стенки от температуры окружающего воздуха, подтвержденные фактическими визуальными данными. При температуре $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ скорость намерзания льда составила 2 м/сут , при $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ — 1 м/сут , при температуре около $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ намерзание практически прекращалось.

Численное моделирование, выполненное для зимних условий, обнаружило существенную зависимость исследуемых параметров от среднесуточной температуры воздуха, что подтверждается результатами натуральных наблюдений. Обнаружено качественное отличие зимней циркуляции воздуха в нижнем бьефе от осенней или весенней циркуляции. Следствием этого является появление в зимний период довольно интенсивных вертикальных потоков воздуха над водобойным колодцем, переносящих ледяную крупу на верхние ярусы плотины ГЭС.

Расчеты позволили оценить параметры водо-воздушного облака в нижней части водосбросных сооружений, где прямые измерения были невозможны. Так, согласно результатам моделирования, в зимних условиях при работе водосбросов на половинной ступени вне зависимости от температуры T_0 окружающего воздуха водность среды на уровне крановой эстакады составляет $\sim 1 \text{ г/м}^3$, а интенсивность осадков $\sim 10 \text{ мм/ч}$ (в эквивалентных объемах воды). В то же время положение изотермы $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ существенным образом зависит от этой температуры. А именно при $T_0 = -15 \text{ }^\circ\text{C}$ отрицательные температуры воздуха наблюдаются уже на уровне крановой эстакады, в то время как при $T_0 = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ расчетная изотерма $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ на поверхности открытого участка водосброса проходит по отметке 375 м . Это соответствует результатам наблюдений, согласно которым обледенение откры-

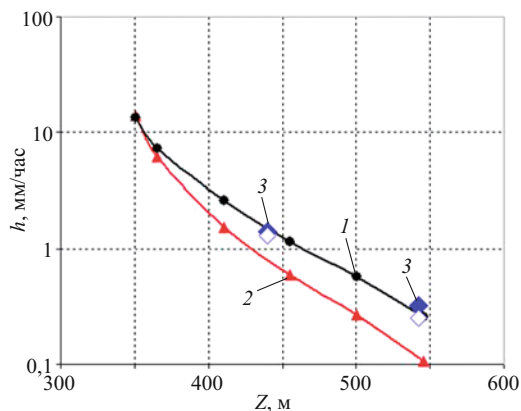


Рис. 12. Распределение интенсивности выпадения осадков вдоль поверхности плотины в сечении А-А (см. рис. 11). Количество капельной влаги, образующейся в водобойном колодце, $Q_D = 10 \text{ м}^3/\text{с}$, начальный средний радиус капель $a_{w0} = 280 \text{ мкм}$:

1 — $T_0 = -15 \text{ }^\circ\text{C}$, ТВБ = $+3 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 — $T_0 = -5 \text{ }^\circ\text{C}$, ТВБ = $+3 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 — результаты натуральных измерений от 26-27.01.2010

тых лотков водосброса началось с их верхней части, а интенсивное нарастание льда на крановой эстакаде — при падении среднесуточной температуры воздуха ниже $-10 \text{ }^\circ\text{C}$.

В результате моделирования получаются размеры и форма теплового факела, скорости движения воздушно-капельной среды, концентрация водно-ледяных частиц, интенсивность их осаждения на подстилающую поверхность (например, на крышу машзала и гребень плотины) и другие параметры в зависимости от гидрометеорологических условий. Разработанная численная модель может без дополнительной калибровки применяться для водосбросов других ГЭС, работающих с отбросом струи и/или интенсивной аэрацией потока.

Список литературы

1. Котеров В. Н., Архипов Б. В., Беликов В. В., Солбаков В. В., Федосов В. Е. Численное моделирование образования и переноса капельной влаги в нижнем бьефе гидроузла при работе водосбросов трамплинного типа // Гидротехническое строительство. 2007. № 7. С. 17–27.
2. Котеров В. Н., Архипов Б. В., Беликов В. В., Солбаков В. В. Образование и перенос капельной влаги в нижнем бьефе гидроузла // Математическое моделирование. 2008. Т. 20. № 5. С. 78–92.
3. Котеров В. Н., Архипов Б. В., Беликов В. В., Солбаков В. В., Федосов В. Е. Численное моделирование переноса капельной влаги в нижнем бьефе гидроузла Капанда с учётом влияния раздельной стенки и воздухозаборов ГЭС // Безопасность энергетических сооружений. 2007. Вып. 16. С. 89–97.
4. Качурин Л. Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. — Л.: Гидрометеоздат, 1973.
5. Coacley T. J. Turbulence modeling methods for the compressible Navier-Stokes equations: AIAA Paper, № 83–1693, 1983.
6. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели) / Под ред. Ю. С. Седунова и др. — Л.: Гидрометеоздат, 1991.

Нестационарная фильтрация в однородном грунтовом массиве

Бухарцев В. Н., Петриченко М. Р., доктора техн. наук (СПбГПУ)

Предложенная методика позволяет назначать скорость снижения уровня воды в бьефе, исключаящую разрушение грунтовых сооружений

Ключевые слова: грунтовые воды, дренаж

Традиционная постановка задачи об установившемся движении грунтовых вод состоит в задании глубины в выходном сечении фильтрационного потока. Считается, что фильтрационный расход определяется перепадом между естественным уровнем грунтовой воды и глубиной воды в свободном бьефе, например в траншее или дрене. Промежуток высачивания исключается в принципе. Альтернативная постановка предельной задачи гидравлической теории фильтрации заключается в задании расхода воды в стоке и в определении глубины в выходном сечении потока как величины, сопряженной с мощностью невозмущенного поверхностного водоносного слоя. При непрерывном поглощении воды (на больших промежутках времени) депрессионная кривая подходит к уровню воды в траншее или дрене сколь угодно близко. При нестационарной фильтрации — кратковременном отборе воды ($t \ll |H/k$) депрессионная поверхность в выходном сечении фильтрационного потока не достигает уровня воды в траншее или дрене.

Нестационарная фильтрация возникает при строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений разного назначения: откачке котлованов, изменении режимов движения воды в деривационных каналах, эксплуатации судостроительных и судоремонтных наливных доков, бассейнов и камер и т.д. Быстрое снижение уровней воды угрожает потерей устойчивости грунтовых откосов этих сооружений и нарушением суффозионной прочности грунтов.

Традиционно задача о нестационарной фильтрации ставится как предельная задача первого рода: задаются глубины фильтрационного потока либо на обеих границах массив конечной длины, либо на одной границе в случае неограниченного с одной стороны грунтового массива [1]. В какой мере такая постановка отвечает действительности? Почему считается, что уровень жидкости в одном или в обоих бьефах однозначно определяют величину расхода в фильтрационном потоке? Попробуем разобраться в этих вопросах.

1) Пусть в ограниченном с одной стороны массиве $x > 0$ имеется достаточно протяженная траншея шириной B и длиной L (рис. 1). До начального момента времени $t = 0$ в массиве и в траншее существовал один уровень воды (ЕУГВ — естественный уровень грунтовых вод), образуя глубину H .

В момент времени $t = 0$ началась откачка воды из траншеи. Пусть $\Delta V/L$ — изменение объема воды в траншее на единицу ее длины за время Δt . Очевидно: $\Delta V/L = B\Delta h_0 = (q_i - q_e)\Delta t$, где q_e — удельный расход воды, удаляемой из траншеи; q_i — удельный расход воды, втекающей в траншею из массива; h_0 — глубина воды в траншее; Δh_0 — изменение глубины воды в траншее. Удельный расход воды, удаляемой из траншеи, определяется интенсивностью удаления воды (например, производительностью насоса). Удельный расход воды, притекающей в траншею из массива, определяется по Дюпюи:

$$q_i := k \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right)_{x=0}, \text{ где } k \text{ — коэффициент фильтрации.}$$

Следовательно, в сечении $x = 0$ фильтрационного потока выполняется предельное условие

$$k \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right)_{x=0} = q_e + B \frac{dh_0}{dt}. \quad (1)$$

В силу (1) $q_e = q_i$ только при неизменном уровне жидкости в траншее. Это условие реализуется: при стационарной фильтрации; при отсутствии воды в траншее, что на практике реализовать невозможно. Если $q_e = 0$, то приток воды из массива восстанавливает уровень воды в траншее вплоть до исходного. Таким образом, глубина фильтрационного потока в сечении $x = 0$ не задается и не совпадает с мгновенной глубиной воды в траншее h_0 . При понижении уровня воды в траншее депрессионная кривая “отстает” от уреза воды, образуя промежуток высачивания.

Из-за малости величины коэффициента фильтрации выполнение условия мгновенного материального баланса (1) приводит к большим градиентам напора — глубины фильтрационного потока $h(x, t)$ в выходном сечении. Например, если в выходном сечении $h \rightarrow 0$, то в силу формулы Дюпюи необходимо $\frac{\partial h}{\partial x} \rightarrow \infty$. Это условие равносильно $v(x, t) \rightarrow \infty$, где v — средняя скорость фильтрации.

2) Пусть в сечении $x = 0$ имеется точечный сток жидкости в виде дрены (рис. 2). До момента времени $t = 0$ дренаж не работает (закрыт) и всюду в грунте $h = H$. В момент времени $t = 0$ включается дренажный сток, и уровень воды в сечении $x = 0$ начинает понижаться. В пределе, если положить $h_0 = 0$, условие (1) принимает вид

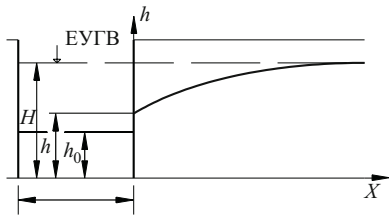


Рис. 1. Схема притока воды к траншее

$$k \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right)_{x=0} = q_e. \quad (1a)$$

Условие (1a) не гарантирует выполнения равенства $h(t, 0) = 0$. Это означает, что кривая депрессии в сечении $x = 0$ не входит в дренаж. Для существования ограниченного градиента напора в сечении $x = 0$ необходимо $h(0, t) > 0$, т.е. необходимы разрыв депрессионной кривой в сечении $x = 0$ и образование промежутка высачивания.

Формализация предельной задачи основана на гидравлической модели фильтрации Буссинеска, использующей условие неразрывности и формулу Дюпюи для средней скорости фильтрации. Пусть $x > 0$, $t > 0$, $\xi = x/H$, $\tau = kt/H$, $\eta = h/H$, $\eta = \eta(\tau, \xi)$, $\xi > 0$, $\tau > 0$, $0 < \eta < 1$. Предельная задача Буссинеска ставится так:

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(f(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial \xi} \right) = \frac{\partial \eta}{\partial \tau}, \quad (2)$$

$$\eta(0, \xi) - 1 = \left(\eta \frac{\partial \eta}{\partial \xi} \right)_{\xi=0} - \frac{q_e}{kH} \left(1 + \frac{kB}{q_e} \frac{d\eta_0}{d\tau} \right) = 0.$$

В предельной задаче Буссинеска $f(\eta) \geq 0$. Для плоского фильтрационного потока $f(\eta) = \eta$.

Как видно, предельная задача (2) поставлена для ограниченного с одной стороны массива. Для грунтового массива конечной ширины результаты решения несильно отличаются от решения (2). По сути, любое решение предельной задачи (2) описывает мгновенную депрессионную кривую только в окрестности начальной плоскости $\xi = 0$, $\tau = 0$, т.е. в "пограничном слое" сечения $\xi = 0$. За пределами пограничного слоя возмущения, создаваемые в сечении $\xi = 0$, "быстро затухают". Можно показать, что если соотношение $D/H = O(1)$ близко к единице, где D — ширина грунтового массива, то пограничный слой сечения $\xi = 0$ тоньше ширины массива. Депрессионная кривая деформирована только в окрестности сечения $x = 0$, а за пределами малой окрестности депрессионная кривая практически совпадает с начальным горизонтом воды в грунтовом массиве. Нелинейность в левой части уравнения (2) приводит к тому, что при $\eta \rightarrow 0$ (при падении депрессионной кривой на дно траншеи или

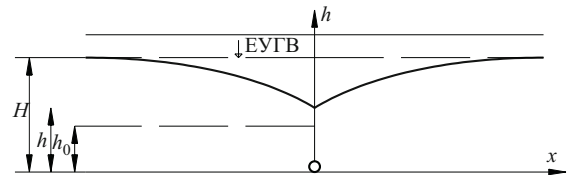


Рис. 2. Схема притока воды к дренажу

дрены) $f(\eta) = 0$. Это означает, что коэффициент переноса $f(\eta)$ равен нулю и сечение $\xi = 0$ "не реагирует" на изменение расхода в дренаже. "Реактивность" (инерционность) сечения $\xi = 0$ минимальна, скорость опускания кривой депрессии минимальна.

Замена переменных $\zeta := \frac{\xi}{2\sqrt{\tau}}$, $\eta(\tau, \xi) = \theta(\zeta)$ позволяет свести (2) к предельной задаче для обыкновенного дифференциального уравнения:

$$\theta \frac{d^2 \theta}{d\zeta^2} + \left(\frac{d\theta}{d\zeta} \right)^2 + 2\zeta \frac{d\theta}{d\zeta} = 0, \quad 0 < \zeta < \infty, \quad 0 < \eta < 1, \quad (3)$$

$$\left(\theta \frac{d\theta}{d\zeta} \right)_{\zeta=0} - \gamma = \theta(\infty) - 1 = 0,$$

$$\text{где } \gamma := 2\sqrt{\tau} \frac{1}{\beta} \frac{B}{H} \left(1 + \beta \frac{d\eta_0}{d\tau} \right), \quad \beta := \frac{kB}{q_e} \geq 0.$$

Предельную задачу (3) удобнее рассматривать с использованием метода Крокко [2]. Положим, что $\varphi(\theta) := \int_0^1 \zeta(z) dz$. Тем самым вводится диффеомор-

физм $(\zeta, \theta) \rightarrow (\theta, \varphi)$ полосы $\Pi := (\zeta, \theta: 0 < \zeta < \infty, 0 < \theta < 1)$ на прямоугольник $P := (\theta, \varphi: 0 \leq \Delta < \theta < 1, 0 < \varphi < \varphi(\Delta))$. Тогда вместо (3) получается предельная задача на конечном промежутке:

$$2\varphi \frac{d^2 \varphi}{d\theta^2} + \theta = 0, \quad 0 \leq \Delta < \theta < 1, \quad \varphi'(\Delta) = \varphi(1) = 0. \quad (4)$$

В формуле (4) штрих означает производную по θ :

$$\varphi'(\theta) := \frac{d\varphi}{d\theta} = -\zeta, \quad \left(\frac{d\varphi}{d\theta} \right)_{\theta=\Delta} := \varphi'(\Delta) = 0$$

Условие в выходном сечении фильтрационного потока $\left(\theta \frac{d\theta}{d\zeta} \right)_{\zeta=0} = \gamma$ в переменных Крокко принимает вид $\varphi(\Delta) = \Delta\varphi = \gamma/2 > 0$. Оно связывает значение глубины фильтрационного потока в выходном сечении с интенсивностью фильтрационного стока. Кроме того, из (4) следует условие неразрывности движения в виде

$$\int_{\Delta}^1 \left(\frac{d\varphi}{d\theta} \right)^2 d\theta = \frac{1-\Delta^2}{4}, \quad \Delta \geq 0. \quad (5)$$

Неравенство Коши и тождество (5) приводят к оценке $\varphi(\Delta) := \varphi_{\Delta} \leq \frac{(1-\Delta)\sqrt{1+\Delta}}{2}$. Получается, что предельное значение $\varphi(\Delta) := \varphi_{\Delta}$ ограничено: $0 < \varphi_{\Delta} \leq \frac{(1-\Delta)\sqrt{1+\Delta}}{2}$. Эту оценку нельзя улучшить. Действительно, пусть $\Delta = 1$. Тогда $\varphi(1) = \varphi'(1) = 0$. По теореме о единственности решения $\varphi = 0$, $\theta = 1$ и никакого фильтрационного потока нет. С уменьшением Δ предельное значение φ_{Δ} не уменьшается, т.е. расход из массива увеличивается. Решение (4) в параметрическом виде, с параметром $\frac{\varphi}{\varphi_{\Delta}}$, принимает вид

$$\frac{1-\sqrt{\theta^3}}{1-\sqrt{\Delta^3}} = \frac{\int_{\varphi_{\Delta}}^{\varphi} \frac{dt}{\lambda}}{\int_0^1 \frac{dt}{\lambda}}, \quad \zeta = \sqrt{\theta \cdot \ln \frac{\varphi^*}{\varphi}}, \quad (5)$$

где $\lambda = \sqrt{\ln \frac{1+t}{2t}}$.

Расчет поля фильтрационного потока производится в следующей последовательности.

Даны H, k, Q_e, γ .

1) Вычисляются $\varphi_{\Delta} := \varphi(\Delta) = \frac{2}{3} \frac{1-\sqrt{\Delta^3}}{\int_0^1 \frac{dt}{\lambda}}$ и из ус-

ловия $\varphi_{\Delta} = \frac{\gamma}{2}$ высота промежутка высачивания Δ .

Допускается асимптотическая оценка интеграла в знаменателе

$$\int_0^1 \frac{dt}{\lambda} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sqrt{k+1}}{2^k} \cong \frac{\pi}{2(\ln 2)^{\frac{3}{2}}} \times \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2^{k-1} (\ln 2)^{\frac{2k+1}{2}}}{(2k+1)!!} \right).$$

2) Если $\Delta = 0$, $\varphi(0) := \varphi_0$, то $\varphi_0 = \frac{2}{3} \frac{1}{\int_0^1 \frac{dt}{\lambda}} > \varphi_{\Delta}$. Это

значение φ_{Δ} , отвечающее $\Delta = 0$, соответствует боль-

шим значениям $\gamma: \gamma \rightarrow \infty$, т.е. большим значениям $\tau = \frac{kt}{H}$ (стационарному режиму). Тогда

$$\varphi := \frac{\varphi_{\Delta}}{\varphi_0} = 1 - \sqrt{\Delta^3}, \quad \Delta = (1-\varphi)^{\frac{2}{3}} \cong (1-\sqrt{\tau})^{\frac{2}{3}}, \quad \tau \leq 1.$$

Например, в начальный момент откачки воды или дренирования $\tau \ll 1$, $\gamma \ll 1$, $\Delta = 1 - \varepsilon$, $\varepsilon \ll 1$. Так, если $\tau = 0,1 \rightarrow \Delta = 0,7761$; $\tau = 0,5 \rightarrow \Delta = 0,4410$; $\tau = 0,9 \rightarrow \Delta = 0,1381$. Отсюда ясно, что скорость падения депрессионной кривой убывает с увеличением t . Депрессионная кривая "отрывается" от естественного уровня грунтовой воды $h(t, x) = H$ только в окрестности выходного сечения $x = 0$ ($\xi = 0$). Такая форма кривой депрессии характерна для так называемой "быстрой" откачки. Если $\tau = O(1)$, $t = O(H/k)$, то депрессионная кривая в выходном сечении приближается к урезу воды в траншее или дренаже. Очевидно:

$$\frac{d\Delta}{d\tau} = -\frac{2}{3(1-\varphi)^{\frac{1}{3}}} \frac{1}{\varphi_0} \frac{d\varphi_{\Delta}}{d\tau}; \quad \frac{d\varphi_{\Delta}}{d\tau} \frac{1}{2} \frac{d\gamma}{d\tau} = \frac{q_e}{2\sqrt{\tau k H}},$$

$h_0 = 0$

В последующие моменты времени, близкие к началу откачки, высота промежутка высачивания уменьшается быстро, как величина $O(\tau^{\frac{1}{3}})$. Затем скорость падения конца депрессионной кривой замедляется. Установление стационарного режима фильтрации составляет время порядка $O\left(\frac{H}{k}\right)$. Для коэффициента фильтрации порядка метра в сутки и начального напора (мощности водоносного слоя) в несколько метров установление стационарного фильтрационного режима займет несколько суток (при условии постоянства интенсивности удаления воды из траншеи или дренажа). При кратковременном включении стока депрессионная кривая не достигает уреза воды, чем обусловлено существование промежутка высачивания в выходном сечении фильтрационного потока.

Предложенная методика позволяет назначать скорость снижения уровня воды в бьефе, исключая разрушение грунтовых сооружений.

Список литературы

1. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. — М.: Наука, 1978.
2. Полянский А. Д., Зайцев В. Ф. Справочник по нелинейным уравнениям математической физики. — М.: Физмат, 2002.

Обоснование выбора расчетной зависимости для определения транспорта наносов в процессе развития прорана в теле однородных земляных намывных плотин

Косарев С. Г., кандидат техн. наук (Восточный филиал ФГУП “РосНИИВХ”, г. Чита)

Рассмотрены принятые в современной литературе подходы к определению динамики развития прорана в теле земляных плотин вследствие возникновения аварийных ситуаций. Проведено сопоставление зависимостей для расчета транспорта наносов, используемых в русловой гидравлике и напорном гидротранспорте. Предложены рекомендации по определению транспортирующей способности потока при развитии прорана в теле однородных земляных намывных плотин.

Ключевые слова: транспорт наносов, земляная плотина, развитие прорана, ширина прорана, гидравлическая крупность частиц, скорость потока, расход.

Аварии земляных плотин представляют серьезную опасность, связанную с затоплением прилегающей территории вследствие прохождения волны прорыва. Формирование волны прорыва в значительной степени определяется динамикой развития прорана. Процессу развития прорана во времени в теле земляных плотин посвящено немало работ [например, 1, 2, 3, 4]. Можно выделить два подхода, описывающие процесс развития прорана [5].

Первый подход предусматривает применение эмпирических зависимостей, обоснованных натурными данными и результатами экспериментальных наблюдений. Так, в работе [1] для конечной ширины прорана предложена зависимость

$$B = 0,66k_0(WH)^{0,25}, \quad (1)$$

где k_0 — коэффициент, зависящий от сценария аварийной ситуации (при переливе воды через гребень $k_0 = 1$); W и H — соответственно объем излива и начальный напор.

А. М. Прудовским [2] предложена зависимость изменения ширины прорана во времени, полученная на основании обработки результатов лабораторных опытов, выполненных в гидравлической лаборатории Научно-исследовательского института энергетических сооружений при изучении смыва однородных “плавких вставок”. Эта зависимость, с учетом более детальных исследований [6, 7], выполненных совместно с К. Р. Пономарчук, имеет вид

$$\frac{dB}{dt} = 0,06 \frac{g^{1/2} h_t^{9/2}}{\Omega^2}, \quad (2)$$

где h_t — текущий напор (разность отметок верхнего бьефа и дна прорана); Ω — площадь поперечного сечения плотины.

При таком подходе не учитывается фракционный состав грунта, слагающего подпорное сооружение, что является существенным недостатком.

Второй подход [3, 4] построен на использовании расчетных схем, основанных на моделировании транспорта частиц грунта потоком. В Методике [5] отмечается: “... такой подход весьма перспективен, так как в нем учитываются характеристики грунта (размеры его частиц, связность и т.д.), геометрические размеры конкретной плотины, гидродинамика потока. Его применение усложняется, во-первых, необходимостью адаптации и верификации применительно к бурным потокам с высокой концентрацией частиц. Во-вторых, существенную роль на развитие прорана в грунтовой плотине оказывает процесс обрушения (оползания) его откосов. Количественная оценка этого процесса требует рассмотрения дополнительных гипотез”.

Здесь необходимо особо подчеркнуть, что расчет расхода наносов по формулам различных авторов имеет большую погрешность. Как указано в работе [8]: “... ошибка расчетов только за счет неточности измерения и расчета скорости ... достигает 60 %”. В работе [9] показано, что из-за структуры формул результаты по ним могут отличаться на порядок. Таким образом, вопрос о выборе наиболее пригодной формулы расчета транспорта наносов остается открытым.

Целью нашей работы является обоснование выбора расчетной зависимости для определения транспорта частиц грунта на примере однородных земляных намывных плотин. Выбор данного типа плотин обусловлен тем, что при достаточно больших скоростях течения транспорт наносов в этом случае осуществляется в основном во взвешенном состоянии.

Для обоснования расчетной зависимости по определению расхода взвешенных частиц, определяющих динамику развития прорана, будут рассмотрены и сопоставлены распространенные в ру-

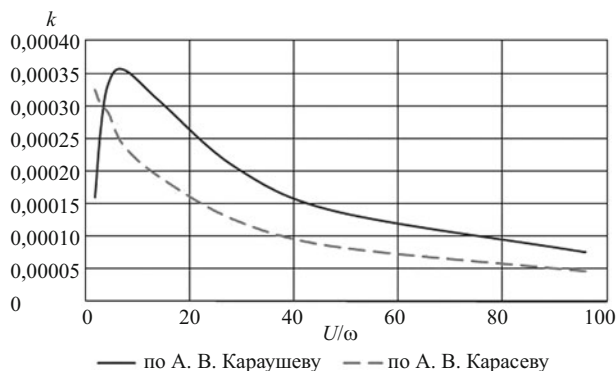


Рис. 1. Значения коэффициента k в формуле (3), определенно-го по формулам А. В. Караушева и И. Ф. Карасева при $C = 44$

словой гидравлике формулы по определению транспортирующей способности взвешенных наносов. Для адаптации этих зависимостей применительно к бурным потокам с высокой концентрацией частиц будет рассмотрен транспорт наносов в напорных пульпопроводах (гидротранспорт), характеризующийся значительными скоростями течения.

Расчетные зависимости, принятые к рассмотрению. В отечественной нормативно-справочной литературе [10, 11 и др.] довольно широкое распространение получил способ оценки транспортирующей способности взвешенных наносов, разработанный К. И. Россинским и И. А. Кузьминым [12], принявшими установленную М. А. Великановым зависимость концентрации взвешенных наносов от безразмерного параметра $U^3/gh\omega$:

$$S_M = S\rho_S = k\rho \frac{U^3}{gh\omega}, \quad (3)$$

где S_M — концентрация наносов в потоке, т.е. массовое содержание наносов в объеме руслового потока, $\text{кг}/\text{м}^3$; S — среднее по живому сечению объемное содержание наносов в единице объема руслового потока; ρ_S и ρ — плотности материала (частиц) наносов и воды соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$; U — средняя скорость потока, $\text{м}/\text{с}$; g — ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$; h — глубина потока, м ; ω — гидравлическая крупность, $\text{м}/\text{с}$; k — коэффициент, лежащий в пределах $(0,48 \dots 2,4) \cdot 10^{-4}$. Наибольшее значение k соответствует процессу отложений наносов, наименьшее — процессу размыва. Аналогичные зависимости с коэффициентом k , лежащим в указанных выше пределах, были также предложены рядом других авторов (А. Раудкиви, С. Х. Абальянц, Ф. С. Салахов и др.).

Особо следует отметить упрощенную зависимость Р. А. Бэгнольда, имеющей вид (3), в которой значение коэффициента k пропорционально коэф-

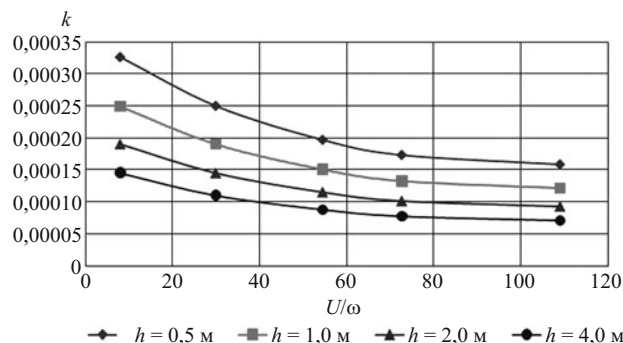


Рис. 2. Значения коэффициента k в формуле (3), определенно-го по формуле (9)

фициенту гидравлического трения λ , определенно-го по формуле Маннинга, в первой степени:

$$k = k_1\lambda, \quad \lambda = 2gn^2h^{-1/3}, \quad (4)$$

где n — коэффициент шероховатости.

Поскольку значения коэффициента k изменяются в довольно широком диапазоне, рассмотрим также зависимости для транспортирующей способности взвешенных наносов А. В. Караушева и И. Ф. Карасева, часто используемые в отечественной литературе.

Значение средней мутности потока, соответствующее транспортирующей способности, А. В. Караушев [13] предлагает определять по зависимости

$$S_M = S_{\text{взм}}\Gamma, \quad (5)$$

где Γ — так называемый гидромеханический параметр наносов, являющийся функцией коэффициента Шези C и безразмерной величины $G = \omega/U$; значение параметра Γ представлено в виде таблицы [13]; $S_{\text{взм}}$ — мутность взмыва, определяемая по формуле

$$S_{\text{взм}} = 0,15N\eta^2 \frac{U^2}{h}, \quad (6)$$

где $N = \frac{(0,7C + 6)C}{g}$ — безразмерный параметр;

$\eta = \sqrt{\frac{0,53C - 4,1}{C - 2}}$ — коэффициент, выражающий отношение донной скорости к средней.

И. Ф. Карасев в [14] для расхода взвешенных наносов предложил формулу вида

$$S_M = 0,755S_{\text{взм}} \text{БЭ} \left(\frac{U\sqrt{g}}{0,755U\sqrt{g} + 0,5\omega C} \right), \quad (7)$$

где $S_{взм} = 0,0002\rho_S \left(\frac{\rho}{\rho_S - \rho} \right) \frac{C^2 U^2}{g^2 h} \eta$ — мутность взмыва; $\varepsilon = 1,0 - 0,18 \frac{\omega C}{U\sqrt{g}}$ — так называемая статистическая вероятность;

$S_{взм} = 0,0002\rho_S \left(\frac{\rho}{\rho_S - \rho} \right) \frac{C^2 U^2}{g^2 h} \eta$ — соотношение средней и донной мутности; $\eta = 1,08 - 0,58 \left(\frac{U_C}{U} \right)^2$ — вероятность срыва; $U_C = 3,9d^{0,3}h^{0,2}$ — срывающая скорость по В. Н. Гончарову.

Транспорт наносов в напорных пульпопроводах описывается уравнением [15]

$$U = 4,9S^{0,36} \left(\frac{\sqrt{gD}}{4\sqrt{C_j}} \right), \quad (8)$$

где D — диаметр трубопровода; C_j — коэффициент лобового сопротивления частиц грунта, определяется по таблице [15].

Заменив в формуле (8) диаметр трубопровода гидравлическим радиусом $D = 4R$ и приняв, что $R \approx h$, для транспортирующей способности в теле плотин получим зависимость

$$S_m = \rho_S \left[U \frac{\sqrt[4]{C_j}}{9,8\sqrt{gh}} \right]^{2,78}. \quad (9)$$

Результаты численного эксперимента и их обсуждение. При выполнении численного эксперимента по формулам русловой гидравлики параметры потока и взвешенных частиц варьировались в следующих пределах: средняя скорость потока $U = 0,5 \dots 5,0$ м/с; глубина потока $h = 0,5 \dots 5$ м; коэффициент шероховатости $n = 0,02 \dots 0,04$; гидравлическая крупность взвешенных частиц $\omega = 0,001 \dots 0,2$ м/с (что соответствует их диаметрам $d \approx 0,04 \dots 3,0$ мм).

В результате расчета транспортирующей способности потока по формулам А. В. Караушева (5) и И. Ф. Карасева (7), приведенных к зависимости типа (3), при различных значениях коэффициента Шези, определенного по формуле Маннинга ($C = 22 \dots 60$), и отношений динамической скорости $U_* = \frac{U\sqrt{g}}{C}$ к гидравлической крупности частиц

($\frac{U_*}{\omega} = 1,7 \dots 100$), можно установить некоторые характерные тенденции (на рис. 1 представлены результаты расчета коэффициента k в формуле (3), определенного по формулам А. В. Караушева и И. Ф. Карасева при $C = 44$; аналогичные результаты получены при других значениях коэффициента Шези):

значения коэффициента пропорциональности k уменьшаются при увеличении относительных скоростей течения;

значения коэффициента пропорциональности k возрастают с увеличением коэффициента Шези C ;

средневзвешенные значения коэффициента пропорциональности k , определенные по зависимостям А. В. Караушева (5) и И. Ф. Карасева (7), лежат в пределах $0,000065 \dots 0,00024$ (табл. 1), что согласуется с достаточно обширными материалами натурных данных К. И. Россинского и И. А. Кузьмина ($k = 0,000048 \dots 0,00024$).

Для адаптации и верификации коэффициента пропорциональности k для бурных потоков при значительной концентрации взвеси проведено также численное моделирование транспорта наносов в напорных пульпопроводах по формуле (9). Параметры потока и транспортируемых частиц изменялись в следующих пределах: средняя скорость потока $U = 2 \dots 6$ м/с; глубина потока $h = 0,5 \dots 4$ м; средний диаметр транспортируемых частиц $d = 0,5 \dots 5,0$ мм.

Значения коэффициента пропорциональности k в формуле (3), определенного по зависимости (9), представлены на рис. 2. Как видно из рис. 2, при транспорте наносов в бурных потоках при значительной концентрации взвеси наблюдается тенденция, определенная из формул русловой гидравлики: уменьшение коэффициента пропорциональности k от $0,00033$ до $0,00009$ с увеличением относительной скорости и увеличением глубины потока.

Таким образом, как показывают выполненные по различным формулам расчеты, значения коэф-

Средневзвешенные значения коэффициента пропорциональности k в формуле (3), определенного по зависимостям А. В. Караушева (5) и И. Ф. Карасева (7)

Коэффициент Шези C	Средневзвешенное значение k , определенное по формуле	
	А. В. Караушева (5)	И. Ф. Карасева (7)
22	0,000135	0,000065
33	0,000165	0,000095
44	0,000190	0,000120
60	0,000240	0,000165

коэффициента пропорциональности k могут быть представлены в виде функции глубины потока h и относительной скорости U_*/ω (рис. 2), определенного из зависимости (9).

Замена коэффициента пропорциональности k коэффициентом k_1 по зависимостям (4) может практически исключить влияние глубины потока. Вместе с тем это не приводит к упрощению расчетов, поскольку k_1 также является переменной величиной, зависящей от относительной скорости, только вместо функции глубины потока появляется зависимость от коэффициента шероховатости.

Выводы

1. Средневзвешенные значения коэффициента пропорциональности k в формуле (3), определенно по зависимостям русловой гидравлики и транспорта наносов в напорных пульпопроводах, отражают их общую тенденцию к уменьшению коэффициента пропорциональности k при увеличении относительной скорости течения и глубины потока.

2. Поскольку транспорт наносов по различным формулам определяется со значительной погрешностью, его расчет предлагается выполнять по зависимости типа (3), что потребует минимального количества исходных данных, и может быть достаточно просто реализовано при составлении программы расчета развития прорана в теле однородных земляных намывных плотин.

3. Значения коэффициента пропорциональности k рекомендуется назначать в зависимости от параметров потока в проране и средневзвешенного диаметра частиц грунта по графику (рис. 2).

Список литературы

1. *Dam-Break Flood Analysis*. Committee on hydraulics for dams. ICOLD. Bulletin 111. 1998.
2. Прудовский А. М. Образование прорана при прорыве земляной плотины // Безопасность энергетических сооружений. — М.: НИИЭС. 1998. Вып. 2. С. 67 – 79.
3. Климович В. И., Прокофьев В. А. Расчет параметров волны прорыва и определение границы зоны затопления при аварии на ЗШО // Гидротехническое строительство. 2001. № 1.
4. РД 03-607-03. Методические рекомендации по расчету развития гидродинамических аварий на накопителях жидких промышленных отходов. — М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2003.
5. СО 34.21.547-2005. Методика расчета зоны затопления и оценки выноса золошлакового материала при гидродинамической аварии на золоотвалах ТЭС / ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2005.
6. Пономарчук К. Р., Прудовский А. М. Экспериментальные исследования процесса разрушения грунтовых плотин: в 2 т. Т. 1 // Природообустройство и рациональное природопользование – необходимые условия социально-экономического развития России // Сб. научн. трудов. — М.: МГУП, 2005.
7. Пономарчук К. Р. Оценка влияния раскрытия прорана в грунтовой плотине на гидравлический режим нижнего бьефа // Роль природообустройства сельских территорий в обеспечении устойчивого развития АПК. Международная научно-практическая конференция // Сб. материалов. — М.: МГУП, 2007.
8. Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы. — Л.: Гидрометеиздат, 1988.
9. Знаменская Н. С. Гидравлическое моделирование русловых процессов. — Л.: Гидрометеиздат, 1992.
10. Гидравлические расчеты водосборных гидротехнических сооружений: Справочное пособие / Под ред. А. Б. Векслера [и др.]. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
11. СО 34.21.204-2005. Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов / ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2005.
12. Россинский К. И., Кузьмин И. А. Балансовый метод расчета деформации дна потока // Труды ГГИ. 1964. Вып. 12.
13. Караушев А. В. Теория и методы расчета речных наносов. — Л.: Гидрометеиздат, 1977.
14. Карасев И. Ф. Русловые процессы при переброске стока. — Л.: Гидрометеиздат, 1975.
15. Пособие по проектированию гидравлического транспорта (к СНиП 2.05.07-85). — М.: Стройиздат, 1988.

Методика расчета развития прорана в теле однородных земляных намывных плотин вследствие возникновения аварийных ситуаций

Косарев С. Г., кандидат техн. наук
(Восточный филиал ФГУП "РосНИИВХ", г. Чита)

Предложена модель выноса грунта из тела прорана с учетом его обрушения. Разработана методика расчета развития прорана в теле однородных земляных намывных плотин с учетом гранулометрического состава частиц, слагающих ее тело. На примере реального объекта определена динамика изменения во времени ширины прорана и расхода истечения из него. Результаты численного эксперимента сопоставлены с данными других авторов.

Ключевые слова: транспорт наносов, земляная плотина, развитие прорана, ширина прорана, гидравлическая крупность частиц, скорость потока, расход.

Динамика развития прорана в теле земляных плотин играет решающую роль при определении расхода излива через тело плотины, что, в свою очередь, позволяет правильно оценить возможный ущерб при прохождении волны прорыва в нижнем бьефе, и наметить мероприятия по его предотвращению.

Используемые в настоящее время зависимости для определения изменения ширины прорана во времени не учитывают характеристики грунта. В работе [1] на основании численного эксперимента по определению расхода наносов в теле однородных земляных намывных плотин, выполненного по формулам русловой гидравлики и транспорта наносов в напорных пульпопроводах (гидротранспорт), характеризующегося значительными скоростями течения, предлагается использовать известную зависимость

$$S_M = S\rho_s = k\rho \frac{U^3}{gh\omega}, \quad (1)$$

где S_M — транспортирующая способность потока или концентрация наносов в потоке — массовое содержание наносов в объеме руслового потока, $\text{кг}/\text{м}^3$; S — среднее по живому сечению объемное содержание наносов в единице объема руслового потока; ρ_s и ρ — плотности материала (частиц) наносов и воды соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$; U — средняя скорость потока, $\text{м}/\text{с}$; g — ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$; h — глубина потока, м ; ω — гидравлическая крупность, $\text{м}/\text{с}$; k — некоторый коэффициент пропорциональности. Значения k рекомендуется назначать по рис. 2 [1].

Вместе с тем в современной литературе отсутствуют рекомендации, связанные с обрушением (оползанием) откосов прорана в процессе его размыва. При незначительной конечной ширине прорана B , соизмеримой с высотой плотины $H_{пл}$, данный процесс не оказывает существенного влияние

на результаты расчета, поскольку вынос твердого материала осуществляется по всей ширине прорана. Когда $B > H_{пл}$, размыв прорана осуществляется непосредственно у откосов прорана в месте их оползания. В этом случае при определении выноса твердого материала из прорана необходимо оперировать не действительным расходом потока, а только той его частью, которая оказывает непосредственное влияние на динамику расширения прорана.

Целью данной работы являются разработка и реализация модели развития прорана в теле однородных земляных насыпных плотин с учетом обрушения откосов прорана, расчет его развития для реального объекта и сопоставление полученных результатов с зависимостями других авторов, обоснованных достаточно обширными лабораторными и натурными исследованиями.

Механизм развития прорана в теле плотины при значительной его ширине. В предлагаемой модели развития прорана с учетом обрушения его откосов, при $B > H_{пл}$, вводятся две величины, необходимые в дальнейшем для выполнения расчетов: эффективная площадь живого сечения Ω_3 , и эффективный расход Q_3 .

Эффективная площадь живого сечения (рис. 1) представляет собой часть площади живого сечения, где поток осуществляет вынос твердого материала из тела плотины, связанный с расширением прорана. Тогда в соответствии с данным определением эффективный расход равен

$$Q_3 = U\Omega_3. \quad (2)$$

Эффективная площадь живого сечения Ω_3 (рис. 1) может быть определена как

$$\Omega_3 = mh^2, \quad (3)$$

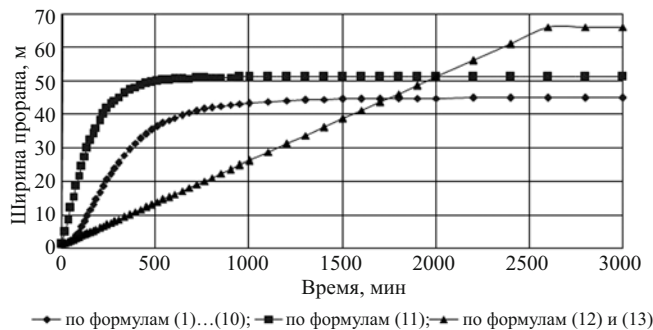


Рис. 2. Изменение ширины прорана во времени

лической крупности $\omega = 0,28$ м/с [2]; плотность грунта принята равной $\rho_{гр} = 1750$ кг/м³.

Водохранилище-охладитель: тип — наливное; месторасположение — пойма р. Онон (Забайкальский край); водозабор осуществляется из наземного источника; при напоре $H_1 = 5$ м, что с учетом ветрового нагона и наката волн может вызвать перелив через гребень, объем водохранилища составляет $V_1 = 20$ млн м³ площадь водного зеркала считается постоянной и равной $\Omega_{вз} = 20\,000\,000/5 = 4\,000\,000$ м².

Расчет развития прорана выполнен в среде “Microsoft Excel” по зависимостям (1) – (10). Шаг этапа составлял 60 с. Результаты расчета представлены на рис. 2. На этом же рисунке представлен расчет развития прорана, выполненный по зависимости, предложенной А. М. Прудовским и К. Р. Пономарчук [3, 4] в принятых в данной работе обозначениях:

$$\frac{dB}{dt} = 0,06 \frac{g^{1/2} H_i^{9/2}}{\Omega_{пл}^2}, \quad (11)$$

где H_i — текущий напор (разность отметок верхнего бьефа и дна прорана).

Конечная ширина может быть также определена по формуле [5]

$$B_k = 0,66k_0(V_1H_1)^{0,25}, \quad (12)$$

где k_0 — коэффициент, зависящий от сценария аварийной ситуации (при переливе воды через гребень $k_0 = 1$).

Конечная ширина прорана, определенная по зависимости (12), равна 66 м; по зависимости (11) — 51,1 м; по зависимостям (1) – (10) — 44,8 м.

Как видно, результаты расчета по определению ширины прорана по предлагаемой в настоящей статье методике неплохо согласуются с зависимостями (11) и (12). Вместе с тем в качестве основного недостатка зависимостей (11) и (12) необходимо отметить, что они не учитывают фракционный состав грунта, слагающего плотину. Еще одним существенным недостатком зависимости (12) является невозможность определения ширины прорана в опре-

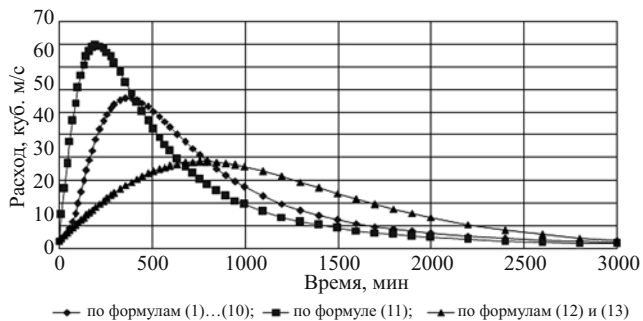


Рис. 3. Изменение расхода воды при истечении через проран

деленный момент времени. Так, в работе [6] при расчете параметров волны прорыва конечная ширина прорана определяется по зависимости (12), а изменение ширины прорана описывается линейной зависимостью. Условное время развития прорана (час) в подходе, реализованном в [6], принимается по формуле [5]

$$T = 0,07 \frac{V_1^{0,47}}{H_1^{0,9}}. \quad (13)$$

Изменение ширины прорана во времени, определенной по рекомендациям [6], также представлено на рис. 2.

Необходимо отметить, что именно характер изменения ширины прорана во времени является определяющим фактором при расчете расхода истечения через проран, что, в свою очередь, существенно влияет на параметры волны прорыва.

Определение расхода истечения через проран. На рис. 3 представлены графики изменения расхода при истечении через расширяющийся во времени проран по исходным данным, представленным выше. Расход через проран определялся по зависимости (4). Изменение объема водохранилища и падение уровней воды верхнего бьефа определялись соответственно по соотношениям (8) и (9). Отличия при определении расходов обусловлены только характером изменения ширины прорана во времени.

Как видно из графиков, представленных на рис. 3, максимальный расход 445,6 м³/с, определенный по зависимости, рекомендованной в работах [3, 4], на 35 % превышает расход, определенный по предлагаемой в настоящей работе методике, — 329,8 м³/с. Максимальный расход 189,8 м³/с, вычисленный по рекомендациям [6], почти в 2 раза меньше, что в итоге может привести к недооценке последствий, возможных вследствие распространения волны прорыва.

Влияние фракционного состава грунта и начальных параметров бреши на динамику развития прорана. Чтобы показать влияние фракционного состава грунта на процесс развития прорана и максимального расхода истечения из него, нами был

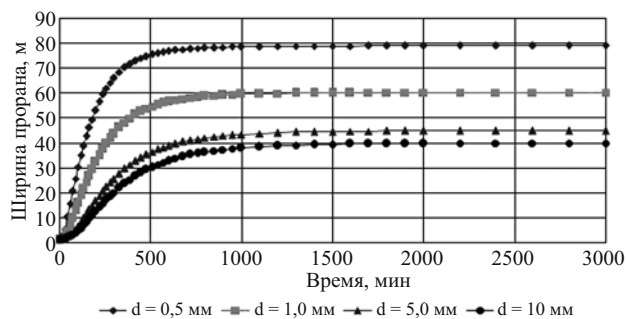


Рис. 4. Изменение ширины прорана во времени при различных средних диаметрах частиц, слагающих плотину

выполнен расчет по зависимостям (1)–(10) для плотины с представленными выше параметрами, но при различном среднем диаметре частиц грунта: 0,5; 1,0; 10 мм. Результаты расчета представлены на рис. 4 и 5. Как видно из данных графиков, при изменении среднего диаметра частиц грунта в 20 раз конечная ширина и максимальный расход отличаются в 2 раза, что является существенным показателем при оценке последствий аварии.

Предлагаемая в настоящей статье методика, в отличие от рассмотренных здесь методик других авторов, позволяет также определять динамику изменения ширины прорана и расхода из него при различных сценариях возникновения аварийной ситуации, например при суффозии тела плотины. Так, при начальной ширине бреша 50 м, вызванной суффозией в теле плотины Харанорской ГРЭС, конечная ширина прорана составит 67,4 м, а максимальный расход истечения из него — 792,1 м³/с; при начальной ширине бреша 100 м — соответственно 109,7 м и 1584 м³/с.

Выводы

1. Существенным недостатком используемых в современной научной литературе зависимостей по развитию прорана в теле земляных плотин является неучет фракционного состава грунта, слагающего тело плотины, и, как следствие, транспортирующей способности потока, которая главным образом и определяет динамику развития прорана. В работе показано, что при изменении среднего диаметра частиц грунта, слагающего плотину, в 20 раз (от 0,5 до 10 мм) значения конечной ширины прорана и максимального расхода истечения из него отличаются в 2 раза, что является весьма существенным показателем при оценке ущерба, возможного вследствие прорыва плотины водохранилища.

2. Предлагаемая в настоящей работе методика учитывает транспортирующую способность потока, а также механизм выноса грунта из тела плотины с учетом ее обрушения, что делает ее более

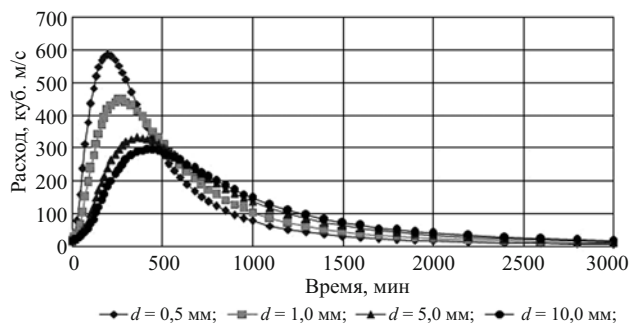


Рис. 5. Изменение расхода воды при истечении через проран при различных средних диаметрах частиц, слагающих плотину

обоснованной с физической точки зрения. Она достаточно проста в реализации и доступна широкому кругу инженеров и проектировщиков.

3. На примере реального объекта показано, что значения конечной ширины прорана, определенной по предлагаемой методике, неплохо согласуются с обширными материалами натуральных данных и лабораторных исследований других авторов. Характер изменения ширины прорана (линейная зависимость, рис. 2), принятый в работе [6], существенно занижает максимальный расход излива из прорана, что приводит к недооценке ущерба, возможного вследствие прохождения волны прорыва.

5. Предлагаемая в настоящей статье методика позволяет рассчитывать динамику изменения ширины прорана и расхода истечения из него при различных сценариях возникновения чрезвычайной ситуации, что определяется начальными параметрами бреша в теле плотины.

Список литературы

1. Косарев С. Г. Обоснование выбора расчетной зависимости для определения транспорта наносов в процессе развития прорана в теле однородных земляных намывных плотин // Гидротехническое строительство. 2012. № 4.
2. Гидравлические расчеты водосборных гидротехнических сооружений: Справочное пособие / Под ред. А. Б. Векслера [и др.]. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Пономарчук К. Р., Прудовский А. М. Экспериментальные исследования процесса разрушения грунтовых плотин: в 2 т. Т. 1 // Природообустройство и рациональное природопользование — необходимые условия социально-экономического развития России // Сб. науч. трудов. М.: МГУП, 2005.
4. Пономарчук К. Р. Оценка влияния раскрытия прорана в грунтовой плотине на гидравлический режим нижнего бьефа // Роль природообустройства сельских территорий в обеспечении устойчивого развития АПК. Международная научно-практическая конференция // Сб. материалов. — М.: МГУП, 2007.
5. Dam-Break Flood Analysis. Committee on hydraulics for dams. ICOLD. Bulletin 111. 1998.
6. СО 34.21.547-2005. Методика расчета зоны затопления и оценки выноса золошлакового материала при гидродинамической аварии на золоотвалах ТЭС / ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2005.

Исследования водоприемного устройства гидроаккумулирующей электростанции

Бальзанников М. И., доктор техн. наук, Селиверстов В. А., доцент
(Самарский государственный архитектурно-строительный университет)

Применение секционной водоприемной камеры позволит обеспечить существенное сокращение ее длины и значительно снизить затраты на возведение водоприемного устройства.

Ключевые слова: ГАЭС, насосный режим, водоприемник, скорость течения.

Особенностью гидроаккумулирующей электростанции (ГАЭС) является ее работа как в турбинном, так и в насосном режиме соответственно с выработкой или потреблением электрической энергии. В турбинном режиме водный поток в пределах водоприемного устройства трансформируется из безнапорного (при движении воды из верхового аккумулялирующего водоема) в напорное течение (в напорном водоводе). В насосном же режиме вода подается из напорного водовода в верховой водоем, вследствие чего водоприемное устройство ГАЭС фактически работает как водовыпуск [1].

Схема водоприемного устройства представлена на рис. 1. Верхняя кромка входного сечения водоприемной камеры водоприемного устройства обычно заглублена под уровень воды не менее чем на 0,5 – 1,0 м в целях предотвращения попадания плавающих тел, льда и мусора в напорный водовод. Для обеспечения плавного входа воды из водохранилища в напорный водовод водоприемная камера выполняется раструбной. Ее раструбность обычно определяется углом наклона потолка водоприемной камеры β , поскольку наклон пола этой камеры незначителен или вообще не предусматривается.

Основные параметры водоприемного устройства — длина L и угол наклона β определяют его общие габариты и затраты на возведение. Вместе с тем от этих же параметров в значительной степени зависят гидравлические условия течения воды и величина потерь напора в водоприемном устройстве, а следовательно, стоимость потерь энергии в нем. Важно выбрать такие основные параметры водоприемного устройства, которые бы обеспечивали наименьшие потери напора в нем и были приемлемыми по стоимости строительства, тогда использование энергии водного потока будет наиболее эффективным.

Для турбинного режима водоприемная камера является конфузурным элементом и наименьшие потери напора потока в ней соответствуют углу $\beta = 28...35^\circ$. В насосном же режиме камера диффузорная и наименьшие потери имеют место при значительно меньших углах. Об этом свидетельствуют результаты исследований ряда ученых, в частности

ученых ОАО “Институт Гидропроект” и Ленинградского политехнического института [2, 3]. Проверка условий течения воды в водоприемной камере была выполнена также авторами настоящей статьи [4, 5].

Исследования моделей водоприемного устройства ГАЭС были выполнены в Самарском государственном архитектурно-строительном университете численным методом с применением “Ansys”. Использовалась свободная конечно-элементная сетка, позволяющая разбивать на конечные элементы геометрически сложные конструктивные элементы. Граничные условия определялись и задавались перед созданием конечно-элементной геометрической модели. Для оценки достоверности результатов проводились повторные запуски расчетов. Кроме того, были выполнены дублирующие исследования ряда характерных конструкций на физических моделях. Модели размещались в гидравлическом лотке. Масштаб физических моделей составлял 1:20 и 1:25. Исследовалась работа водоприемного устройства при его работе в турбинном и насосном режимах. При этом поток воды в модели имел соответственно конфузурный или диффузорный характер. Вместе с рабочей зоной водоприемного устройства моделировались подходной и отводной участки водопроводящего тракта. Используемая экспериментальная установка представляла собой сеть последовательно расположенных друг за другом водопроводящих элементов с круговым водооборотом. Основными элементами стенда являлись водосберегательный бассейн, напорный бак и рабочая область гидравлического лотка. Элементы гидравлического лотка установки были выполнены с применением органического стекла и алюминиевого профиля. Основные габаритные размеры установки: общая длина — 4,2 м, ширина — 1,2 м. Исследуемые модели водоприемного устройства размещались в рабочей области лотка. Варьируемыми геометрическими параметрами модели являлись высота участка водовода, длина раструбной части водоприемного устройства и угол наклона потолочного элемента конфузурной части водоприемной камеры. Модель предусматривала также возмож-

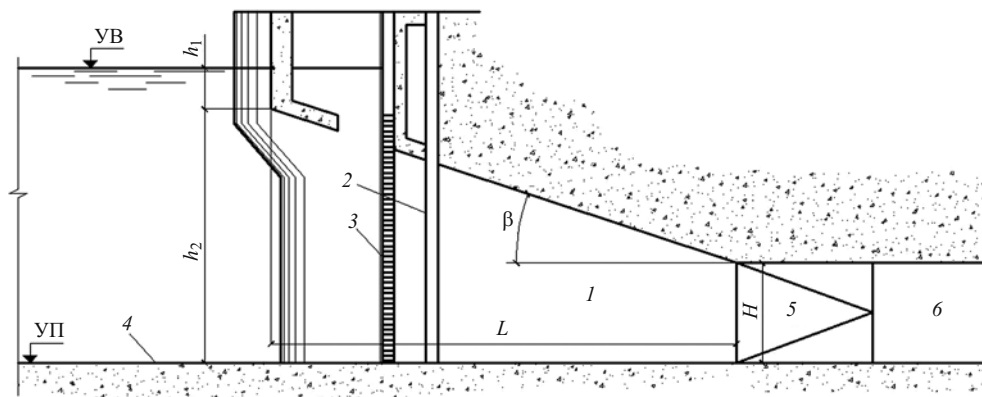


Рис. 1. Схема водоприемного устройства ГАЭС: 1 — водоприемная камера; 2 — паз затвора; 3 — сороудерживающая решетка; 4 — фундаментная плита; 5 — переходной участок; 6 — напорный водовод; УВ — уровень воды; УП — отметка порога; h_1 — заглубление верхней кромки камеры под УВ; h_2 — высота входного сечения камеры; L — длина водоприемной камеры; β — угол наклона потолка камеры; H — высота входного сечения напорного водовода

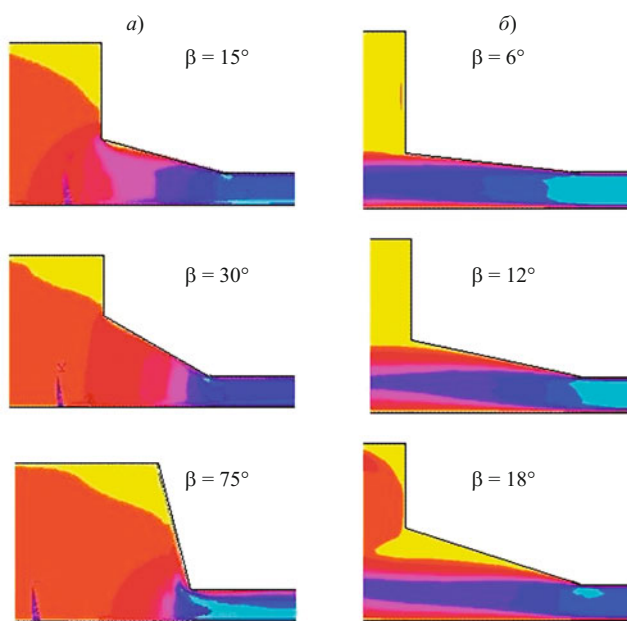


Рис. 2. Изменение скоростей потока в водоприемной камере ГАЭС: а — для турбинного режима; б — для насосного режима

ность установки в водоприемной камере потоконаправляющих элементов в виде разделителей потока. Высота участка водовода принималась равной 400 и 280 мм, длина раструбного участка составляла 600 мм, а угол наклона потолочного элемента в турбинном режиме изменялся от 10 до 60°, в насосном — от 5 до 30°. Указанные диапазоны параметров соответствовали параметрам водоприемных и водовыпускных устройств известных ГЭС, ГАЭС и насосных станций. Полученные данные хорошо совпадали.

Исследовалась конструкция водоприемного устройства, имеющая горизонтальный пол (в соответствии с рис. 1). Изменение раструбности обеспечивалось изменением угла наклона потолочного элемента.

Обработка результатов исследований позволила выявить влияние основных параметров водоприемного устройства — длины водоприемной камеры L и угла β — при их варьировании в широких диапазонах на характеристики водного потока.

Изменения скоростей потока в водоприемной камере при различных углах β для турбинного и насосного режимов представлены на рис. 2.

Анализ полученных результатов показал, что для турбинного режима увеличение угла β сверх указанных выше значений 28 – 35° приводит к росту неравномерности потока сразу за входным сечением напорного водовода. Причем при весьма больших значениях угла β появляется отрыв потока от потолочной части водовода. Если угол β принимает значения, которые меньше 28 – 35°, то увеличивается неравномерность потока во входном сечении водоприемной камеры (в начальном сечении конфузормого элемента) вплоть до появления отрывной зоны сразу за этим сечением.

На рис. 3 приводятся данные об относительных величинах скоростей водного потока во входном сечении водоприемной камеры.

Неравномерность потока в сечении оценивалась по значению коэффициента Кориолиса, определяемому по формуле [6]

$$\alpha = \frac{1}{\omega} \int_{\omega} \left(\frac{V_i}{V_{cp}} \right)^3 d\omega.$$

Анализ результатов показал, что в турбинном режиме при увеличении угла β от 0 до 28° поле скоростей в вертикальном сечении входного сечения водоприемной камеры становится более равномерным. Максимальная относительная скорость потока V/V_{cp} при этом уменьшается от 1,41 до 1,21, а коэффициент Кориолиса уменьшается с 1,51 до 1,15.

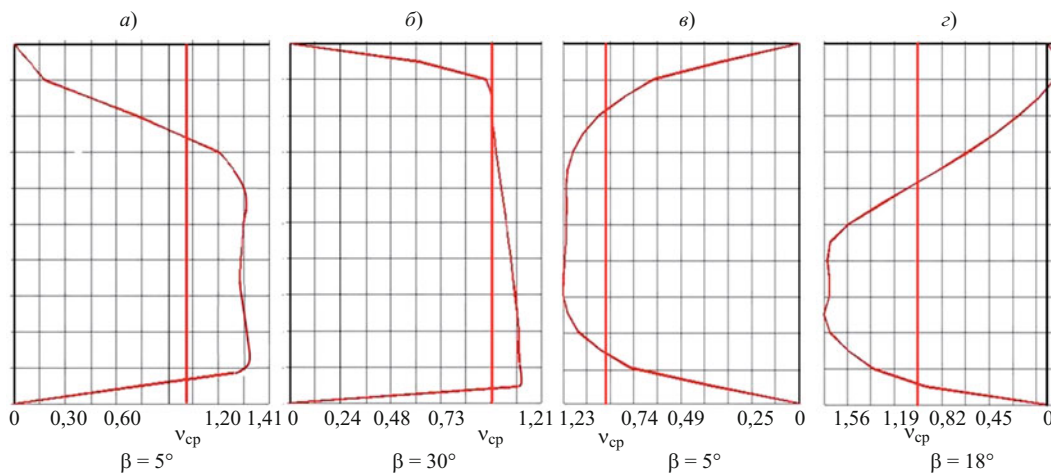


Рис. 3. Распределение относительных скоростей потока по высоте входного сечения водоприемной камеры: *a* и *б* — турбинный режим; *в* и *г* — насосный режим

При дальнейшем увеличении угла β коэффициент α практически не изменяется.

Вместе с тем в зоне входного участка напорного водовода непосредственно за водоприемной (конфузорной) камерой водоприемного устройства изменение показателя неравномерности распределения скоростей в вертикальной плоскости обратное. Сначала при увеличении угла β от 0 до 35° коэффициент Кориолиса практически не изменяется и соответствует значению 1,15. При дальнейшем увеличении угла β неравномерность потока начинает увеличиваться. На этом участке существенно возрастает сужение потока. Причем чем больше угол β , тем значительнее сужение потока, вплоть до появления циркуляционных областей. Для $\beta = 90^\circ$ коэффициент Кориолиса достигает максимальной величины 1,52.

Ухудшения гидравлических условий течения на рассмотренных участках водоприемного устройства, очевидно, обусловлены проявлением сил инерции, действующих на водные массы. В связи с образованием циркуляционных зон и увеличением неравномерности распределения скоростей потока по сечению происходит рост потерь напора в водоприемном устройстве.

Анализ результатов исследований насосного режима показал следующее. При малых величинах угла β (менее 9°) водный поток, постепенно расширяясь в водовыпускной камере (диффузорном элементе), занимает все сечение камеры по всей ее длине без образования отрывных зон и циркуляционных областей (рис. 2). При увеличении угла β свыше 12° в водовыпускной камере начинает наблюдаться отрыв водного потока от потолочной стенки водовыпускной камеры. Причем чем больше угол β , тем значительнее отрывная зона и циркуляционная область в водовыпускной камере.

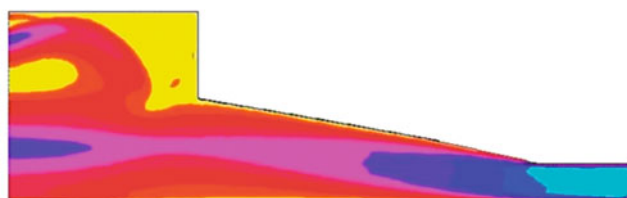


Рис. 4. Результаты расчета параметров потока при $L = 9H$ и переменном β по длине диффузорного участка

На наш взгляд, для насосного режима полезно оперировать понятиями “гидравлически целесообразная диффузорность” и “энергетически целесообразная диффузорность” водовыпускной камеры. Первое соответствует наибольшему ее раскрытию (углу β), при котором обеспечивается безотрывное течение водного потока в пределах водовыпускной камеры (диффузорного элемента), а второе — раскрытию (углу β), при котором обеспечиваются наименьшие потери напора в выходном сечении камеры (потери кинетической энергии).

Как показали исследования водоприемного устройства ГАЭС, выполненные авторами, гидравлически целесообразная диффузорность β_r зависит в основном от длины водовыпускной камеры. Так, для длины камеры $L \leq 3H$ угол β_r равен 12°. При ее увеличении до 5H и 7H угол β_r соответствует 11 и 10°. При дальнейшем увеличении L угол $\beta_r = 9^\circ$. Полученные данные позволяют рекомендовать применение водовыпускных камер с переменным углом наклона потолочного элемента, а именно уменьшающимся по направлению потока:

$$\begin{aligned} \beta &= 12^\circ \text{ при } L \leq 3H; \\ \beta &= 11^\circ \text{ при } L = (3 - 5)H; \\ \beta &= 10^\circ \text{ при } L = (5 - 7)H; \\ \beta &= 9^\circ \text{ при } L \geq 7H. \end{aligned}$$

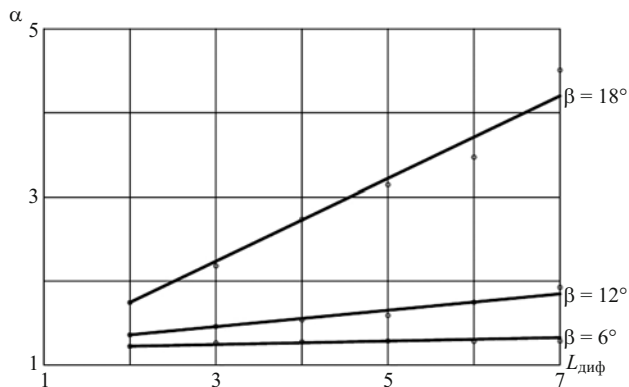


Рис. 5. Графики зависимостей $\beta = f(\beta, L)$ для насосного режима

Вид течения потока и скорости в камере при переменном (уменьшающемся) по длине угле β представлен на рис. 4.

Таким образом, если для водовыпускной камеры заранее определена высота выходного сечения (например, задана по условиям заглубления под уровень воды или размерами затвора), то ее общую длину можно сократить за счет применения переменного угла наклона потолочного элемента: на начальном участке до $L = 3H$ с $\beta = 12^\circ$, а далее — уменьшающимся β к выходному сечению.

На величину энергетически целесообразной диффузорности β_3 водовыпускной камеры влияет не только длина водовыпускной камеры, но также величины и характер распределения скоростей потока в выходном сечении. Это следует из известного выражения для подсчета выходных потерь напора [6]

$$H_{\text{пот}} = \alpha \frac{V_{\text{ср}}^2}{2g},$$

где α — коэффициент Кориолиса; $V_{\text{ср}}$ — средняя скорость потока в выходном сечении камеры.

Следует отметить, что коэффициент α , характеризующий неравномерность поля скоростей в выходном сечении, может достигать существенных значений, поэтому его влияние на величину потерь напора велико. В данной статье значительное внимание уделено именно выходным потерям напора водоприемного устройства ГАЭС при его работе в насосном режиме, в том числе анализу влияния коэффициента β . Расчеты, выполненные авторами, показали, что коэффициент Кориолиса увеличивается с ростом угла β . Обработка расчетов позволила представить зависимости $\beta = f(\beta, L)$ в виде графиков (рис. 5). Из них следует, что при β , равном 6, 12 и 18° , коэффициент Кориолиса α возрастает и соответствует 1,26; 1,46 и 2,18.

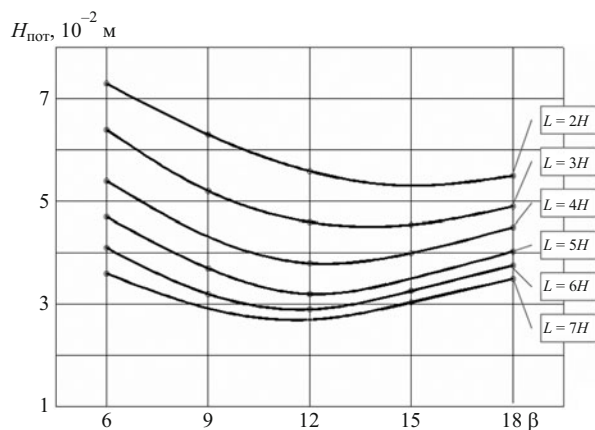


Рис. 6. Графики зависимостей $H_{\text{пот}} = f(L, \beta)$

Выполнены также расчеты потерь напора в выходном сечении камеры, результаты в виде графиков зависимостей $H_{\text{пот}} = a(L, \beta)$ приведены на рис. 6. Данные свидетельствуют о том, что при увеличении длины водовыпускной камеры L величины энергетически целесообразной диффузорности β_3 , как и величины β_1 , уменьшаются. Однако их значения не одинаковы. При одних и тех же длинах камеры величины энергетически целесообразной диффузорности β_3 водовыпускной камеры на 12–15 % больше, чем гидравлически целесообразные диффузорности β_1 . Так, при $L = 3H$ угол $\beta_3 = 13,5 \dots 14^\circ$; при $L = 5H$ угол $\beta = 12 \dots 12,5^\circ$; при $L = 7H$ угол $\beta = 11,5^\circ$.

Из представленных данных следует, что обеспечить наивыгоднейшую с энергетической точки зрения раструбность водоприемной камеры (для турбинного режима $28 - 35^\circ$ и для насосного режима $14 - 11^\circ$) одновременно для обоих режимов работы ГАЭС не представляется возможным. Поэтому в реализованных проектах ГАЭС чаще всего использованы компромиссные решения: раструбность водоприемного устройства принята равной $17 - 20^\circ$. При этом, естественно, потери напора и в одном и в другом режиме работы ГАЭС будут повышенные.

В современных условиях представляется целесообразным обратиться к новым разработкам, основанным на запатентованных решениях. Известны эффективные конструктивные решения для водоприемных устройств ГАЭС, позволяющие улучшить их энергетические характеристики, а следовательно, и общую эффективность работы электростанции. В частности, ряд авторов предлагают шарнирное крепление потолочного элемента водоприемной камеры с возможностью его поворота специальным механизмом в вертикальной плоскости. За счет такого решения можно каждый раз при изменении режима работы (с турбинного на насосный или наоборот) устанавливать оптимальный угол его наклона и обеспечивать наименьшие поте-



Рис. 7. Примеры результатов расчета водоприемника с одним разделителем потока: *a* — турбинный режим, $L = 4H$, $\beta = 36^\circ$; *б* — насосный режим, $L = 2H$, $\beta = 18^\circ$

ри напора. Эти технические устройства сложны в эксплуатации, а из-за наличия подвижных элементов трудно обеспечить их надежную работу.

Авторами настоящей статьи также предложены варианты совершенствования конструкций водоприемного устройства ГАЭС [7 – 9]. Особенностью наших предложений является секционное исполнение водоприемной камеры. В ней отдельные секции формируются при помощи разделителей потока, размещаемых в потоке внутри водоприемной камеры.

Преимущества секционного водоприемного устройства в следующем. Общую раструбность водоприемной камеры можно принять, исходя из наилучших условий турбинного режима, например, соответствующей 28° . Одновременно предусмотреть установку одного разделителя потока, при котором в камере формируются две секции. Тогда каждая секция будет иметь раструбность 14° . Если разделитель потока выполнить из металлического листа, то его малая толщина практически не повлияет на потери напора при работе ГАЭС в турбинном режиме. Вместе с тем для насосного режима каждая камера будет иметь энергетически целесообразную диффузность (14°) и, следовательно, также обеспечивать минимальные потери напора.

Исследования секционного водоприемного устройства были выполнены авторами также на математической модели [10]. Исследовались конструкции с одним и с двумя разделителями потока. Длина раструбного участка модели водоприемного устройства L изменялась от $2H$ до $7H$, а угол β изменялся от 6 до 30° . В качестве примера на рис. 7 представлены результаты исследований водоприемного устройства с одним разделителем потока.

Из полученных результатов следует, что использование разделителя (разделителей) потока для насосного режима обеспечивает безотрывный поток в каждой секции водоприемной камеры устройства, а следовательно, и в самой камере при существенно больших углах общей раструбности. Так, для устройства с одним разделителем и $L = 3H$ поток не

имел отрывных и циркуляционных областей при общем β до 18° . Для устройства с двумя разделителями поток имел безотрывный характер при общем β до 27° .

Обработка результатов исследований выявила величины гидравлически и энергетически целесообразной диффузности секций водоприемной камеры для насосного режима. В частности, для нижней секции рассмотренной конструкции водоприемного устройства величины β_1 и β_2 соответствуют аналогичным величинам камеры без разделителей. Для второй секции соответственно на один градус меньше, а для третьей — соответственно на два градуса меньше, чем первой нижней секции. Естественно, что при использовании водоприемника с наклонным полом углы будут несколько отличаться от приведенных выше.

Таким образом, секционное исполнение водоприемника ГАЭС без подвижных элементов, на наш взгляд, способно обеспечить наилучшие энергетические параметры его работы как для турбинного, так и для насосного режима.

Следует отметить, что установка разделителей потока в водоприемной камере обеспечит сокращение ее длины без уменьшения общей площади выходного сечения (следовательно, без увеличения выходных потерь энергии потока) за счет увеличения угла наклона потолочного элемента камеры (увеличения раструбности). Так, для водоприемной камеры длиной $1L$ при высоте входного сечения $h_2 = 2H$ и $\beta = 11^\circ$ коэффициент Кориолиса составляет 1,47. При размещении одного разделителя потока в камере, сохраняя высоту входного сечения h_2 , длину камеры можно сократить до $0,88L$ при том же коэффициенте. Если разместить два разделителя потока, то соответственно длину камеры можно уменьшить до $0,71L$. Такое уменьшение даст значительную экономию затрат на возведение водоприемного устройства ГАЭС без снижения эффективности использования энергии водного потока.

Выводы

1. Потери напора в водоприемном устройстве ГАЭС в значительной степени определяются гидравлическими условиями течения потока и зависят от его основных параметров — длины и раструбности водоприемной камеры.

2. В турбинном режиме увеличение потерь вызывает сжатие транзитного потока и образование циркуляционных областей во входном сечении водоприемной камеры (при малых углах конфузорности) либо во входном сечении напорного водовода за водоприемной камерой (при больших углах конфузорности). В насосном режиме увеличение потерь напора вызывает отрыв транзитного потока от стенок водоприемной камеры и образование по ее длине циркуляционных областей (при значительных углах диффузорности), а также увеличение неравномерности поля скоростей в выходном сечении.

3. Для характеристики основных параметров водоприемного устройства при работе ГАЭС в насосном режиме рекомендуется оперировать понятиями “гидравлически целесообразная диффузорность” и “энергетически целесообразная диффузорность”. Исследования показали, что вторая из них на 12 – 15 % больше, чем первая.

4. Обеспечить наилучшие с энергетической точки зрения условия работы водоприемного устройства как для турбинного, так и для насосного режима работы ГАЭС можно при использовании секционной конструкции водоприемной камеры за счет размещения в ней плоских разделителей потока. При этом раструбность каждой секции рекомендуется принимать соответствующей энергетически целесообразной величине диффузорности.

5. Применение секционной водоприемной камеры позволит обеспечить существенное сокращение ее длины и значительно снизить затраты на возведение водоприемного устройства.

Список литературы

1. Бальзанников М. И., Елистратов В. В. Возобновляемые источники энергии. Аспекты комплексного использования. — Самара: Изд-во ООО “Офорт”, 2008.
2. Березинский С. А. Исследование водоприемника Загорской и Кайшядорской ГАЭС / С. А. Березинский, И. И. Иванов, М. Ф. Саркисова // Гидротехническое строительство. 1985. № 4. С. 27 – 29.
3. Васильев Ю. С. Результаты энергогидравлических исследований верхового водоприемника-водовыпуска ГАЭС / Ю. С. Васильев, Д. А. Ивашиных // Известия ВНИИГ. 1986. Т. 196. С. 5 – 8.
4. Селиверстов В. А. Результаты исследований водоприемного устройства гидроэнергетической установки с использованием программы “Ansys” // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 4 – 2 (89). С. 149 – 153.
5. Бальзанников М. И., Селиверстов В. А. Влияние конструкции водоприемного устройства ГАЭС на потери энергии при его работе в насосном режиме // Вестник МГСУ. 2010. № 1. С. 175 – 181.
6. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — М.: Машиностроение, 1975.
7. А. с. 1705484. Водовыпуск / Бальзанников М. И., Орлова А. А., Учайев А. В., Елистратов В. В. // Бюллетень изобретений. 1992. № 2.
8. Патент РФ № 2068051. Водоприемник-водовыпуск / Бальзанников М. И., Козлов О. А. // Бюллетень изобретений. 1996. № 29.
9. Пат. РФ 2389847. Водоприемник-водовыпуск / Бальзанников М. И., Селиверстов В. А. // Бюллетень изобретений. 2010. № 14.
10. Бальзанников М. И., Селиверстов В. А. Исследования влияния разделителей потока для применения в водоприемных устройствах гидроэнергетических установок // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2009. № 3 (25). С. 199 – 205.

Зависимость водноэнергетических показателей Эвенкийской ГЭС от стока р. Нижняя Тунгуска и режима использования водных ресурсов водохранилища

Александровский А. Ю., доктор техн. наук,
Борщ П. С., инженер (Московский энергетический институт)

Рассмотрено два режима работы Эвенкийской ГЭС — независимый и компенсированный — совместно с ГЭС Волжско-Камского каскада. Приведены результаты водноэнергетических расчетов и даны рекомендации по дальнейшим исследованиям.

Ключевые слова: гидрологическая информация, Эвенкийская ГЭС, режим работы, гарантированная мощность, среднесуточная выработка электроэнергии.

При обосновании параметров и показателей работы Эвенкийской ГЭС и последующей экспертизы проекта возникли вопросы, связанные с относительно небольшой длительностью гидрологических наблюдений за стоком р. Нижняя Тунгуска. Гидрологический ряд наблюдений на момент рассмотрения проектных материалов составил 41 год — с 1940 по 1980 г. При принятом в проекте полезном объеме водохранилища 101 км³ и среднесуточной годового стока 112,7 км³ для повышения надежности определения энергоотдачи ГЭС требуется уточнение используемых гидрологических данных путем увеличения длительности используемых гидрологических рядов наблюдений за стоком.

Проект основывается на натурных измерениях расходов воды на р. Нижняя Тунгуска в створе “Фактория Большой Порог”. Створ расположен в 130 км от устья реки, площадь водосбора 445 тыс. км². Наблюдения за расходами воды здесь ведутся с

1939 г. по настоящее время. Створ Эвенкийской ГЭС расположен в 120 км от устья реки, площадь водосбора 447 тыс. км². Климатические, топографические и географические характеристики района створа Эвенкийской ГЭС аналогичны району створа-аналога, что позволяет использовать их для удлинения гидрологического ряда.

Гидрологические характеристики р. Нижняя Тунгуска в створе Эвенкийской ГЭС, пересчитанные по связи с данными по створу “Фактория Большой Порог” с использованием уравнения регрессии, приведены в табл. 1.

Задача данной работы заключалась в уточнении проектных показателей работы Эвенкийской ГЭС при увеличении длительности исходной гидрологической информации и при использовании ее энергоотдачи в европейской части России при независимом и компенсированном режимах работы.

Из табл. 1 следует, что средний многолетний объем годового стока р. Нижняя Тунгуска в створе Эвенкийской ГЭС при увеличении расчетного периода с 41 до 66 лет стал больше на 3,2 %.

Независимый режим регулирования стока водохранилищами подразумевает назначение водо- и энергоотдачи Эвенкийской ГЭС в зависимости от запаса воды в Эвенкийском водохранилище на момент принятия решения.

Компенсированный электрический режим регулирования стока осуществляется в том случае, если регулирующие возможности водохранилищ отдельных ГЭС различны. При этом ГЭС-компенсатор дополняет энергоотдачу компенсируемых ГЭС таким образом, чтобы суммарная зимняя гарантированная мощность или годовая выработка всех ГЭС, работающих совместно, была максимальной [1, 2].

Компенсированный режим энергоотдачи Эвенкийской ГЭС определялся в зависимости от энергоотдачи ГЭС Волжско-Камского каскада (ВКК). В маловодных условиях р. Волги и, следовательно, при пониженной энергоотдаче ГЭС ВКК Эвенкийская ГЭС будет работать с повышенной энергоотдачей, компенсируя указанное понижение за счет до-

Т а б л и ц а 1

Характеристика естественного стока р. Нижняя Тунгуска

Параметр	Створ “Фактория большой Порог”	Створ Эвенкийской ГЭС
41-летний период (с 1940 по 1980 г.)		
$Q_{\text{ср}}, \text{ м}^3/\text{с}$	3430	3570
$W_{\text{ср}}, \text{ км}^3$	108,25	112,67
C_v	0,13	0,13
C_s	0,26	0,26
66-летний период (с 1940 по 2005 г.)		
$Q_{\text{ср}}, \text{ м}^3/\text{с}$	3560	3685
$W_{\text{ср}}, \text{ км}^3$	112,35	116,30
C_v	0,14	0,14
C_s	0,28	0,28

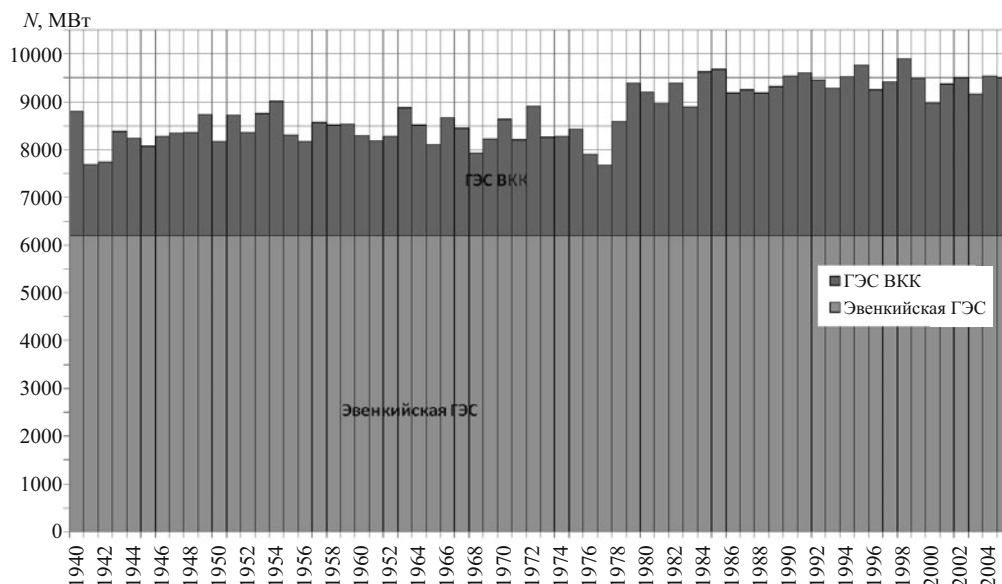


Рис. 1. Изменение суммарной среднезимней мощности Эвенкийской ГЭС и ГЭС ВКК по годам рассмотренного периода для независимого режима. Период наблюдения за стоком с 1940 по 2005 г.

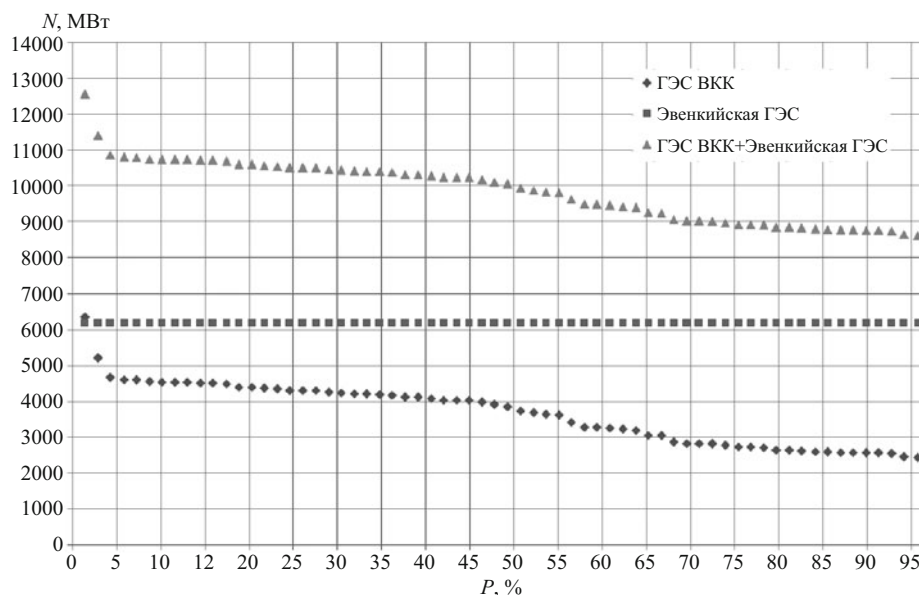


Рис. 2. Кривая обеспеченности суммарной среднезимней мощности ГЭС ВКК и Эвенкийской ГЭС для независимого режима. Период наблюдения за стоком с 1940 по 2005 г.

Т а б л и ц а 2

Показатели работы ГЭС ВКК и Эвенкийской ГЭС при независимом и компенсированном режимах работы

Режим водохранилищ	Расчетный период, годы	Волжско-Камский каскад		Эвенкийская ГЭС		Суммарные показатели ГЭС ВКК и Эвенкийской ГЭС	
		$N_{\text{гар}}^*$, МВт	\mathcal{E}_0 , ТВт · ч	$N_{\text{гар}}^*$, МВт	\mathcal{E}_0 , ТВт · ч	$\Sigma N_{\text{гар}}^*$, МВт	$\Sigma \mathcal{E}_0$, ТВт · ч
Независимый	1940 – 1980	2567/2448	34,5	6200/6200	41,5	8767/8648	76,0
	1940 – 2005	2571/2496	37,3	6200/6200	42,4	8771/8696	79,7
Компенсированный	1940 – 1980	2567/2448	34,5	6200/6200	41,1	9498/9498	75,6
	1940 – 2005	2571/2496	37,3	6200/6200	41,7	9498/9498	79,0

* В числителе $N_{\text{гар}}$ с $P = 90\%$, в знаменателе — с $P = 95\%$.

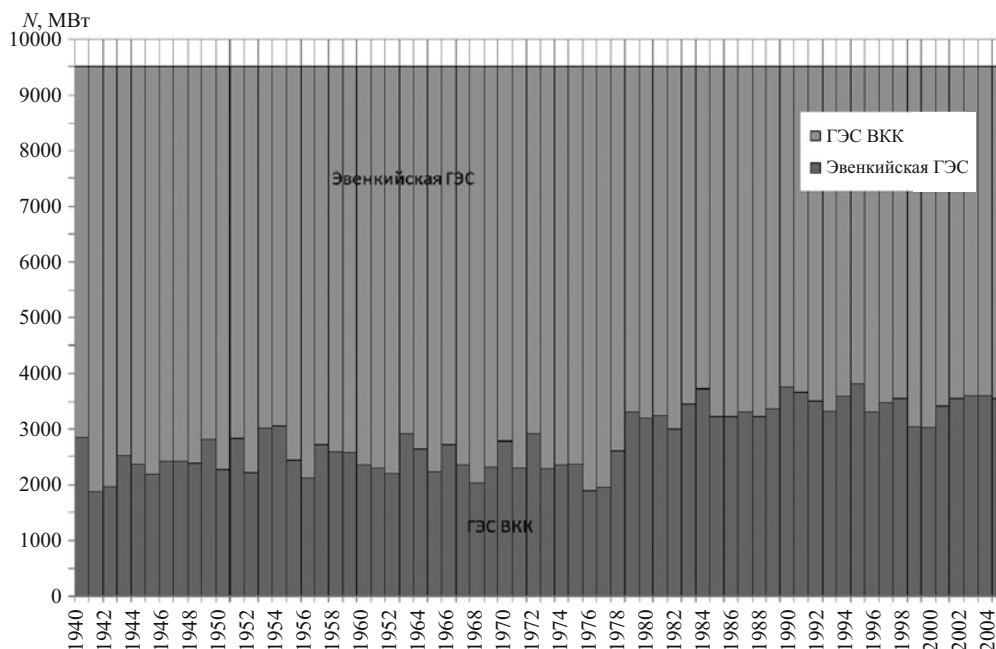


Рис. 3. Изменение суммарной среднезимней мощности Эвенкийской ГЭС и ГЭС ВКК по годам рассмотренного периода для компенсированного режима

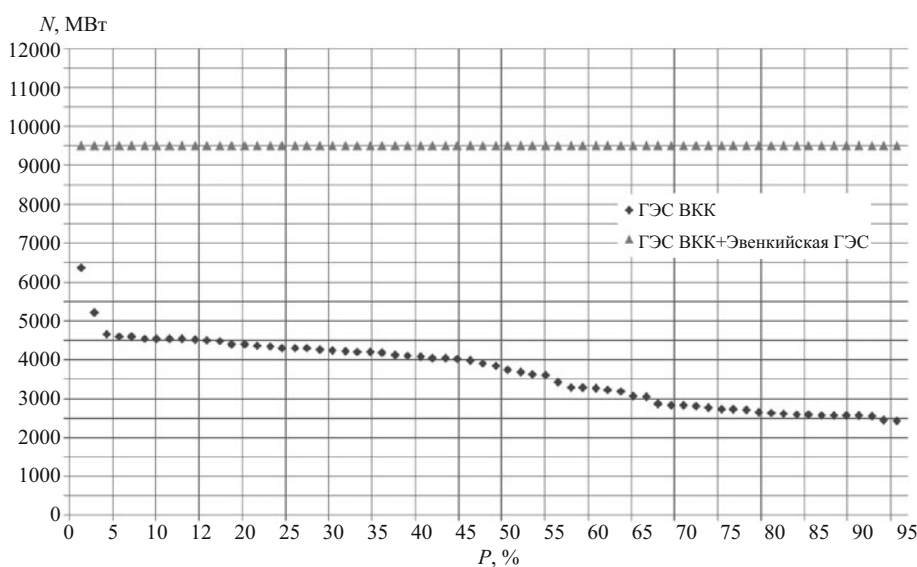


Рис. 4. Кривая обеспеченности суммарной среднезимней мощности ГЭС ВКК и Эвенкийской ГЭС для компенсированного режима. Период наблюдения за стоком с 1940 по 2005 г.

полнительной сработки Эвенкийского водохранилища. В многоводных условиях р. Волги и, следовательно, при повышенной энергоотдаче ГЭС ВКК Эвенкийская ГЭС будет работать с пониженной энергоотдачей, накапливая воду в Эвенкийском водохранилище. Такой режим работы Эвенкийской ГЭС позволит повысить суммарную мощность ГЭС ВКК и Эвенкийской ГЭС по сравнению с независимым режимом использования водных ресурсов. Целесообразность организации такого режима для ГЭС подтверждается и особенностями их гидрологических характеристик. Так, коэффициент

взаимной корреляции рядов годового стока: суммарного естественного стока рек Волги в створе нижней ступени ВКК — Волжской ГЭС и Нижней Тунгуски в створе Эвенкийской ГЭС за период с 1940 по 2005 г. — равен – 0,19.

В состав ГЭС ВКК включены 12 крупных ГЭС: Ивановская, Угличская, Рыбинская, Нижегородская, Чебоксарская (с НПУ 63,0 м), Жигулевская, Саратовская и Волжская на р. Волге; Камская, Воткинская, Нижнекамская (с НПУ 63,3 м) на р. Каме и Павловская на р. Уфе с суммарной $N_{уст} = 11,5$ ГВт, расчетной суммарной и средней много-

летней выработкой свыше 37 ТВт · ч. Эти ГЭС имеют разные формы собственности, но использование водных ресурсов водохранилищ подчинено общим задачам и управление их режимом осуществляется из единого центра — СО ЦДУ ЕЭС России.

В работе рассматривалось два варианта длительности гидрологического ряда: с 1940 по 1980 г. и с 1940 по 2005 г. Среднегодовой объем естественного годового стока р. Волги за 41- и 66-летний периоды равен 248,3 км³ и 266,5 км³ соответственно, т.е. увеличивается на 7 %.

Для оценки уточнения энергетических характеристик Эвенкийской ГЭС при использовании длинного ряда выполнены водохозяйственные и водно-энергетические расчеты при двух вариантах управления режимами работы водохранилищ ГЭС ВКК и Эвенкийской ГЭС (независимый и компенсированный) при соблюдении следующих условий:

режим работы ГЭС ВКК определялся собственными условиями эксплуатации и зависел от притока и запасов воды в водохранилищах ГЭС ВКК на момент назначения отдачи, требований участников водохозяйственного комплекса и рекомендаций правил использования водных ресурсов, действующих в настоящее время. Дополнительно учитывались изменения, связанные с уточнением характеристик связи уровней и расходов в нижних бьефах Воткинского, Нижегородского и Волгоградского гидроузлов. Таким образом, показатели работы ГЭС ВКК в данных расчетах определялись только длительностью принятого гидрологического ряда;

расчетный интервал времени принят равным декаде для всего годового периода;

параметры Эвенкийского водохранилища в рассмотренных вариантах режима (независимый и компенсированный) и продолжительности гидрологического ряда (41 год и 66 лет) приняты одинаковыми: НПУ = 200 м и УМО = 188 м.

Энергетический эффект оценивался по значениям зимней гарантированной мощности ГЭС ВКК, Эвенкийской ГЭС и суммарной гарантированной мощности, среднегодовой выработки электроэнергии ГЭС каждой и суммарной. При определении энергетических характеристик работы Эвенкийской ГЭС учитывались потери мощности и энергии на передачу в европейскую часть страны. При этом, как уже отмечалось выше, энергетические показатели ГЭС ВКК зависели только от принимаемой длительности расчетного гидрологического ряда. Следует иметь в виду, что эти показатели отличаются от проектных, так как они были определены для ГЭС Волжско-Камского каскада по более длительному периоду. Зимний период принят с ноября по март.

Сравнение результатов расчетов проводилось по короткому ряду при независимом режиме и по

длинному ряду при независимом и компенсированном режимах использования водных ресурсов, приведенных в табл. 2. На рис. 1 и 3 приведены хронологические графики изменения средnezимней мощности ГЭС ВКК и Эвенкийской ГЭС при независимом и компенсированном режимах регулирования стока, на рис. 2 и 4 — соответствующие кривые обеспеченности зимней мощности ГЭС.

Из представленных в табл. 2 результатов расчетов следует, что энергетический эффект от увеличения длительности используемого гидрологического ряда как по гарантированной мощности, так и по среднегодовой выработке электроэнергии зависит от принятого независимого или компенсированного режима использования стока водохранилищами ГЭС ВКК и Эвенкийской ГЭС. При удлинении гидрологического ряда и независимом режиме использования водных ресурсов водохранилищем Эвенкийской ГЭС энергетический эффект будет получен только по среднегодовой выработке и составит 900 млн. кВт · ч, или ≈ 2,1 %.

При сравнении короткого ряда при независимом режиме использования водных ресурсов с длинным рядом и компенсированном режиме энергетический эффект составит по суммарной гарантированной мощности 733 МВт (8 %), по среднегодовой выработке электроэнергии 200 млн. кВт · ч (4,7 %). Снижение эффекта по выработке электроэнергии с 900 млн. кВт · ч до 600 млн. кВт · ч объясняется снижением средневзвешенного напора на Эвенкийской ГЭС при ведении компенсированного регулирования стока Эвенкийским водохранилищем.

При окончательном обосновании схемы управления водными ресурсами Эвенкийского водохранилища следует иметь в виду следующие обстоятельства:

повышение на 9 % суммарной гарантированной мощности всех ГЭС (Эвенкийской и ВКК) за счет перехода на компенсированный режим использования водных ресурсов водохранилищ;

практически полное выравнивание зимней выработки электроэнергии ГЭС в европейской части России (ОЭС Центра, ОЭС Урала, ОЭС Средней Волги);

повышение энергоотдачи Эвенкийской ГЭС, что сделает ее более привлекательной для возможных инвесторов;

наличие некоторого резерва по выработке Эвенкийской ГЭС, поскольку необходимо разработать диспетчерские графики работы ее водохранилища, что приведет к уменьшению холостых сбросов на ГЭС и тем самым повысит годовую энергоотдачу.

Отклик на статью А. А. Клюкача “К вопросу об оценке вибрационного состояния гидроагрегатов ГЭС” [1]

В рассматриваемой статье [1] раскрывается комплекс вопросов, связанных с вибрационным состоянием гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС (прежде всего второго гидроагрегата). В частности, А. А. Клюкач критикует автора статьи [2] за то, что он оценивает вибрационное состояние гидроагрегата по одному датчику и считает вибрационную картину одинаковой для всех агрегатов, а роль завода-изготовителя недостаточной в описании эксплуатационной характеристики турбины. Однако представляется, что в статье [2] не шла речь о всех агрегатах. Известно, что при различных нагрузках вибрационные характеристики агрегатов будут различны. В этом смысле, даже если наложить вибрационную характеристику второго агрегата на все остальные, особых противоречий в статье [2] нет. Конечно, более точный учет вибрационных характеристик гидроагрегатов, описанный в статье А. А. Клюкача [1], даст более полную картину вибрационного состояния всех гидроагрегатов ГЭС.

Вместе с тем следует заметить, что в связи с отсутствием аппаратуры с диапазоном частот 0,7 –

200 Гц, о чем пишет А. А. Клюкач, по-видимому, получилась менее точная картина поведения гидроагрегатов при работе на высоких напорах.

Что же касается эксплуатационных характеристик турбин, вновь выпускаемых для Саяно-Шушенской ГЭС, то в них должны быть точнее указаны зоны нормальной работы. При этом желательно, чтобы вновь поставляемые на ГЭС турбины были проверены на заводе – изготовителе с учетом условий, приведших к аварии 17 августа 2009 г.

Список литературы

1. Клюкач А. А. К вопросу об оценке вибрационного состояния гидроагрегатов ГЭС // Гидротехническое строительство. 2011. № 5.
2. Белаи И. Г. Причины аварии гидроагрегата № 2 на Саяно-Шушенской ГЭС: актуальность повышения надежности гидроэнергетического оборудования // Гидротехническое строительство. 2010. № 3.

*Кудинов А., кандидат техн. наук
(Институт водных проблем РАН)*

Выводы

1. При определении современных энергетических показателей Эвенкийской ГЭС рекомендуется учитывать всю имеющуюся гидрологическую информацию по р. Нижняя Тунгуска на момент принятия решения.

2. Суммарная гарантированная мощность ГЭС ВКК и Эвенкийской ГЭС (90 – 95 % обеспеченности) увеличивается при работе в компенсированном режиме на 8 % по сравнению с вариантом независимого режима. Увеличение среднесуточного стока р. Нижняя Тунгуска при увеличении длительности расчетного периода, приводит к увеличению среднесуточной выработки электроэнергии при

независимом режиме на 4,6 %, при компенсированном — на 4,3 %.

3. Компенсированный режим использования водных ресурсов Эвенкийского водохранилища приведет к повышению энергетической привлекательности инвестиций в строительство Эвенкийской ГЭС. При этом потребуются детальная проработка данного режима на всех этапах проектирования.

Список литературы

1. Александровский А. Ю., Силаев Б. И. Некоторые пути повышения инвестиционной привлекательности Туруханской ГЭС при использовании ее энергоотдачи в европейской части России // Гидротехническое строительство. 2006. № 7.
2. Гидрологические основы гидроэнергетики / Под ред. А. Ш. Резниковского — М.: Энергоатомиздат, 1989.

О внедрении “Типового динамического паспорта гидротехнических сооружений электростанций”

Василевский А. Г., Козлов А. Б., кандидаты техн. наук
(ОАО ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева)

Приводится накопленный опыт внедрения на гидроэлектростанциях России этого документа, показавшего неудовлетворительное состояние сейсмометрической аппаратуры, недостаточную изученность вибрационного состояния сооружений при пропуске паводков, необходимость создания банка данных динамических характеристик основных сооружений ГЭС и др.

Ключевые слова: типовой динамический паспорт ГЭС, сейсмометрическая аппаратура, пропуск паводков, выброс-мещения элементов, виброиспытания.

Во второй половине прошлого века в связи со строительством гидроэлектростанций с гидроагрегатами большой единичной мощности, увеличением напоров на сооружения и освоением сейсмически активных районов не учитывать динамические нагрузки стало опасно. Одним из первых, кто обратил на это свое внимание и по чьей инициативе были объединены и направлены на изучение динамической работы гидротехнических сооружений усилия многих научных организаций, был начальник и главный инженер Гидропроекта профессор Г. А. Руссо. В дальнейшем эта работа была продолжена профессором И. С. Шейниным, под руководством которого во ВНИИГе при участии ОРГРЭС был разработан и внедрен на гидроэлектростанциях России “Типовой динамический паспорт гидротехнических сооружений электростанций” (ТДП) [1].

Гидротехнические сооружения электрических станций подвергаются разнообразным динамическим нагрузкам, основными из которых являются центробежные силы от неуравновешенности вращающихся роторов гидроагрегатов, гидравлические возмущающие силы в проточных трактах турбин, особенно при пропуске через водосбросные сооружения больших паводков; нагрузки, вызванные прохождением железнодорожного и другого транспорта, взрывами в близко расположенных карьерах, сейсмическими воздействиями и другими причинами. В связи с этим целью создания ТДП была оценка вибрационного состояния гидротехнических сооружений электростанций путем сбора и анализа всех возможных динамических воздействий (включая сейсмические), результатов расчетов, научных исследований и др. с регулярным последующим анализом новых материалов.

ТДП состоит из четырех разделов:

источники динамических воздействий на гидротехнические сооружения и параметры воздействий (динамических нагрузок);

гидротехнические сооружения и их динамические характеристики;

динамические нагрузки на гидротехнические сооружения и параметры нагрузок (допустимые и фактические), контроль динамических нагрузок;

сведения об экстремальных динамических воздействиях, их характеристики, последствия воздействий.

В “Правилах технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации” [2] появилось указание о необходимости проведения испытаний по определению динамических характеристик гидротехнических сооружений, находящихся в сейсмоопасных районах, и о составлении динамических паспортов.

Одновременно ОАО РАО “ЕЭС России” в своем информационном письме от 28 декабря 1994 г. рекомендовало ведение динамических паспортов и для гидросооружений, расположенных в других районах, но подверженных существенным эксплуатационным динамическим нагрузкам. В соответствии с этим был составлен ТДП для гидротехнических сооружений Братской ГЭС, находящейся в районе с сейсмичностью 6 баллов.

Значительно позже при разработке стандартов организации ОАО РАО “ЕЭС России” указания для сейсмоопасных районов вошли в пункт 5.4.1.15 СТО [3]: “На гидротехнических сооружениях первого класса, расположенных в районах с сейсмичностью 7 баллов и выше, и на сооружениях второго класса — в районах с сейсмичностью 8 баллов и выше, должны проводиться следующие виды специальных наблюдений и испытаний:

инженерно-сейсмометрические наблюдения за работой сооружений и береговых примыканий (сейсмометрический мониторинг);

тестовые испытания по определению динамических характеристик этих сооружений (динамическое тестирование) с составлением динамических паспортов.

Для проведения инженерно-сейсмометрических наблюдений гидротехнические сооружения должны быть оборудованы автоматизированными приборами и комплексами, позволяющими регистрировать кинематические характеристики в ряде точек сооружений и береговых примыканий во время землетрясений при сильных движениях земной поверхности, а также оперативно обрабатывать полученную информацию.

Тестовые испытания по определению динамических характеристик сооружений (динамическое тестирование) с уточнением динамических паспортов должны проводиться с периодичностью не реже одного раза в 5 лет.

После каждого сейсмического толчка интенсивностью 5 баллов и выше должны оперативно регистрироваться показания всех видов КИА, установленных в сооружении, с осмотром сооружения и анализом его прочности и устойчивости. Результаты анализа должны заноситься в динамические паспорта”.

После введения в России новой карты сейсмического районирования ОСР-97 СНиП II-7-81* [4] сейсмичность районов, где построены особо ответственные сооружения, в том числе гидросооружения 1-го и 2-го классов, повысилась. Например, ряд гидроузлов в бассейне р. Волги оказался в соответствии с картой ОСР-97-С в районе с сейсмичностью 7 баллов и для гидросооружений 1-го класса потребовалось составление ТДП.

Перестройка экономики нашей страны существенно замедлила внедрение динамических паспортов в практику эксплуатации гидроэнергетических объектов. В настоящее время около десятка электростанций имеют такой документ. Первой в этом направлении можно отметить Иркутскую ГЭС, которая трижды оформляла и переоформляла ТДП. За время существования “Типового динамического паспорта гидротехнических сооружений электростанций” накопилось много вопросов, как организационных, так и научных.

К сожалению, при внесении вышеупомянутого указания в нормативные документы в названии ТДП было утеряно первое слово “типовой”. Это позволяет исполнителям перекраивать документ по своему усмотрению, в том числе полностью удалять некоторые формы. Конечно, за прошедшие 16 лет с появления ТДП возникла необходимость внесения изменений в его текст, включая инструкцию по заполнению, но все это следует делать без искажения содержания.

Работы по составлению ТДП выявили слабые места в оснащении сейсмометрических сетей гидроэлектростанций, находящихся в сейсмически активных районах. Так, например, на Чиркейской ГЭС, находящейся в районе 9 балльных землетрясений, сейсмометрическая аппаратура морально и физически устарела. В здании ГЭС сейсмоприемников вообще нет. На многих гидроузлах, находящихся в зоне 7 – 9-балльных землетрясений, сейсмическая аппаратура вообще не установлена. Нет сейсмоприемников в здании Саяно-Шушенской ГЭС и зданиях многих других ГЭС России. Для Майнской, Миатлинской и некоторых других ГЭС, находящихся в сейсмоопасных районах, ТДП до сих пор не составлены.

В связи с вышесказанным предлагается на первом этапе рассмотреть вопрос об установке минимального количества сейсмометрической аппаратуры на плотинах и в зданиях ГЭС. Например, по одной трехмерной точке на нижних и верхних отметках каждого сооружения, на которые распространяются требования Правил [2] и СТО [3]. На следующих этапах решать более сложные задачи по регистрации и анализу результатов вынужденных колебаний гидротехнических сооружений, вызываемых сейсмическими и другими воздействиями.

Вопрос о необходимости установки сейсмометрической аппаратуры и составлении ТДП для гидротехнических сооружений 3-го и 4-го классов, находящихся в районах соответственно с сейсмичностью 9 и 10 баллов, до настоящего времени не рассматривался. Однако последствия разрушительных землетрясений на таких сооружениях могут быть не менее катастрофическими, чем беды, принесенные обильными дождями в Краснодарском крае в октябре 2010 г. В связи с этим на первых порах предлагается составить перечень таких ГЭС и отдельно рассматривать указанный вопрос для конкретных электростанций.

Вибрационные обследования зданий ГЭС показывают значительное увеличение вибросмещений строительных конструкций при пропуске паводковых расходов. Так, например, в 2009 г. на сооружениях Бурейской ГЭС при пропуске суммарного расхода через гидроузел 3048 м³/с был зафиксирован рост общего уровня вибросмещений по сравнению с режимом работы при закрытых затворах водосбросов до 5 раз, а на нижнем поясе ферм конструкции МАРХИ — более 10 раз. Увеличение вибраций элементов гидросооружений до 5 раз наблюдалось ранее и на других гидроузлах при пропуске небольших паводков.

Известны случаи [5, 6] увеличения вынужденных колебаний ферм МАРХИ перекрытия машинного зала Саяно-Шушенской ГЭС более 20 раз при

пропуске сбросного расхода $4500 \text{ м}^3/\text{с}$. Поскольку в приведенных примерах, как и при сейсмических воздействиях, спектр нагрузок лежит ниже 10 Гц, то можно ожидать во время землетрясений, особенно в паводковый период, существенного роста вынужденных колебаний конструкций зданий ГЭС. Все зависит от массы сбрасываемой воды, максимальной магнитуды землетрясения, а также от соотношения частот эксплуатационных и сейсмических воздействий и собственных частот гидросооружений и их элементов.

В связи с вышесказанным особый интерес представляет влияние на вибрационное состояние сооружений Саяно-Шушенского гидроузла работы уникального берегового водосброса с пропускной способностью $4000 \text{ м}^3/\text{с}$. Для оценки гидродинамического воздействия при пропуске первого паводка требуется провести натурные исследования нового водосброса с фиксацией вибрационного состояния его элементов (желательно при максимальных сбросных расходах) и измерением вибраций плотины и здания ГЭС (предварительно записав параметры вибрации при закрытых затворах берегового водосброса). Полученные величины вибросмещений заносятся в ТДП, как это делается для всех материалов, включая данные о вибрации гидроагрегатов, строительных конструкций и пр. ГЭС, на которые распространяются требования о составлении ТДП.

Опыт динамических исследований гидротехнических сооружений и составления ТДП показывает, что на многих электростанциях такие работы никогда не проводились. Особый интерес для обеспечения безаварийной работы, как уже говорилось, представляет вибрационное состояние строительных конструкций ГЭС в паводковый период. В связи с этим следует обратить внимание на величины вибросмещений основных конструктивных элементов ГЭС при сбросе паводков, продолжительность которых может длиться несколько месяцев и совпадать по времени с очередным землетрясением. Для обобщения и анализа полученных материалов динамических исследований предполагается, в первую очередь для гидроузлов, находящихся в сейсмоопасных районах, создать во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева банк данных динамических характеристик гидросооружений электростанций путем сбора в них электронных версий “Типовых динамических паспортов гидротехнических сооружений электростанций”, на которые распространяются вышеуказанные требования Правил [2] и СТО [3], а также результатов динамических исследований гидротехнических сооружений других электростанций.

Самым сложным и трудоемким этапом выполнения работ до составления ТДП являются подго-

товка и проведение испытаний гидротехнических сооружений с помощью вибровозбудительного оборудования. Известны испытания арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС с возбуждением ее колебаний вибромашиной дебалансного типа ВЗ-М. Московским государственным строительным университетом (МГСУ) экспериментально были получены величины собственных частот и формы колебаний бетонной плотины и построены графики амплитудно-частотных характеристик динамических податливостей в различных точках плотины. Эти результаты имеют большое значение для уточнения величин динамических характеристик гидросооружений и оценки точности применяемых методов их расчета [4, 5].

Сейсмические воздействия в отличие от эксплуатационных динамических нагрузок имеют довольно широкий спектр частот. В таких случаях при незнании точной частоты динамических (сейсмических) нагрузок избежать резонансных явлений невозможно и необходимо рассчитывать сооружения на возможность их появления. При этом большое значение имеют параметры затухания, величина которых также весьма неопределенна. Так, например, во время испытаний, проводимых МГСУ, логарифмический декремент колебаний имел разброс до 2 раз.

Сложность возбуждения колебаний гидротехнических сооружений усугубляется необходимостью изготовления и применения низкочастотного оборудования (от 0,5 Гц и выше), создающего большие динамические нагрузки и, соответственно вызывающего вибросмещение исследуемых конструкций в диапазоне 10 – 100 мкм [7]. Безусловно, ценность полученных материалов виброиспытаний велика и их следует продолжать. Однако стоимость таких испытаний на порядок выше всех остальных работ необходимых для составления динамических паспортов. В связи с этим предлагается работы, связанные с виброиспытаниями, выполнять только для особо ответственных сооружений. При появлении необходимости [4, 7] проведения на гидроэлектростанциях большого объема таких работ может потребоваться рассмотрение вопроса о создании специализированного подразделения, занимающегося динамическими тестовыми испытаниями гидротехнических сооружений. В тематику работ указанного подразделения помимо натуральных исследований сооружений могла бы войти разработка методики испытаний, включая разработку и изготовление сертифицированных вибромашин, удовлетворяющих по своим техническим характеристикам требования отечественного гидростроительства. Очевидно, подобное подразделение может быть организовано в ОАО “РусГидро”, являю-

щемся крупнейшим владельцем гидроэнергетических объектов России.

Выводы

Опыт внедрения “Типового динамического паспорта гидротехнических сооружений электростанций” показал:

неудовлетворительное состояние сейсмометрической аппаратуры на гидротехнических сооружениях ГЭС, находящихся в сейсмоопасных районах; недостаточную изученность вибрационного состояния гидротехнических сооружений при пропуске паводков через гидроузлы;

необходимость создания банка данных динамических характеристик основных сооружений ГЭС;

необходимость внесения изменений в “Типовой динамический паспорт гидротехнических сооружений электростанций”.

Список литературы

1. Байчиков Л. Н., Калицева И. С., Серков В. С., Шейнин И. С. Типовой динамический паспорт гидротехнических сооруже-

ний электростанций // Гидротехническое строительство. 1994. № 6.

2. СО 153-34.20.501-2003. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации / Минэнерго России. 2003.
3. СТО 17330282.27.140.003-2008 с изменениями, внесенными приказом № 447 / 1п-66 от 06.07.2010 г. Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования / ОАО РАО “ЕЭС России”. 2008.
4. СНиП II-7-81*. Нормы проектирования. Строительство в сейсмических районах / Госстрой СССР. — М.: Стройиздат, 1982.
5. Брызгалов В. И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций. — Красноярск: Сибирский издательский дом “Суриков”, 1999.
6. Брызгалов В. И. Опыт эксплуатации пространственно-стержневой конструкции МАРХИ машинного зала Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. 1998. № 9.
7. СТО 70238424.27.140.032-2009. Гидроэлектростанции в зонах с высокой сейсмической активностью. Гидродинамический мониторинг гидротехнических сооружений. Нормы и требования / НП “ИНВЭЛ”. 2009.

О динамической безопасности гидротехнических сооружений (комментарии к статье А. Г. Василевского и А. Б. Козлова “О внедрении “Типового динамического паспорта гидротехнических сооружений электростанций”)

Бронштейн В. И., доктор техн. наук, Бугаевский А. Г., кандидат физ.-мат. наук
(Центр службы геодинамических наблюдений в энергетической отрасли)

Типовой динамический паспорт (ТДП) был разработан во ВНИИГе им. Б. Е. Веденеева, в 1994 г. утвержден приказом по РАО “ЕЭС России” и представлен широкой гидротехнической общественности [1].

Однако, несмотря на ряд появившихся в последующие годы нормативных актов и документов, направленных на внедрение ТДП в производство, широкого распространения за истекшие полтора десятка лет динамический паспорт так и не получил. Причиной этого, по мнению авторов статьи, явилась перестройка экономики страны. По нашему мнению, наряду с указанной причиной, внедрение ТДП в практику эксплуатации гидроэнергетических объектов тормозится несовершенством самого документа — его громоздкостью, перегруженностью ненужными показателями, устарением ряда положений, наконец, отсутствием обоснования практической пользы от его внедрения. Следует отметить, что в рассматриваемой статье тоже отсутствует какое-либо обоснование необходимости использования динамических паспортов.

Несмотря на признаваемую и самими авторами необходимость внесения изменений в ТДП, основной посыл статьи, начиная с ее названия, звучит как призыв безотлагательной реанимации кампании по оснащению типовыми динамическими паспортами всех гидроэлектростанций, находящихся в сейсмоопасных районах, а также тех ГЭС, ГТС которых подвержены существенным динамическим нагрузкам. В рамках этой кампании авторами предлагается осуществить конкретные организационно-технические мероприятия, в том числе создать во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева банк данных динамических характеристик гидросооружений и сформировать при ОАО “РусГидро” специализированное подразделение по проведению натуральных вибрационных испытаний.

К сожалению, авторы игнорируют тот факт, что в структуре ОАО “РусГидро” уже существует специализированное подразделение, призванное решать весь круг задач, связанных с обеспечением динамической безопасности энергетических объектов, а именно ЦСГНЭО (Центр службы геодинами-

ческих наблюдений в энергетической отрасли). ЦСГНЭО создан в 1995 г. в форме филиала ОАО “Институт Гидропроект” и в качестве головной организации электроэнергетической отрасли по вопросам оценки сейсмической опасности проектируемых, строящихся и эксплуатируемых энергетических объектов, определения расчетных сейсмических воздействий, комплексного обследования и мониторинга сейсмостойкости, математического моделирования поведения сложных техноприродных систем при сейсмических воздействиях, сейсмоусиления сооружений и конструкций.

За истекшие 15 лет специалистами ЦСГНЭО:

уточнены сейсмические и геодинамические условия и определены расчетные сейсмические воздействия более чем для 20 энергетических объектов;

проведены комплексные инструментальные обследования современного состояния, в том числе динамического, большого числа энергетических объектов — Чиркейской, Миатлинской, Зейской и других ГЭС, объектов Кубаньэнерго, Охинской, Сахалинской и других ТЭС, Тихорецкой, Центральной, Армавирской высоковольтных подстанций;

выполнены поверочные расчеты сейсмостойкости сооружений крупных гидравлических и тепловых электростанций, включая уникальные плотины Саяно-Шушенской, Чиркейской, Зейской ГЭС;

разработаны и частично введены в действие отраслевые нормативные документы по повышению сейсмической и геодинамической безопасности энергообъектов;

разработаны новые и усовершенствованы существующие методы и способы решения задач, связанных с уточнением сейсмических условий, обследованием энергообъектов, расчетами их сейсмостойкости и др.;

разработаны, изготовлены и внедрены в практику работ новые образцы сейсмологической аппаратуры и оборудования.

В свете изложенного представляется целесообразным весь комплекс задач по обеспечению динамической, в том числе сейсмической, безопасности энергетических сооружений решать через существующее специализированное подразделение — ЦСГНЭО, а не создавать для этого новые структуры. При этом очередность решения задач должна быть иной, нежели предлагаемая авторами статьи. В первую очередь следует произвести оснащение, доукомплектацию и обновление необходимой сейсмологической, сейсмометрической и виброметрической аппаратурой эксплуатируемых гидроэлектростанций. Поставка оборудования должна осуществляться не случайным путем, а на основе разработанного для каждого конкретного объекта проекта динамического (геодинамического) мониторинга. При этом следует иметь в виду, что для це-

лого ряда гидроузлов такие проекты (для особо крупных и ответственных объектов они получили название “геодинамических полигонов”) уже разработаны в ЦСГНЭО (Саяно-Шушенская, Чиркейская, Зарамагская ГЭС, каскад Нижнечерекских ГЭС, Загорская ГАЭС-1 и др.).

Типовой динамический паспорт до начала кампании по его внедрению на гидроэлектростанциях, подверженных значимым динамическим нагрузкам, должен быть, как уже говорилось выше, существенно переработан и актуализирован. При этом должна быть предусмотрена опция передачи данных в головную организацию в режиме on line. Соответствующие разработки, включая структуру централизованной базы данных и коммуникационных связей, в свое время были проведены в ЦСГНЭО и могут быть использованы как основа для составления модернизированного проекта службы динамических наблюдений гидроэнергетической отрасли. При этом такая служба должна, по нашему мнению, войти в качестве одного из элементов в состав общей системы обеспечения безопасности гидроэнергетических объектов.

Поднимаемый в статье вопрос о необходимости установки сейсмометрической аппаратуры на ГТС 3 – 4-го классов (например, на малых ГЭС), расположенных в районах 9 – 10-балльной сейсмичности, представляется весьма неоднозначным. Сама по себе установка сейсмометрической аппаратуры на таких сооружениях не уберезет их от последствий сильных землетрясений и не позволит предсказать эти события. Полезная информация для своевременного выполнения предупредительных антисейсмических (антивибрационных) мероприятий на ГТС может быть почерпнута из данных сейсмометрического мониторинга ГТС в том случае, когда определен некоторый “стандарт” колебательных, вибрационных характеристик состояния сооружения и критериальные значения этих характеристик, т.е. фактически тот набор данных, который необходим для заполнения ТДП.

Следует также иметь в виду, что чувствительность и эффективность систем сейсмометрического мониторинга в настоящее время не изучены в должной степени и прецедентов успешных прогнозов развития опасных процессов на ГТС по сейсмометрическим данным пока нет.

Отсюда следует, во-первых, что для успешного применения сейсмометрического мониторинга необходимо иметь, по крайней мере, результаты теоретических расчетов динамических характеристик и предельного состояния сооружения и, желательно, результаты сейсмометрических измерений “нулевого” состояния сооружения сразу после его возведения. Такие материалы имеются с большей или меньшей полнотой только для крупных гидроузлов.

В случае малых ГТС с инженерной и экономической точки зрения более целесообразным может оказаться регулярное тщательное обследование сооружения.

Во-вторых, необходимо развивать научно-исследовательские и технико-методические работы по созданию примерных, образцовых проектов систем сейсмометрических наблюдений на ГТС основных типов, вариантов их аппаратурного оснащения, способов обработки и анализа получаемых данных.

И, в-третьих, проекты систем сейсмометрических наблюдений для ГТС должны разрабатываться с учетом требований ТДП к типу и составу динамических характеристик сооружения, получение и анализ которых должна обеспечивать такая система.

Предлагаемый в статье к широкому использованию (вплоть до создания специального подразделения) метод тестовых динамических испытаний гидросооружений с использованием мощных вибрационных машин дисбалансного типа, применявшийся в последней четверти прошлого века для определения частот и форм собственных колебаний, в настоящее время является полным анахронизмом. Для этого метода характерны чрезвычайные трудоемкость, длительность испытаний, дороговизна и невысокая разрешающая способность, позволяющая определить лишь одну-две низших форм собственных колебаний большого сооружения. Сегодня для решения этой же задачи — натурального определения частот, форм, декрементов собственных колебаний различных сооружений — успешно применяется метод собственных малоамплитудных колебаний [3, 4]. Этот метод основан на регистрации и последующем высокоточном спектральном анализе реакции плотины на микросейсмический шум, вызванный различными природными и техногенными факторами, такими, как микросейсмы, ветровые нагрузки, вибрации сооружения при работе гидроагрегатов, водосбросных устройств, водоводов, насосов и других механизмов. Помимо своей относительной дешевизны и оперативности, этот метод имеет высокую разрешающую способность, позволяя определить десятки частот и форм собственных колебаний.

Благодаря успехам математического моделирования определение частот и форм собственных ко-

лебаний сегодня с высокой точностью может выполняться и расчетным путем. В настоящее время для многих российских высоких плотин и других гидротехнических сооружений уже проведены поверочные расчеты сейсмостойкости с определением частот и форм собственных колебаний, результаты которых могут быть использованы в качестве первичного вклада в базу данных динамических характеристик ГТС.

Необходимо также учитывать возможность накопления повреждений в сооружении при проведении тестовых испытаний ГТС с приложением значительных динамических нагрузок. Таким образом, при тестовых динамических испытаниях сейсмометрическая аппаратура во всех случаях будет регистрировать колебания малой амплитуды. Хорошо известно, что точность и повторяемость сейсмометрических измерений при повторных циклах наблюдений зависят в первую очередь от качества и точного воспроизведения условий установки сейсмоприёмников, применения в повторных циклах одних и тех же или высокоидентичных приборов. Следовательно, применение безвредного для сооружения метода собственных малоамплитудных колебаний, реализованного на стационарной системе сейсмометрических наблюдений ГТС, помимо существенно меньших трудовых и финансовых затрат, может обеспечить получение данных с более высокой точностью и меньшим разбросом, т.е. создать реальные условия для мониторинга динамического состояния сооружения.

Список литературы

1. Типовой динамический паспорт гидротехнических сооружений электростанций и инструкция по его заполнению / РАО "ЕЭС России". 1994.
2. Байчиков Л. Н., Калицева И. С., Серков В. С., Шейнин И. С. Типовой динамический паспорт гидротехнических сооружений электростанций // Гидротехническое строительство. 1994. № 6.
3. Селезнев В. С., Кузьменко А. П., Еманов А. Ф. и др. Возможности и результаты обследования зданий и сооружений. Методы изучения, строение и мониторинг литосферы // Материалы к международным конференциям. — Новосибирск: СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1998.
4. Савич А. И., Бронштейн В. И. и др. Результаты динамических испытаний плотины Чиркейской ГЭС методом собственных малоамплитудных колебаний // Юбил. сб. научных трудов Гидропроекта. 2000. Вып. 159.

Настоящее и будущее гидроэнергетики Швейцарии

Пехтин В. А., Беллендир Е. Н., Радченко В. Г.

С 29 мая по 3 июня 2011 г. в Швейцарии в г. Люцерн прошло 79-е ежегодное собрание Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ) [1]. Программа собрания включала заседания 26 технических комитетов; симпозиум “Плотины и водохранилища в условиях изменяющегося мира”; заседание Исполкома СИГБ; выставку, на которой были представлены более 50 известных в мире фирм, работающих в области исследований, проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений. В программу также входил однодневный технический тур по строящимся, эксплуатирующимся и реконструируемым плотинам ГЭС и ГАЭС — Нант дэ Дранс, Эмоссон, Спиталам, Зееуферег, Гёшенеральп, Лючендро и Солис [2]. До начала собрания и после его окончания были организованы 4- и 6-дневные технические туры с осмотром гидроэнергетических сооружений в Западной, Южной и Восточной Швейцарии, в Германии, Австрии, Северной Италии и Французских Альпах. Участники этих поездок смогли посетить и ознакомиться с наиболее известными гидрозлами указанных стран — Гранд Диксанс, Мовуазен, Налпс, Санта Мария, Луццоне, Контра, Изола, Марморера (Швейцария), Зильвенштейн (Австрия), Альпе Джера (Италия), Розеленд (Франция) и др.

На заседаниях технических комитетов обсуждали готовящиеся к печати нормативно-методические документы СИГБ. Так, например, технический комитет “Насыпные плотины” готовит к печати такие бюллетени, как “Внутренняя эрозия грунтовых плотин и их оснований”, “Асфальтобетонные диафрагмы плотин”, “Геотекстиль в гидротехническом строительстве”.

В сборнике, посвященном симпозиуму, опубликовано 109 докладов по четырем темам: “Поведение плотин в течение длительной эксплуатации”, “Плотины и изменение климата”, “Плотины и природные катастрофы”, “Плотины и окружающая среда”.

На заседании Исполкома СИГБ были заслушаны отчеты о проведенной в технических комитетах работе по составлению нормативно-методических документов (бюллетеней) СИГБ; утвержден бюджет организации; в состав СИГБ приняты Армения, Грузия и Узбекистан; уточнены детали проведения в 2012 г. 80-го ежегодного собрания и 24-го Международного конгресса СИГБ в Японии (г. Киото) и в 2013 г. 81-го ежегодного собрания в

США (г. Сиэтл). На организацию в 2014 г. 82-го ежегодного собрания были приняты заявки от Шри Ланки, Индии и Индонезии.

Для специалистов-гидроэнергетиков Швейцария представляет особый интерес, потому что это одна из наиболее экономически развитых стран Европы и мира с хорошо функционирующей гидроэнергетикой, активное развитие которой началось еще в 19 веке. Швейцария входила в состав шести стран (США, Франция, Италия, Румыния, Великобритания и Швейцария), которые 3 октября 1928 г. на Мировой энергетической конференции в Лондоне законодательно оформили создание Международной комиссии по большим плотинам.

В 1965 г. в Швейцарии уже проходило 33-ье ежегодное собрание, а в 1985 г. — 15-й Конгресс СИГБ. В настоящее время в стране построено и успешно эксплуатируется большое число самых современных гидросооружений. По количеству плотин на единицу площади Швейцария занимает первое место в мире — 5 плотин/1000 км² [3].

Швейцария — страна Центральной Европы с населением 7,62 млн. человек, занимает площадь 41 205 км², значительная часть расположена на территории Альп. В стране густая сеть многоводных рек, в том числе Рейн с притоком Ааре, верховья рек Роны, Инна, Тичино, берущих начало в Альпах. Реки обладают большим падением. Их значительные гидроэнергетические ресурсы используются для производства электроэнергии [4].

Водные ресурсы Швейцарии характеризуются следующими показателями. Общий ежегодный средний объем осадков — 60,1 км³, из которых 53,5 км³ дождевые. Общий объем всех водохранилищ — 4,082 км³. Потребление воды на одного человека в год равно примерно 340 л/сут. Общее потребление воды, например, в 2009 г. составило 3,866 км³, что по секторам экономики составило: бытовые нужды — 12,5 %, сельское хозяйство — 10,5 %, промышленность — 29,5 %, охлаждение агрегатов АЭС — 42,5 %.

Технический гидроэнергетический потенциал страны равен 41 000 ГВт · ч/год. К настоящему времени он использован на 86,6 %. Общая установленная мощность всех энергоустановок в стране в 2010 г. составляла 17 885 МВт, из которых мощность ГЭС равна 13 680 МВт, ГАЭС — 1383 МВт, АЭС — 3263 МВт, ТЭС — 863 МВт и ВЭС —

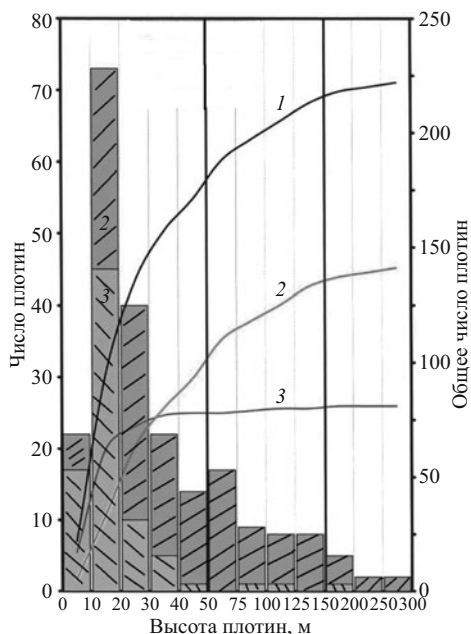


Рис. 1. Распределение плотин Швейцарии по высоте:

1 — общее число плотин; 2 — бетонные плотины; 3 — грунтовые плотины

18 МВт. Мощность солнечных установок — 71 МВт.

Основная цель строительства плотин в Швейцарии — производство электроэнергии. Общая ее выработка в 2010 г. составила 66 252 ГВт · ч, в том числе на ГЭС — более 37 450 ГВт · ч (56,5 % от общей выработки), на ГАЭС — 2494 ГВт · ч, на АЭС — 25 205 ГВт · ч, на ТЭС и других установках — 3597 ГВт · ч. 85 % всех энергетических установок находится в акционерной собственности. Частные владельцы имеют 7,7 %, а иностранные собственники 7,2 % [5].

Строительство плотин в Швейцарии для промышленных целей насчитывает уже около 200 лет. Одна из первых плотин — Венигервэйхер высотой 14,5 м построена в 1822 г. и до сих пор находится в эксплуатации. Плотины строили по мере необходимости одновременно с ходом промышленного развития в стране. Вначале плотины и ГЭС строили вблизи городов и промышленных центров, так как еще не умели передавать электроэнергию на большие расстояния. Типичным примером такого строительства является бетонная гравитационная плотина Мэйграугэ высотой 24 м, возведенная в 1872 г. на р. Сарине недалеко от исторического центра г. Фрибург. Плотина и ГЭС сыграли значительную роль в развитии этого города. В настоящее время гидроэлектростанция по-прежнему находится в эксплуатации [6].

С начала 20-го столетия с развитием высоковольтных сетей гидроузлы стали возводить в Альпах, притом с более высокими плотинами. Так, в

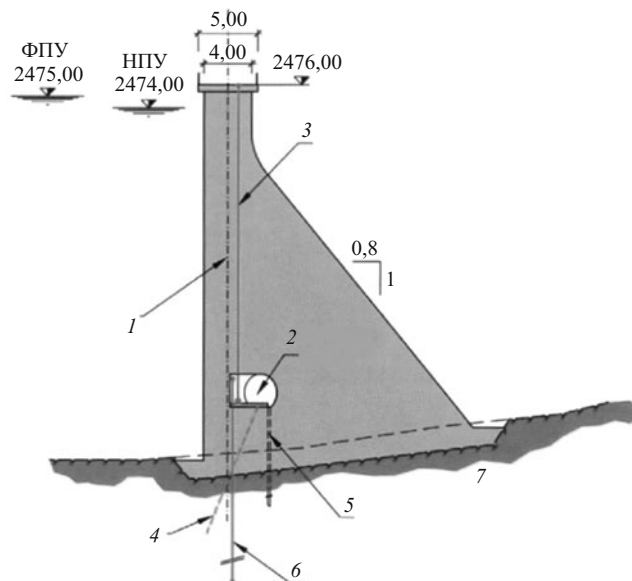


Рис. 2. Типовое поперечное сечение бетонной гравитационной плотины на оз. Муттзее:

1 — ось плотины; 2 — галерея; 3 — прямой отвес; 4 — цементационная завеса; 5 — дренаж; 6 — обратный отвес

1924 г. построена бетонная гравитационная плотина Шрэх высотой 112 м, которая длительное время была самой высокой в мире. Но наиболее активное строительство гидроузлов началось после окончания второй мировой войны. Только за период 1947 – 1970 гг. построено 86 гидроузлов с большими плотинами, из которых 60 — выше 30 м, а 4 — выше 200 м. Это арочная плотина Мовуазен — 237 м (в 1990 г. надстроена до 250 м), гравитационная плотина Гранд Диксанс — 285 м, арочная плотина Луццоне — 208 м (в 1998 г. надстроена до 225 м) и арочная плотина Контра — 220 м.

В настоящее время в Швейцарии в эксплуатации находится более 1500 гидроэнергетических объектов, в том числе 167 гидроузлов с большими плотинами (по классификации СИГБ), из которых 37 — грунтовые насыпные, 127 — бетонные (72 гравитационные и 55 арочные) и 3 — композитные (рис. 1). 80 % плотин расположено в горных районах страны, занимающих 40 % территории. Из 25 плотин высотой более 100 м 23 бетонные (18 арочные) и две каменно-земляные — Гошенеральп (155 м) и Маттмарк (120 м). Состояние 222-гидроузлов находится под прямым контролем государства, в том числе 162 гидроузла с большими плотинами. Контроль за состоянием плотин осуществляет Швейцарское федеральное агентство по энергетике [5, 6].

Гидроресурсы Швейцарии уже использованы почти на 87 % и в стране нет серьезных планов строительства новых крупных объектов, тем не менее — в условиях потепления климата, таяния ледников и увеличивающегося дефицита воды для

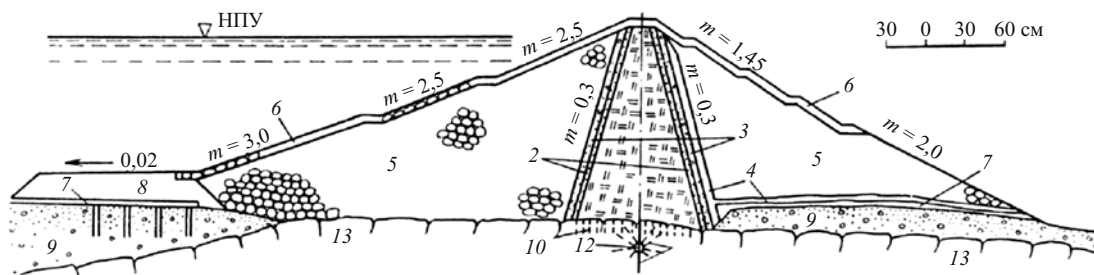


Рис. 3. Поперечное сечение каменно-земляной плотины Гёшенеральп:

1 — ядро из глиобетона; 2 — первый слой фильтра (аллювий 0 – 100 мм); 3 — второй слой фильтра (аллювий, щебень 0 – 200 мм); 4 — третий слой фильтра из дробленого камня размером менее 200 мм; 5 — упорные призмы (каменная наброска из материала осейпей); 6 — крепление камнем; 7 — дренаж; 8 — каменная наброска; 9 — морена; 10 — площадная цементация; 11 — противофильтрационная завеса; 12 — цементационная штольня; 13 — граниты

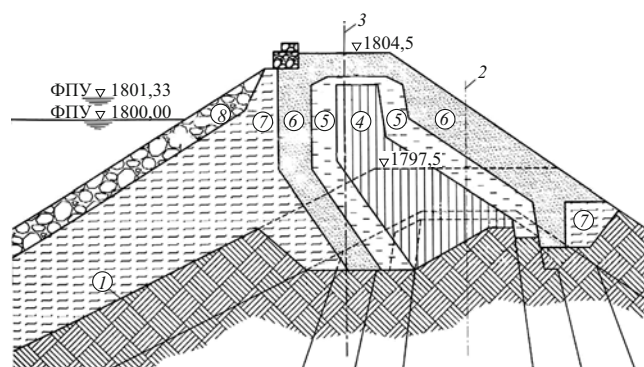


Рис. 4. Проект реконструкции гребня плотины Гёшенеральп:

1 — контуры старой плотины; 2 — старая ось плотины; 3 — новая ось плотины; 4 — ядро; 5 — 1-й слой фильтра; 6 — каменная наброска, $d_{\max} = 30$ см; 7 — каменная наброска, $d_{\max} = 60$ см; 8 — крепление крупным камнем

производства электроэнергии — Федеральное правительство еще в 2007 г. приняло план по дальнейшему развитию источников возобновляемой энергии, в котором гидроэнергетике по-прежнему отводится главная роль. По этой программе в 2008 г. введены в строй шесть малых ГЭС: Бурентобель мощностью 0,3 МВт и выработкой 1,3 ГВт · ч/год; Шанси-Поугни (после реконструкции) — 3,6 МВт и 13 ГВт · ч/год; Ла Петит Во — 3,2 МВт и 11,1 ГВт · ч/год; Муркарт (после реконструкции) — 0,1 МВт и 0,6 ГВт · ч/год; Нидергештельн — 0,6 МВт и 2,5 ГВт · ч/год и Тарц — 0,3 МВт и 1,5 ГВт · ч/год.

В 2011 г. строительные работы были сосредоточены на возведении нескольких новых объектов, но более интенсивно проводились ремонт и реконструкция уже существующих плотин и ГЭС, в том числе с целью наращивания плотин по высоте, увеличения объемов водохранилищ и повышения выработки электроэнергии.

Одним из новых объектов строительства является первая очередь ГАЭС Нант де Дранс мощностью 600 МВт в департаменте Финхот в Альпах. Работы ведутся силами концерна “Алпик” и Феде-

ральной компании железных дорог. Повышение мощности ГАЭС до 900 МВт связывают с наращиванием уже существующей плотины Вьё Эмоссон с 15 до 20 м. Проект включает подземное здание станции, оборудованное четырьмя агрегатами (насос-турбина). Станция будет работать на напоре, который создается между двумя водохранилищами — Эмоссон и Вьё Эмоссон [7, 8]. Начало эксплуатации намечается на 2015 г., а завершение работ — на 2017 г.

Другим примером нового строительства служит проект ГАЭС Линт-Лиммерн, в котором в качестве верхнего бассейна используют водохранилище Муттзее, а в качестве нижнего — водохранилище Лиммерн. ГАЭС должна увеличить мощность с 340 до 1200 МВт. Увеличенная мощность будет получена за счет повышения уровня верхнего бассейна (оз. Муттзее) на 28 м. В состав объектов строительства входят бетонная гравитационная плотина (рис. 2), возводимая вдоль южной границы оз. Муттзее (отм. 2450 м); подземное здание ГЭС и туннель длиной 500 м, подводящий воду к зданию станции. При этом объем водохранилища Муттзее увеличится с 9 до 24 млн. м³, а напор между верхним бассейном (Муттзее) и нижним (Лиммерн) составит 600 м.

Новая бетонная плотина запроектирована как обычная гравитационная, состоящая из 68 секций шириной 15 м каждая. Максимальная высота — 35 м, общий объем бетона — 250 тыс. м³. Водослив со свободным порогом занимает пять секций и рассчитан на пропуск расхода максимально 160 м³/с. Здание ГАЭС будет иметь четыре агрегата (насос-турбина) мощностью по 25 МВт.

Площадную цементацию под плотиной выполняют по всей поверхности основания на глубину 3 м. Под верховой гранью для уменьшения фильтрации и противодействия предусмотрена цементационная завеса на глубину до 20 м. Основные цементационные работы выполняют из инспекционной галереи. После завершения цементации из той же галереи для снижения противодействия должны

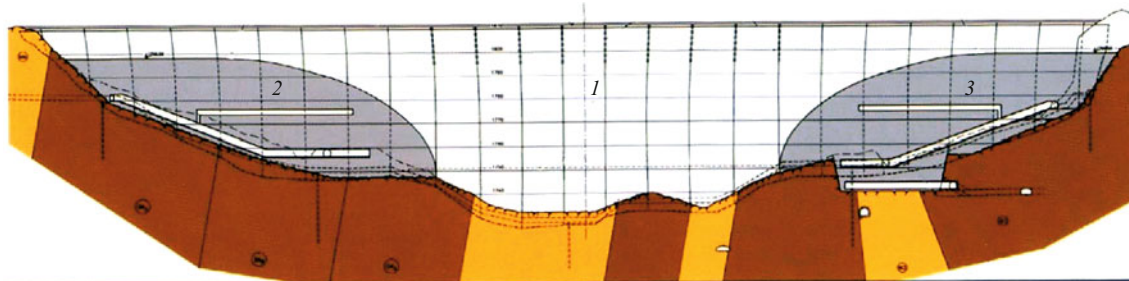


Рис. 5. Вид арочной плотины Лес Тулес со стороны нижнего бьефа:

1 — бетонная арочная плотина; 2 — правобережный контрфорсный массив; 3 — левобережный контрфорсный массив

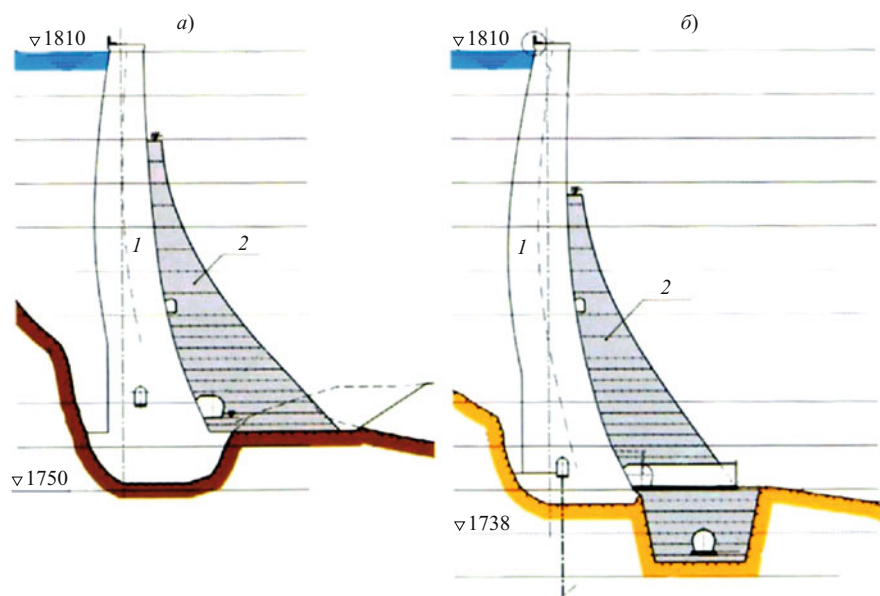


Рис. 6. Поперечное сечение арочной плотины Лес Тулес после реконструкции у правого (а) и левого (б) бортов каньона:

1 — тело плотины; 2 — контрфорсный бетонный массив

быть выполнены дренажные скважины. Для уменьшения потока фильтрации под плотиной через трещины основания предусмотрено выполнение перед плотиной водонепроницаемого покрытия, представляющего собой слой армированного торкрета толщиной 15 см.

Смещение плотины предусмотрено замерять в пяти секциях с помощью прямых и обратных отвесов, обеспеченных считывающими устройствами, расположенными на уровне инспекционной галереи. Эта система позволит замерять абсолютные перемещения на двух разных уровнях плотины. Термометры для определения температурного состояния плотины устанавливаются в каждой секции. Натурные наблюдения будут дополнены замерами противодавления в основании и фильтрации в инспекционной галерее. Осадки гребня плотины будут определять с помощью геодезии.

Строительство плотины на оз. Муттзее с учетом суровых условий высокогорья и короткого периода работы в летнее время года запланировано на 2010 – 2015 гг. Основные секции плотины должны

быть выполнены в 2012 – 2014 гг. при средних объемах укладки бетона за сезон порядка 80 тыс. м³, при максимуме около 2000 м³/сут. Завершение работ намечено на 2015 г.

Наращивание плотин по высоте с целью увеличения объемов водохранилищ и выработки электроэнергии является еще одним направлением активных строительных работ. Осуществляют наращивание как бетонных (в том числе арочных плотин), так и грунтовых плотин. Уже увеличены по высоте арочные плотины Мовуазен (с 236,5 до 250 м), Луццоне (с 208 до 225 м) и ряд других. В настоящее время начались работы по увеличению высоты каменно-земляной плотины с суглинистым ядром Гёшенеральп (рис. 3).

Плотина Гёшенеральп высотой 155 м (самая высокая каменно-земляная плотина в Европе во время строительства) возведена в 1962 г. в Центральной Швейцарии в зоне хребта Готтард на р. Гошенеррейс. Длина по гребню — 540 м, объем плотины — 9,3 млн. м³. В основании плотины — трещиноватые граниты и флювиогляциальные от-

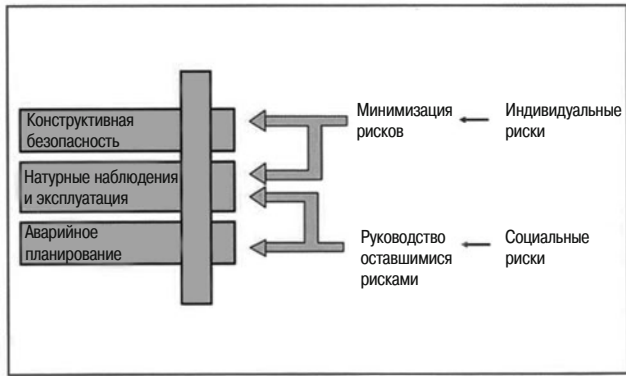


Рис. 7. Швейцарская концепция безопасности плотин

ложения мощностью до 30 – 40 м. Материал для ядра и переходных зон-фильтров получали из основания долины реки в зоне водохранилища. Сначала грунт рассеивали на фракции 0 – 30, 30 – 100, 100 – 200 мм, а затем смешивали с 11 % глин Опалинус. Такая процедура позволила создать очень однородный материал с коэффициентом фильтрации 10^{-7} см/с и получить узкое ядро объемом 800

тыс. м³, шириной по основанию 44 м и на гребне 5,5 м. Фильтры с верховой и низовой сторон сортированные. В упорные призмы уложен моренный материал, полученный из долины реки как со стороны верхнего, так и нижнего бьефа, включавший скальные отделиности размером до 1 м³. Коэффициент фильтрации упорных призм был равен $10^{-2} - 10^{-5}$ см/с [9].

Так как гранитное основание имело сбросы и было сильно трещиновато, то потребовалось создание цементационной завесы под плотиной и вдоль бортов долины. Закачиваемые растворы включали смесь цемента и глин Опалинос. Максимальная глубина завесы — 180 м, шаг скважин — 6 м. Средний расход раствора составил 250 кг/пог.м. Кроме цементационной завесы выполнено большое число одиночных скважин. Поведение плотины контролировали системой натуральных наблюдений по закладной КИА, измеряющей поровое давление грунта. Осадки и смещения замеряли с помощью геодезических приборов. У северной оконечности плотины выполнен боковой водослив со свобод-

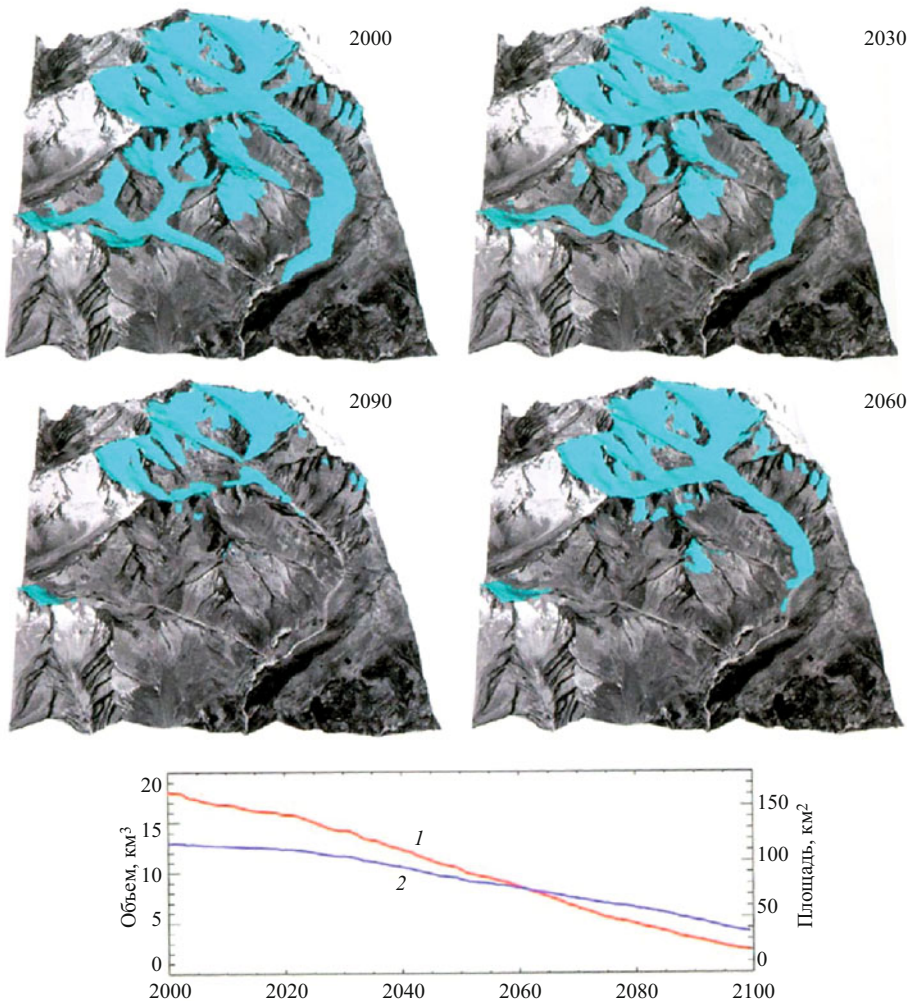


Рис. 8. Прогноз таяния ледника Алетш до 2090 г.:

1 — объем ледника; 2 — площадь ледника

ным порогом, позволяющий подавать расход $200 \text{ м}^3/\text{с}$ при напоре около 700 м в туннель, идущий на подземную ГЭС Гошенен, расположенную в 10 км .

Проект повышения гребня плотины на 8 м разработан фирмой Пёири “Pöyry Energy Ltd” в 2009 г. Реконструкции подвергаются гребень плотины и ряд сооружений: боковой водослив; уравнильный резервуар; водозаборы, которые должны быть подняты на более высокие отметки. Новый проект гребня представлен на рис. 4. В результате реконструкции ширина гребня уменьшится с 11 до 7 м . Ось гребня плотины будет смещена на $7,25 \text{ м}$ в сторону верхнего бьефа. Наклон низового откоса плотины останется прежним — $1:1,45$, а наклон верхового откоса в пределах реконструированного участка будет круче — $1:1,6$. В результате реконструкции полезный объем водохранилища будет увеличен с 75 до 87 млн. м^3 , что позволит увеличить выработку пиковой энергии [9].

Еще одним направлением активных строительных работ являются ремонтные работы, связанные с упрочнением конструкций плотин, в частности арочных. Примером может служить арочная плотина двойкой кривизны Лес Тулес высотой 86 м . Плотина построена в 1964 г. на юге Швейцарии на р. Дранс д’Энтремонт. Длина по гребню — 460 м , объем плотины — 235 тыс. м^3 . В 2003 г. после изменения нормативных требований по сейсмике Швейцарское федеральное агентство по энергетике потребовало от владельцев ГЭС проверить надежность плотин, в частности, в связи с повышением в новых нормах величины пикового ускорения (PGA) от $0,1g$ до $0,33g$. В результате проверки были обнаружены отклонения, которые потребовали проведения ремонтных работ с упрочнением конструкции арочной плотины.

Проект упрочнения представляет собой возведение в зоне береговых примыканий с низовой стороны плотины двух крупных контрфорсных массивов (рис. 5, 6). Для них был подобран специальный состав бетона, определены технология бетонирования и температурный режим. Предусмотрена специальная система охлаждения бетона при укладке (охлаждение крупного заполнителя, присадка льда, ночная укладка, последующее трубное охлаждение и т.д.) с целью недопущения повышения температуры бетона выше 35°C и превышения допустимых величин растягивающих напряжений. Проводились специальные работы по цементации шва между старым бетоном плотины и вновь уложенным бетоном контрфорсного массива, а также упрочнение основания под этим массивом. Контроль смещений в реконструированной плотине будут осуществлять с помощью обратных отвесов, уста-

навливаемых в теле арки и в контрфорсных массивах [10].

Система надзора за безопасностью плотин в Швейцарии — одна из наиболее эффективных, работающих в других странах, благодаря главенствующей роли государства в организации контроля. Система давно разработана. Законодательство по надежности и безопасности плотин непрерывно совершенствуется. Четко и надежно организована система натуральных наблюдений на сооружениях [11].

Законодательство о безопасности плотин в Швейцарии впервые появилось через четыре месяца после атаки британских ВВС на три плотины в Германии во время второй мировой войны. В этом законодательном акте по безопасности водоподпорных сооружений, подписанном 7 октября 1943 г., Правительство потребовало разработать как активные, так и пассивные меры защиты от возможной военной опасности. В конце второй мировой войны указание Правительства было реализовано в виде Закона о безопасности плотин и внесено в общее законодательство о воде, существующее с 1877 г., которое в определенных формах действует по настоящее время. Корректировку этого законодательства в части безопасности осуществляли в 1957 и 1998 гг. После уточнений, внесенных в 1998 г., в Законе было четко сформулировано, что Федеральное правительство в отношении существующих и будущих водоподпорных сооружений обеспечивает все необходимые меры, максимально оберегая водоподпорные сооружения от всех опасностей и повреждений. В Законе указывалось, какие процессуальные, технические и организационные требования должны применяться к плотинам, а также, какие плотины подпадают под законодательство. В Законе определено, что все плотины, которые могут представлять опасность, подчиняются федеральному законодательству. К ним относятся плотины с напором более 10 м или более 5 м , но с водохранилищами объемом, превышающим 50 тыс. м^3 . Плотины меньшие по высоте, но тоже представляющие опасность, также подчиняются этому законодательству.

Отдельные главы Закона посвящены требованиям к надежности конструкций плотин, проведению на них натуральных наблюдений, планам эвакуации населения. В Законе изложена концепция безопасности плотин. Указывается, что плотины необходимо проектировать и строить на таком научно-техническом уровне, чтобы их безопасность могла гарантироваться для любых прогнозируемых нагрузок и эксплуатационных случаев. Однако в Законе не объясняется, как это должно быть сделано, только указывается, что собственник должен осуществлять контроль и проводить все необходимые изменения для оценки состояния плотины, без уточне-

ния, как это нужно делать. Формулировка технических требований в самой общей форме в Законе применена специально для того, чтобы дать возможность тем, кто отвечает за события на месте, свободно и быстро действовать в конкретных условиях. Такой подход должен заставлять собственников, инженеров и службы наблюдения внимательно следить за научными и техническими достижениями в отрасли, всегда быть готовыми к любым неожиданным событиям. При этом законодатели полагали, что такая практика должна помогать успешному функционированию системы безопасности плотин в Швейцарии, оказывая большее давление и возлагая большую ответственность на каждого специалиста, работающего в области гидроэнергетики.

В Законе указано, что Швейцарскому федеральному агентству по энергетике — SFOE поручены общий контроль и наблюдение за выполнением действующего законодательства по безопасности плотин, что включает необходимость усовершенствования концепции безопасности и разработки конкретных требований к безопасности плотин, организацию подготовки технической документации и организацию системы обучения специалистов, а также выполнение научных исследований в этом направлении. Агентству поручены прямой контроль и наблюдение за безопасностью всех 222 больших плотин, имеющих в стране. Непосредственное наблюдение за безопасностью малых плотин поручено властям кантонов, но также под контролем агентства. Дамбы тоже подпадают под эти правила, если их безопасность важна для членов общества.

В 2002 г. общие положения законодательства по безопасности плотин были дополнены нормативно-методическими рекомендациями, касающимися специальных критериев безопасности, надежности конструкций плотин, безопасности плотин при сейсмических воздействиях и при экстремальных паводках, а также по организации натурных наблюдений и по эксплуатации. Указанные рекомендации были разработаны федеральными экспертами и экспертами в кантонах совместно с представителями Швейцарского комитета по плотинам.

В 2010 г. Федеральный парламент Швейцарии утвердил новый вариант законодательных актов по водоподпорным сооружениям, ввод которого в действие ожидают в 2012 г.

Концепция безопасности плотин, принятая в Швейцарии, основана на том, что плотина считается надежной, если все риски находятся под контролем. Чтобы достичь высокого уровня безопасности, плотину необходимо запроектировать и построить так, чтобы она была надежной при всех вариантах нагрузок в любых условиях эксплуатации. При

этом самый минимальный риск должен подкрепляться системой натурных наблюдений за плотинной, что позволяет на ранней стадии находить формы повреждения плотины в самых неожиданных случаях. Но так как практически невозможно избежать всех рисков, то необходимо иметь разработанную концепцию аварийного планирования, в которой натурные наблюдения на плотинах играют важную роль в обеспечении того, что любое возможное неконтролируемое опорожнение водохранилища может быть предотвращено на более ранней стадии.

Действующая концепция безопасности плотины Швейцарии (рис. 7) основана на трех составляющих: конструктивной безопасности, натурных наблюдениях и системе эксплуатации, аварийном планировании. Подчеркнем, что все составляющие концепции безопасности реализуются максимально ответственно. Так, например, направление натурных наблюдений и эксплуатации имеет четыре этапа проверки состояния плотин, осуществляемых как эксплуатирующей организацией, так и контролирующей — SFOE. Первый этап включает периодические визуальные инспекции и различного рода измерения, проводимые персоналом гидроузла, а также ежегодные испытания затворов водопропускных сооружений. На втором этапе эксперты дают первоначальную оценку результатов инспекций, осуществленных на объектах, и готовят ежегодный отчет о безопасности сооружений. На третьем этапе один раз в 5 лет составляется отчет о безопасности всех плотин высотой более 40 м или более 10 м, но с водохранилищами более 1 млн. м³. Четвертый этап включает работу самого Швейцарского федерального агентства по энергетике, специалисты которого должны удостовериться в том, что все требования к безопасности плотины полностью выполнены. Если необходимо провести собственные исследования. Оценить уже выполненные ежегодные и пятилетний отчеты о безопасности сооружения. Если необходимо, потребовать провести дополнительные исследования.

Для обеспечения активного строительства ГЭС в Швейцарии с 20-х гг. прошлого столетия стали возникать специальные фирмы. Появились проектные и строительные организации, предприятия по производству гидромеханического и гидросилового оборудования, контрольно-измерительной аппаратуры и др.

Благодаря накопленному опыту эти фирмы стали широко известны не только в Швейцарии, но и за рубежом — “Пёйри”, АФ-Консулт”, “Ломбарди”, “Стуки”, “ВАЛО”, “Андриц Хайдро” и др. В настоящее время, когда возможности нового строительства в стране существенно ограничены, указанные фирмы активно работают и в зарубежных стра-

нах, строя сооружения по самым современным технологиям, в том числе плотины из укатанного бетона, с железобетонными экранами и др.

В 2010 г. в Юго-Восточной Азии с участием швейцарских инженеров закончено возведение двух высоких гравитационных плотин из укатанного бетона [12]. Плотина Иейва (Мьянмар) имеет высоту 137 м и объем бетона 2,45 млн. м³. Мощность ГЭС — 790 МВт. Строительство плотины продолжалось 23 месяца при средней интенсивности укладки бетона 106 500 м³/мес. Для этой плотины был подобран состав бетона, включавший в качестве вяжущего 75 кг/м³ портландцемента и 145 кг/м³ природного пуццолана. Была разработана и применена усовершенствованная технология укладки укатанного бетона. Плотина Шонла (Вьетнам) имеет высоту 138 м, объем бетона — 2,8 млн. м³. Мощность ГЭС — 2400 МВт. Возведение плотины начиная с января 2008 г. заняло 32 месяца при средней интенсивности укладки укатанного бетона в месяц 87 500 м³. Состав бетона кроме инертных включал 60 кг/м³ портландцемента и 160 кг/м³ золы-уноса. Вся технологическая цепочка укладки укатанного бетона была специально разработана для этой плотины.

В марте 2010 г. закончено строительство каменнонабросной плотины гидроузла Нам Нгум 2 в Лаосе, осуществлявшееся с участием фирмы “Пёйри”. Плотина высотой 182 м и длиной по гребню 500 м имеет объем 9,7 млн. м³. После возведения плотина оборудована КИА, начаты натурные наблюдения [13]. Кроме гидроузла Нам Нгум 2 фирма участвовала в строительстве еще ряда гидроузлов в других странах: Райнфельден (Германия), Эрменек (Турция), Лайа (Чили), Лимберт II (Австрия). В Латвии специалисты фирмы принимают участие в ремонтных работах на Плявинской, Кечумской и Рижской ГЭС.

Фирма “ВАЛО”, образованная в 1917 г., — одна из наиболее известных в области асфальтобетонных работ, имеет большой опыт по созданию экранов и диафрагм для плотин ГЭС и ГАЭС. Ее специалисты осуществляют весь комплекс работ, включающий исследования свойств исходных материалов и полученных асфальтобетонных смесей; проектирование конструкций экранов и диафрагм; разработку технологии приготовления смеси, технологии их укладки и уплотнения, а также последующего контроля качества уложенного асфальтобетона. Фирма проектирует и производит практически все необходимые для работы машины и механизмы, включая специализированные установки для укладки асфальтобетона на наклонные поверхности откосов и в вертикальные диафрагмы. Только за последние годы выполнены экраны на плотинах ГЭС и ГАЭС в Австрии, Германии, Италии, Чехии,

возведена асфальтобетонная диафрагма в плотине Алгар в Испании [14].

Имея самый большой в мире опыт проектирования и строительства арочных плотин, швейцарские специалисты применяют его и за рубежом. В настоящее время с их участием осуществляются проектирование и подготовка к началу строительства в Иране самой высокой в мире арочной плотины двойной кривизны Бахтиари. Плотина высотой 315 м имеет объем 3,8 млн. м³. Мощность ГЭС — 1500 МВт [15].

Заканчивается строительство другой арочной плотины — Деринер в Турции. Высота плотины — 253 м, объем бетона — 3,4 млн. м³. Мощность ГЭС — 670 МВт. Еще одним объектом, близким к завершению, является арочная плотина Карун IV в Иране высотой 230 м.

В Грузии швейцарские инженеры приступили к исследованию состояния и к подготовке ремонтных работ на арочной плотине Ингури ГЭС высотой 272 м, находящейся в эксплуатации с 1978 г. По данным швейцарских специалистов на плотине обнаружен ряд дефектов, требующих проведения ремонтных работ. В основном замечания относятся к недостаточному количеству работающей КИА, большим расходам в дренажной системе, что чревато риском внутренней эрозии, и необходимости повышения эффективности работы цементационной завесы под плотиной.

Отмечая благоприятное впечатление от работы гидроэнергетической отрасли Швейцарии, следует остановиться и на проблемах, с которыми приходится сталкиваться энергетикам страны. Кроме основной проблемы, связанной с отсутствием перспектив нового крупного строительства, озабоченность вызывают заиление водохранилищ и потепление климата. Последнее связано с таянием ледников в Альпийском регионе, что в перспективе приведет к уменьшению объемов воды для производства электрической энергии.

Проблема заиления водохранилищ во многих странах является одной из чрезвычайно серьезных для обеспечения надежной работы ГЭС. Хотя в горных районах Швейцарии степень потерь объемов водохранилищ существенно ниже, чем в других странах, но влияние изменений климата может привести к дальнейшему увеличению заиления, что вызывает определенные опасения. В связи с этим в стране были проведены большие исследования, позволившие разработать решения существенно снижающие риски, связанные с заилением [16, 17]. В задачу специалистов входила разработка мер, реально способствующих снижению этих рисков.

Разработанные меры, направленные на режим управления отложением насосов, разделены применительно к трем участкам, расположенным вдоль

рек, начиная от их верховьев до створа плотин. К первому участку относится водосборная площадь вдоль течения рек до водохранилища. Для этой зоны рекомендованы следующие защитные меры: закрепление грунтов на берегах, создание бассейнов для осаждения мелких частиц грунта, защита береговых откосов вдоль ручьев и рек, возведения инженерных конструкций для организации пропуска воды. Второй участок включает зону водохранилища. Для управления режимом насосов в этой зоне рекомендованы землечерпание, размыв наносов и их перекачивание, применение подводных грунтовых дамб и экранов из геотекстиля. Для третьей зоны, непосредственно примыкающей к плотине, рекомендовано применять взмучивание насосов, их промывку и пропуск в нижний бьеф, наращивание по высоте как самих плотин, так и конструкций водоприемников и водовыпусков.

В результате проведенных исследований швейцарские специалисты не только изучили процессы заиления и предложили меры по их регулированию, но и выполнили ряд защитных мероприятий на некоторых водохранилищах, в частности на гидроузлах Гримзель, Ливиньо и Луццоне. Заметный положительный эффект по замедлению заиления водохранилищ прогнозировали за счет устройства подводных грунтовых дамб в наиболее глубоких частях водохранилищ на пути движения насосов, что должно способствовать отложению значительной части наносов перед дамбами. Положительным считалось и устройство экранов из геотекстиля, ус- танавливаемых для тех же целей.

В водохранилище Гримзель выполнены две подводные дамбы. Первая — высотой 15 м и длиной 150 м, вторая — высотой 10 м и длиной 210 м. Дамбы создали условия, при которых, как ожидают, заиление водохранилища перед плотиной задержится на 50 лет. Такие же положительные результаты были получены для водохранилищ гидроузлов Ливиньо и Луццоне. В этих водохранилищах кроме подводных дамб применены экраны из геотекстиля, что позволило дополнительно увеличить процент осаждения осадков.

Как отмечалось выше, значительную проблему для гидроэнергетики Швейцарии представляет происходящее в настоящее время потепление климата, что в перспективе скажется на уменьшении стока и, соответственно, на уменьшении выработки электроэнергии. С целью получения прогноза будущей гидрологической обстановки в последнее десятилетие в стране были проведены значительные исследования в ряде районов Альп занятых ледниками, в частности ледниками Алетш Корбасьере (Aletsch Corbacsiere). Изучение проходило в районе водосборного бассейна плотины Гебидем. Водохранилище этой плотины построено в 1967 г. на р.

Масса в зоне ледника Алетш. Площадь бассейна в 1999 г. составляла 198 км², из которых 119 км² (60 %) занимали ледники этой группы (большой, средний и малый). Прогноз, составленный на основе данных натурных наблюдений и математического моделирования, показал, что площадь и объем ледника к концу 21 века уменьшатся от 70 до 90 %, при том что сток от таяния льдов уменьшится на одну треть (рис. 8) [18]. Такие же данные получены и в районе другой плотины — Мовуазен.

Анализ обстановки, связанной с таянием ледников, указывает на то, что в краткосрочной перспективе ускоренное таяние может дать некоторый дополнительный объем воды, однако на долгосрочную перспективу это приведет к существенному уменьшению стока и в итоге — к снижению общей выработки электроэнергии.

Некоторые специалисты в стране считают, что на освободившихся от ледников территориях можно будет в будущем построить еще ряд высокогорных водохранилищ и повысить уже имеющиеся мощности ГЭС. Такой проект существует, например, для гидроузла Мовуазен, где мощность может быть увеличена на 550 МВт, а экономический эффект получен за счет увеличения напора и выработки дополнительной пиковой энергии [19]. Но в любом случае в условиях прогрессирующего таяния ледников объем воды в водохранилищах будет уменьшаться, что в конечном счете является определяющим. В связи с этим госпожа Дорис Леутхард, федеральный советник, глава Департамента по окружающей среде, транспорту, энергетике и коммуникациям, отметила, что по прогнозу в Швейцарии к 2035 г. уменьшение выработки электроэнергии составит 10 % [20].

Выводы

Гидроэнергетическая отрасль Швейцарии в целом работает успешно, обеспечивая порядка 60 % вырабатываемой электроэнергии, и может являться примером для многих стран в плане грамотного проектирования, эффективного строительства, исключительно ответственного отношения к проблемам сохранения окружающей среды и обеспечению надежной и безопасной работы гидротехнических сооружений.

В условиях использования гидропотенциала страны на 87 % и отсутствия перспективы строительства новых крупных гидроузлов усилия гидростроителей в самой Швейцарии направлены главным образом на ремонт и реконструкцию существующих сооружений, включающих, в том числе, наращивание плотин по высоте и упрочнение их конструкций. В то же время швейцарские фирмы активно работают в разных странах мира, участвуя

в строительстве новых ГЭС и в ремонте и реконструкции уже построенных.

Определенное беспокойство у энергетиков Швейцарии вызывают потепление климата и таяние ледников в Альпах, что в перспективе может повлиять на уменьшение выработки электроэнергии ГЭС. В условиях отрицательного отношения швейцарского общества к АЭС уменьшение выработки на гидроэлектростанциях способно создать определенные трудности в снабжении страны электроэнергией.

Список литературы

1. *Welcome to ICOLD's 79-th Annual Meeting // The Int. J. on Hydropower & Dams. Vol. 18. Issue 3. 2011. P. 32.*
2. *International Commission on Large Dams // 79-th Annual Meeting. May 29 — June 3. 2011. Lucerne / Switzerland. Final Bulletin. 2011.*
3. *ICOLD. 80 years. Dams for human sustainable development. 2008.*
4. *Большая Советская Энциклопедия. Швейцария. 1978. Т. 29. С. 945 – 996.*
5. *Switzerland. World Atlas and Industry Guide. 2011 // The Int. J. on Hydropower & Dams. PP. 17, 233 – 234.*
6. *Swiss Committee on dams. Dams in Switzerland. Source for Worldwide Swiss Dams Engineering. May 2011.*
7. *T. Benz. Construction aspects of the Nant de Drance project // The Int. J. on Hydropower & Dams. 2011. Vol. 18. Is 3. P. 35 – 38.*
8. *T. Ihly, G. Seingre. Challenges experienced at the Nant de Drance pumped-storage plant // The Int. J. on Hydropower & Dams. 2011. Vol. 18. Is 3. P. 39 – 42.*
9. *S. Messerklinger, M. Aemmer, R. Straubhaar. Heightening of the Göschenalp earth-core rockfill dam // The Int. J. on Hydropower & Dams. 2011. Vol. 18. Is 3. p. 43 – 48.*
10. *A. Wohnlich, O. Miller. Strengthening of Les Toules arch dam. Swiss Committee on dams. Dams in Switzerland. Source for Worldwide Swiss Dams Engineering. May 2011. PP. 259 – 263.*
11. *Dam Safety in Switzerland. Swiss Committee on dams. Dams in Switzerland. Source for Worldwide Swiss Dams Engineering. May 2011. PP. 11 – 13.*
12. *M. Conrad, C. Rohrer. Some aspects of the roller compacted concrete technology for dams — experience of a swiss consultant. Swiss Committee on dams. Dams in Switzerland. Source for Worldwide Swiss Dams Engineering. May 2011. PP. 338 – 344.*
13. *S. Moll, R. Straubhaar. Performance of a high rockfill dam during construction and first impounding — Nam Ngum 2 CFRD. Swiss Committee on dams. Dams in Switzerland. Source for Worldwide Swiss Dams Engineering. May 2011. PP. 321 – 326.*
14. *C. Torkuhl, D. Wilson. Bituminous hydraulic engineering — status and development. Swiss Committee on dams. Dams in Switzerland. Source for Worldwide Swiss Dams Engineering. May 2011. PP. 327 – 332.*
15. *M. Balissat, B. Joos, A. Wohnlich. Development high arch dams — a comprehensive experience. Swiss Committee on dams. Dams in Switzerland. Source for Worldwide Swiss Dams Engineering. May 2011. PP. 333 – 337.*
16. *C. Anel, R. Boes. Design and construction of the sediment bypass tunnel at Solis // The Int. J. on Hydropower & Dams. 2011. Vol. 18. Is 3. PP. 62 – 66.*
17. *G. De Cesare, A. J. Schleiss, J. M. I. Jenzer Althaus. Innovative approaches sediment management // The Int. J. on Hydropower & Dams. 2011. Vol. 18. Is 3. PP. 68 – 72.*
18. *D. Farinotti, A. Bauder, M. Huss, G. Jonvet, F. Widmer, R. Boes. Future glacier evolution and impact on the runoff regime in the catchments of Alpine reservoirs: the Aletsch area, Switzerland. Swiss Committee on dams. Dams in Switzerland. Source for Worldwide Swiss Dams Engineering. May 2011. PP. 283 – 289.*
19. *S. Terrier, F. Jordan, A. J. Schleiss, W. Haerberli, C. Huggel, M. Künzler. Optimized and adapted hydropower management considering glacier shrinkage scenarios in the Swiss Alps. Swiss Committee on dams. Dams in Switzerland. Source for Worldwide Swiss Dams Engineering. May 2011. PP. 291 – 298.*
20. *D. Leuthard. Preface. Swiss Committee on dams. Dams in Switzerland. Source for Worldwide Swiss Dams Engineering. May 2011. P. 1.*

О монографии “Противофильтрационные завесы гидротехнических сооружений на многолетней мерзлоте”*

Соколовский П. С. (Геостройпроект)

Монография подготовлена группой авторов, представляющих институты “Гидроспецпроект”, “Геостройпроект”, ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева и УС “КольмаГЭСстрой”, посвятивших многие годы своей трудовой деятельности вопросам инженерной подготовки многолетнемерзлых оснований гидротехнических сооружений.

Представляемая монография на сегодня является единственным отечественным изданием, обобщающим опыт проектирования и производства работ по устройству противофильтрационных завес гидротехнических сооружений в условиях многолетней мерзлоты, который накоплен за последние 40 лет первоначально в системе Гидроспецстрой — Гидроспецпроект, а позднее — в Геостройпроекте и ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева.

Книга издана в двух томах, состоит из трех частей, представленных одиннадцатью главами.

В первой части “Природные условия в районах размещения гидроузлов на многолетней мерзлоте” (главы 1 – 3) кратко характеризуются особенности инженерно-геологических условий в зоне распространения многолетней мерзлоты, закономерности формирования криогенного строения грунтов, физико-механические свойства пород. Дается описание методов инженерно-геологических изысканий для обоснования проектов противофильтрационных завес, в частности методов определения и оценки показателей свойств многолетнемерзлых грунтов.

Во второй части “Общие принципы проектирования и производства работ” представлена классификация завес по трем типам (цементационные, завесы-стенки и мерзлотные), а также основы технологии производства работ по каждому типу завес в увязке с условиями производства работ. Значительное место в этой части занимают вопросы, связанные с назначением противофильтрационных завес. Известно бытующее среди гидротехников мнение о том, что противофильтрационные завесы (главным образом цементационные) сооружаются на всякий случай, для порядка или подстраховки. Авторы ставили своей задачей придать данному аспекту проектирования завес пре-

дельную конкретность и показать, что в большинстве случаев в условиях многолетней мерзлоты без противофильтрационной завесы в основании напорного гидротехнического сооружения обеспечить его надежность невозможно. В связи с этим отмечается исключительная важность предельно четкого определения назначения завесы на начальной стадии проектирования.

В главе 5 второй части систематизированы особенности условий создания противофильтрационных завес всех трех типов. Для цементационных завес главным фактором, определяющим эти условия, является время их создания относительно наполнения водохранилища. Граничным критерием служит скорость фильтрации, нормативное значение которой для скальных и полускальных пород основания принято равным 2400 м/сут. Если прогнозируется, что этот критерий не будет превышен после оттаивания основания сооружения при наполненном водохранилище, то проблем с цементацией грунтов в этом случае не возникает. Исключение может составлять незначительная часть объемов, которые приходится выполнять при скоростях фильтрации выше критических. Это обстоятельство требует разработки специальной технологии цементации для каждого конкретного объекта.

В основаниях с предполагаемой высокой водопроницаемостью после оттаивания создание цементационных завес необходимо начинать до наполнения водохранилища. При наличии значительного количества открытых трещин 1-й этап работ допускается выполнять в мерзлом массиве. В менее благоприятных условиях требуется выполнение принудительного оттаивания многолетнемерзлого массива. В обоих случаях цементация выполняется в условиях, отличающихся от стандартных следующими особенностями:

температура грунтов имеет отрицательные значения или близка к 0 °С после оттаивания;

объем искусственно созданного талика весьма ограничен в размерах;

отвод воды из оттаянной части массива возможен преимущественно в вертикальном направлении из-за наличия окружающей его многолетней мерзлоты;

фильтрационный поток и напорные грунтовые воды отсутствуют.

* Авторы: В. И. Федосеев, И. Н. Шишов, В. А. Пехтин, Н. Ф. Кривоногова, А. А. Каган. Издательство ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”, 2009 г.

В монографии представлена специальная технология цементационных работ для этих условий, получившая название “способ цементации многолетнемерзлых скальных и полускальных оснований гидротехнических сооружений с предварительным (принудительным) оттаиванием”.

При устройстве завес-стенок в районах распространения многолетней мерзлоты предложено использовать свайные стенки с бурением скважин диаметром 800 – 1500 мм в обсадке. Это прежде всего связано с невозможностью обеспечить устойчивость стенок траншеи в оттаивающем грунтовом массиве при ее разработке под глинистым раствором из-за отсутствия условий для образования глинистой корки. В качестве материала-заполнителя противофильтрационных стенок рекомендован глиноцементобетон, который по своим свойствам обеспечивает не только их фильтрационную прочность, но и приемлемое напряженно-деформированное состояние системы “плотина — основание”. Для обоснования надежности глиноцементобетона для завес-стенок в районах многолетней мерзлоты и сурового климата выполнен минимально необходимый объем исследований, результаты которых представлены в главе 5 монографии.

Восстановление деградирующих мерзлотных завес и мерзлого состояния грунтов основания по необходимости приходится выполнять в самых неблагоприятных условиях — при наличии сформировавшейся напорной фильтрации на участках напорного фронта с максимальной интенсивностью оттаивания в грунтах, обладающих наибольшей водопроницаемостью. В связи с этим в зоне, намеченной к замораживанию, фактические скорости движения воды значительно превышают критические для существующих способов замораживания и параметров замораживающих устройств. Поэтому при проектировании замораживания таликов, образовавшихся в основании действующих сооружений, в первую очередь необходимо предусмотреть мероприятия, уменьшающие скорость движения воды в зоне замораживания до приемлемой величины. Практика показывает, что устройство в таких условиях дополнительных замораживающих устройств, как правило, эффекта не дает. В качестве такого подготовительного мероприятия в напорных сооружениях используют цементацию оттаявших грунтов.

Другим условием успешного замораживания фильтрующих таликов является обеспечение стабильности его границ при производстве работ. На основании накопленного опыта производства работ авторы монографии считают, что наиболее рациональным мероприятием, сдерживающим развитие талика, является ввод в действие замораживающей системы, опережающий окончание цементацион-

ных работ, когда смыкание льдогрунтовых цилиндров в зоне фильтрации заведомо недостижимо. Требуемый эффект достигается за счет охлаждения оттаявших грунтов и фильтрующей воды в зоне контакта с многолетней мерзлотой. Возможные подвижки границ талика при выполнении всего комплекса работ по его замораживанию компенсируются за счет страховочного заглубления мерзлотных колонок в многолетнемерзлые грунты. Это позволяет избежать бросовых объемов работ по устройству колонок при неучтенных подвижках границ талика.

Новые технологии, предложенные для устройства противофильтрационных завес трех типов, потребовали проведения исследовательских работ, как лабораторных, так и расчетных.

Для цементационных завес, выполняемых при наполненном водохранилище, в Гидроспецпроекте и СибНИИГе проведен комплекс лабораторных работ по подбору составов растворов, позволяющих производство работ при высоких скоростях фильтрации. В процессе этих работ исследованы свойства цементных растворов с добавками силиката и алюмината натрия, а также быстросхватывающихся смесей с регулируемым временем потери текучести на основе двух составляющих, которые приготавливаются и подаются к скважине отдельно, смешиваются же в устье скважины или в зоне цементации. Предложен и успешно опробован в производственных условиях способ поочередной закладки в скважину составляющих быстросхватывающихся смесей.

Для цементационных завес, выполняемых до наполнения водохранилища в искусственно созданных таликах ограниченных размеров, одним из основных принципов цементации является использование стабильных инъекционных растворов с повышенной проникающей способностью. В лаборатории Гидроспецпроекта исследовались свойства стабильных цементно-бентонитовых и цементно-силикатных растворов. Результаты исследований изложены в монографии. Перспективным признается применение в данных условиях растворов на основе особо тонкодисперсного минерального вяжущего. Примером может служить “Микродур” — ОТДВ немецкого производства с удельной поверхностью частиц от 8 до 24 тыс. см²/г.

В 5-й главе представлены также результаты исследований, связанных с изучением надежности противофильтрационных завес-стенок, выполненных в институте “Гидроспецпроект” под руководством д.т.н. Л. И. Малышева и инженеров В. М. Королева и И. Н. Шишова.

Надежность противофильтрационной стенки в основании напорного гидротехнического сооружения определяется двумя факторами: ее фильтраци-

онной прочностью и напряженно-деформированным состоянием, формирующимся под влиянием действующих на нее нагрузок. Малая толщина и низкая водопроницаемость завес-стенок являются причиной формирования на них больших перепадов напора, вызывающих неравномерные деформации основания и стенки, которые потенциально могут привести к образованию растянутых зон и трещин в стенке. Это может стать причиной потери фильтрационной устойчивости не только самой стенки, но также основания и сооружения в целом. В то же время образование трещин в стенке не означает, что потеря фильтрационной прочности системы «стенка — основание» в этом случае неизбежна. Дальнейшее поведение этой системы зависит от многих факторов, но главным образом — от материала-заполнителя стенки. Проведенные в Гидроспецпроекте исследования показали, что правильно подобранный материал-заполнитель способен, с одной стороны, минимизировать опасность образования трещин в стенке от действующих нагрузок, а с другой — в случае их образования — исключить прогрессирующий размыв стенки и грунтов основания. Этим требованиям в полной мере отвечают пластичные заполнители, в качестве которых для свайных стенок предложены глинобетон без цемента (низконапорные сооружения), глиноцементный камень малой прочности и глиноцементобетон. Этот тип материала-заполнителя, обладая необходимой фильтрационной прочностью, по своим деформационным свойствам максимально приближен к свойствам вмещающего стенку грунта, что позволяет обеспечить приемлемое напряженно-деформированное состояние системы «стенка — основание». По технологическим свойствам предпочтение отдается глиноцементобетону, который обеспечивает заполнение бетонируемого пространства под действием только гравитации (без виброуплотнения), нерасплаиваемость при транспортировке и укладке, а также сохранение начальной подвижности в течение не менее двух часов.

По мнению авторов, несомненный интерес должны вызывать исследования морозостойкости глиноцементобетона, выполненные в испытательной строительной лаборатории института «Гидроспецпроект» под руководством В. М. Королева и И. Н. Шишова. Актуальность вопроса о морозостойкости глиноцементобетона впервые стала очевидной в связи с работами по восстановлению противофильтрационных свойств ядра и основания русловой плотины Курейской ГЭС в правом ее понижении с помощью стены в грунте. Верхняя часть стенки должна сохранять противофильтрационные свойства в условиях знакопеременных температур в течение многих десятков лет. До этого исследования по данной тематике не проводились, соответст-

вующие нормативные требования отсутствуют. Более того, неопределенной была сама методика испытаний глиноцементобетона на морозостойкость. Эти исследования стали еще более актуальными после того, как было принято решение о реконструкции оголовков всех грунтовых плотин Курейской ГЭС на фронте более 3000 м.

При испытаниях глиноцементобетона на морозостойкость было решено не ограничиваться измерением прочностных показателей, как это принято для гидротехнического бетона, а дополнительно контролировать объем и массу образцов, а также фиксировать результаты визуальных наблюдений за их состоянием, обращая особое внимание на характер нарушения сплошности. Исследования проводились в условиях, гораздо более жестких по сравнению с реальными — по температуре окружающей среды при промораживании, скорости ее понижения, степени водонасыщения окружающего грунта.

Проведенные исследования показали, что при циклическом промораживании-оттаивании глиноцементобетонной стенки в оголовках грунтовых плотин Курейской ГЭС сохранение ее сплошности и фильтрационной прочности оценивается периодом более 100 лет.

В институте «Гидроспецпроект» проведены также расчетные исследования нестационарного температурного поля вокруг одиночной сваи противофильтрационной стенки, выполняемой в многолетнемерзлых или промерзших грунтах. Вопрос в данном случае заключается в том, насколько быстро протекает процесс оттаивания и обратного промораживания грунта вокруг сваи и самой сваи, как он влияет на условия твердения глиноцементобетона, каким образом можно обеспечить в этих условиях прочность материала в скважинах 1-й очереди, гарантирующую их устойчивость при бурении скважин 2-й очереди.

Выполненные расчеты показали, что положительные температуры в пределах всей сваи сохраняются в течение только одних суток после ее бетонирования. В течение 15 суток глиноцементобетон не замерзает в радиусе 0,4 м, в периферийной части скважины минимальные температуры достигают — 0,7 °С. Это означает, что для обеспечения условий твердения глиноцементобетона необходимо применять противоморозные добавки.

В главе 6 второй части авторы предприняли попытку обобщить опыт исследований, проектирования и производства работ по предпостроечному оттаиванию грунтов в различных областях строительства. Дается классификация способов оттаивания многолетнемерзлых оснований сооружений, проверенных практикой в энергетическом строительстве, а также в тех областях хозяйствования, в

которых они были разработаны (добыча полезных ископаемых, строительство гражданских и промышленных объектов на Крайнем Севере и др.). При обобщении накопленного опыта использованы разработки и исследования институтов ВНИИ-1 (г. Магадан), “ПечорНИИпроект” (г. Воркута), СО НИИОСП (г. Воркута), “Гидроспецпроект” и “Геостройпроект”, а также результаты работ по оттаиванию многолетнемерзлых грунтов, выполненных различными подразделениями АК “Гидроспецстрой” и УС Уренгойской ГРЭС.

В книге дается подробная характеристика технологических принципов и области применения различных способов оттаивания. Отдельный раздел посвящен способам расчетного определения параметров оттаивания, в том числе с учетом экономической эффективности и использованием программ по теплотехническим расчетам для ПЭВМ.

В заключительном разделе главы 6 приведены результаты работ по паро- и гидрооттаиванию многолетнемерзлых грунтов на строительстве Аркалинской ГРЭС, а также по электрооттаиванию ТЭНами на Нерюнгринской ГРЭС, которые позволили накопить опыт производства работ, достаточный для использования при устройстве цементационных завес гидротехнических сооружений.

Практикующих инженеров-строителей, эксплуатационников и проектировщиков должна заинтересовать 3-я часть монографии “Противофильтрационные завесы отечественных гидроузлов”. В ней обобщен большой фактический материал по противофильтрационным завесам трех типов 12 отечественных гидроузлов, построенных на многолетней мерзлоте за последние 40 лет. Дается обоснование необходимости завес, их конструкции, а также подробное описание способов производства работ, производственных параметров, достигнутых результатов, эффективности выполненных противофильтрационных завес и их роли в обеспечении надежности построенных гидротехнических сооружений.

Представленные в главах 7 и 8 цементационные завесы характеризуются широким разнообразием условий, в которых они создавались:

до заполнения водохранилища в искусственно созданных таликах (плотина Нерюнгринской ГРЭС, напорные сооружения Колымской ГЭС и Вилуйской ГЭС-3);

в процессе заполнения водохранилища (плотины Билибинской АЭС и Колымской ГЭС);

после заполнения водохранилища (Вилуйские ГЭС 1 и 2, Колымская ГЭС (завеса 2-й очереди), плотина Надеждинского хвостохранилища);

в основаниях с низкой и очень высокой водопроницаемостью;

в крепких скальных и полускальных грунтах;

в процессе строительства гидросооружений и во время их эксплуатации.

Классическим примером выполнения цементации основания с низкой водопроницаемостью по мере его оттаивания после заполнения водохранилища является завеса напорных сооружений Вилуйской ГЭС-1. Выбранный способ производства цементационных работ позволил значительно сократить их объем, намеченный проектом. Цементация в основании напорных сооружений Вилуйской ГЭС-2, выполненная таким же способом, в комплексе с дренированием основания за линией напорного фронта исключила выходы фильтрационного потока на поверхность в условиях сурового климата. По данным натурных наблюдений на Вилуйской ГЭС-1 впервые установлены характер оттаивания скального основания плотины после заполнения водохранилища, его зависимость от начальной температуры, водопроницаемости скального массива и рельефа местности.

При проектировании цементационной завесы сооружений Колымской ГЭС авторы монографии впервые предложили для многолетнемерзлых оснований с высокой водопроницаемостью после оттаивания выполнять завесы в две очереди. Завеса 1-й очереди выполняется до заполнения водохранилища при отсутствии фильтрации в предварительно оттаянном массиве ограниченных размеров. Поскольку в этих условиях требуемая плотность зацементированных грунтов не может быть достигнута, после заполнения водохранилища при уже ограниченных скоростях фильтрации выполняется цементация 2-й очереди с доведением завесы до проектной плотности.

Основы способа цементации многолетнемерзлых оснований с предварительным оттаиванием разработаны по результатам опытных работ, выполненных на площадке Колымской ГЭС. *Технология и результаты этих работ изложены в главе 8.* Новый способ цементации впервые опробован в производственных условиях на строительстве плотины Нерюнгринской ГРЭС, а в полном объеме внедрен при сооружении цементационной завесы 1-й очереди в основании напорных сооружений Колымской ГЭС на фронте около 700 м. Для этого потребовалось выполнить оттаивание многолетнемерзлых гранитов в объеме 550 тыс. м³. При этом авторам пришлось разработать способ электрооттаивания скальных грунтов основания из цементационных галерей, преодолевая значительные ограничения по условиям безопасного производства работ.

Незначительную часть объемов 1-й очереди по правобережной завесе плотины пришлось выполнять при наполненном водохранилище и напоре около 80 м. Причиной стала задержка в подготовке

Сооружение	Признаки экстремальной ситуации
Колымская ГЭС Временная плотина	Не обеспечена фильтрационная прочность аллювиальных грунтов основания и суглинка ядра плотины на русловом участке. Невозможно наполнение водохранилища и пуск 1-го гидроагрегата.
Колымская ГЭС Левобережная часть плотины	Ожидаемый фильтрационный расход в основании плотины оценивается как возможная причина возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации плотины, машзала и других подземных сооружений.
Колымская ГЭС Строительный туннель	Фильтрационный ход в придонной части бетонной пробки под ядром плотины может стать причиной ее разрушения с последующим обводнением и потерей устойчивости низовой призмы плотины, а также выходом большого количества воды на пристанционную площадку и в подземные сооружения.
Гидроузел Билибинской АЭС	Из-за чрезмерно больших фильтрационных потерь воды из водохранилища не обеспечено водоснабжение пос. Билибино.
Вилуйская ГЭС-3	В начале 2002 г. в результате оттаивания многолетнемерзлых грунтов в правом примыкании верховой перемычки сформировалась фильтрация, которая сопровождалась суффозией грунтов. Возникла угроза аварийного затопления котлована бетонных сооружений и срыва пуска 1-го гидроагрегата.
Аркагалинская ГРЭС Главный корпус	В результате быстрого оттаивания многолетнемерзлых грунтов основания возникли недопустимые неравномерные деформации строительных конструкций и фундаментов технологического оборудования. Безаварийная эксплуатация ГРЭС невозможна.

основания плотины. Таким образом, волею обстоятельств был проведен производственный эксперимент по цементации скальных грунтов с высокой водопроницаемостью при больших скоростях фильтрации. Авторы излагают способы решения неожиданно возникшей проблемы, усугубленной отсутствием необходимых для таких условий инъекционных материалов.

Несомненный практический интерес, прежде всего для проектировщиков, должны представлять опыт производства и результаты работ по цементационной завесе напорных сооружений Вилуйской ГЭС-3. Генеральный проектировщик — институт «Ленгидропроект» долгое время не мог определиться с позицией по вопросам необходимости и назначения завесы, а также контрольных требований к ней. Связано это было с затяжкой решения вопроса о суффозионности полускальных грунтов основания, местами разрушенных различными природными процессами до рыхлых разностей. Это привело, с одной стороны, к необходимости выполнять значительные объемы цементационных работ без должной к ним подготовки, а с другой — к частым изменениям в формулировании контрольных требований к завесе. В результате возникли большие трудности со сдачей выполненных работ и объективно необоснованные дополнительные работы. На фоне отсутствия единого мнения о суффозионности грунтов основания уже после наполнения водохранилища и выполнения проектной цементационной завесы при анализе данных натурных наблюдений возникли разногласия между Вилуйской ГЭС-3 и авторами проекта по вопросу надежности завесы и достаточности выполненных объемов работ. В главе 7 авторы обосновывают свою позицию по спорным вопросам.

На строительстве Вилуйской ГЭС-3 цементационная завеса 1-й очереди выполнялась с предварительным электрооттаиванием оснований каменно-земляных плотин, которое было крайне осложнено высокой степенью термпросадочности грунтов (до 1–2 м на всю глубину оттаивания) и минерализации межмерзлотных и подмерзлотных вод. В книге содержится большой фактический материал по электрооттаиванию грунтов, технологии и результатам цементационных работ.

В главе 9 рассмотрены вопросы эффективности цементационных завес в экстремальных условиях, нередко возникающих при строительстве гидросооружений в районах многолетней мерзлоты. На примерах показано, что, в отличие от распространенного мнения о цементации оснований гидросооружения как о профилактическом мероприятии, она не только способствует повышению их надежности, но часто является практически единственным средством преодоления экстремальной ситуации, обеспечения нормального функционирования сооружения или ликвидации его аварийного состояния.

В главе 9 рассмотрены вопросы эффективности цементационных завес в экстремальных условиях, нередко возникающих при строительстве гидросооружений в районах многолетней мерзлоты. На примерах показано, что, в отличие от распространенного мнения о цементации оснований гидросооружения как о профилактическом мероприятии, она не только способствует повышению их надежности, но часто является практически единственным средством преодоления экстремальной ситуации, обеспечения нормального функционирования сооружения или ликвидации его аварийного состояния.

Считаем уместным привести здесь таблицу 9.1 из главы 9, дающую представление о характере экстремальных ситуаций.

Интересующиеся подробностями выполненных цементационных работ найдут необходимые материалы в главе 9.

Глава 10 посвящена противofильтрационным завесам-стенкам. Успешный опыт устройства завес данного типа относится к двум гидростанциям: Курейской и Вилуйской ГЭС-3. В сооружениях этих ГЭС выполнены стенки одного типа — свайные с бурением скважин в обсадке и заполнением их глиноцементобетоном. Они прекрасно зарекомендовали себя при ликвидации аварийных ситуаций на русловой плотине Курейской ГЭС и верхней перемышке котлована бетонных сооружений Вилуйской ГЭС-3. Их эффективность подтверждена данными натурных наблюдений за пьезометрическими уровнями фильтрационного потока и водопритоком в котлован. Противofильтрационные стенки этого типа позволили в предельно оперативном режиме реконструировать оголовки грунтовых плотин Курейской ГЭС, не прибегая к земляным работам на ограниченном пространстве гребня плотины в крайне ограниченных временных рамках.

Весьма показательными следует признать обстоятельства, при которых принималось решение об устройстве противofильтрационной завесы-стенки в основании правобережной каменно-земляной плотины Вилуйской ГЭС-3. По первоначальному проекту на этом участке напорного фронта предусматривалось выполнить в две очереди цементационную завесу. Вариант со стеной в грунте оказался неконкурентоспособным по экономическим соображениям. Несмотря на это, волевым решением технико-экономического совета АК АЛРОСА и Ленгидропроекта этот вариант был утвержден сначала для участка строительного канала, а затем — для всей правобережной плотины. При этом бросовыми оказались объемы работ по цементационной завесе 1-й очереди, выполненные с предварительным электрооттаиванием многолетнемерзлых грунтов на 40 % длины напорного фронта плотины. Решающими оказались обстоятельства, связанные с возможностью отказа от организации откачиваемого котлована в строительном канале и отсутствием единого мнения по качеству выполненной цементации. Однако после принятия неподкрепленного необходимыми обоснованиями решения об устройстве завесы-стенки возникла масса вопросов, касающихся ее надежности в конкретных условиях возведения правобережной плотины. Эти условия определяются прежде всего наличием в основании плотины как оттаянных, практически прошедших стадию стабилизации, так и многолетнемерзлых грунтов, способных к термопросадкам

до 1 – 2 м при оттаивании после принятия напора плотиной. В этой ситуации, предполагающей крайне неравномерные деформации ядра плотины и стены в грунте, их надежность неоспорна.

В зоне защиты бортов и днища строительного канала крупногабаритным камнем не выполнена инъекция. В связи с этим опасность потери фильтрационной устойчивости глиноцементобетона в этой зоне при образовании в стенке сквозных трещин становится вполне реальной, особенно с учетом того, что его прочностные показатели назначены Ленгидропроектом волевым порядком на очень низком уровне, а проверки на фильтрационную устойчивость не проводились.

Без ответа остались также вопросы напряженно-деформированного состояния стены в грунте в условиях оттаивающего термопросадочного основания и узла сопряжения стенки с суглинистым ядром.

Авторы монографии считают реализацию варианта противofильтрационной завесы-стенки в основании правобережной плотины Вилуйской ГЭС-3 производственным экспериментом на сооружении постоянного назначения, связанным с большим риском. В то же время этот эксперимент с инженерной точки зрения представляет большой практический интерес, поскольку аналогов сооружению подобного типа в гидротехнике не существует.

Вопросам восстановления деградирующих мерзлотных завес на действующих гидроузлах посвящены материалы главы 11. Эта тема в последнее время стала весьма актуальной, поскольку на многих гидроузлах надежность плотин мерзлого типа по разным причинам оказалась не обеспеченной в долговременном разрезе. В этой главе рассмотрены проблемы, возникшие на пяти гидроузлах с плотинами мерзлого типа, в решении которых авторы приняли непосредственное участие.

На Сытыканском гидроузле после 20 лет бесперебойной эксплуатации оттаивание многолетнемерзлых грунтов началось на участке водосброса по фильтрационным ходам, сформировавшимся на контакте бетона водослива и устоев с разуплотненными коренными породами. В течение пяти лет (к концу 1999 г.) талик, развиваясь влево и вправо от водосброса, достиг ширины около 400 м при максимальной глубине от отметки гребня плотины 45 м. В сторону правого борта талик продвигался со скоростью 30 – 50 м/год. С декабря 1994 г. по май 1997 г. поверхностный расход фильтрации, измеренный в нижнем бьефе, вырос со 150 до 3200 м³/ч. Начались суффозионные процессы в ядре плотины и ее основании. Ввод в эксплуатацию дополнительной замораживающей системы воз-

душного типа положительного эффекта не дал. Состояние гидроузла оценивалось как предаварийное.

По заданию АК АЛРОСА Гидроспецпроект рассмотрел различные варианты восстановления водонепроницаемости напорного фронта с помощью противодиффузионной завесы и пришел к выводу, что при среднем коэффициенте фильтрации грунтов основания около 900 м/сут эффективна только завеса, полностью перекрывающая талик и имеющая водонепроницаемый контакт с мерзлыми грунтами по всему ее периметру. Этим требованием удовлетворяла только мерзлотная завеса.

Исходя из опыта эксплуатации замораживающих систем в плотинах мерзлого типа, накопленного к концу 1990-х гг. для условий Сытыканского гидроузла наиболее эффективной была признана система В. А. Анисимова — замораживающая жидкостная система сезонного действия с вынужденной циркуляцией хладоносителя и его охлаждением атмосферным воздухом. В качестве циркулирующего хладоносителя по климатическим условиям был выбран керосин. Жидкостные и испарительные термосифоны были отвергнуты, поскольку они не предоставляют возможности управлять процессом замораживания и подключать колонки к системе круглогодичного действия.

Решение задачи по замораживанию грунтов выполнено расчетным путем на ПЭВМ с помощью программы “ТЕПЛО-3”, которая позволила путем вариантирования определить допустимый уровень водонепроницаемости фильтрующих грунтов и оптимальные параметры замораживающей системы. Главным результатом расчета стала необходимость устройства цементационно-мерзлотной завесы.

Параметры цементационно-мерзлотной завесы и возможность ее надежного сопряжения с мерзлыми грунтами были проверены на опытно-производственном фрагменте. Выяснилось, что при использовании замораживающей системы сезонного действия создание мерзлотной завесы возможно только при полноценном (практически 100 %-ном) использовании зимнего сезона. В действительности это оказалось невозможным, поэтому в дальнейшем в конце зимнего сезона колонки подключались к компрессорной холодильной установке ПХУ-50, которая обеспечивала продолжение процесса замораживания в теплое время года.

Наиболее сложными условия производства работ оказались на участке правого борта водосброса, где ежегодное расширение талика составляло 40 – 50 м. С целью стабилизации границ талика цементационно-мерзлотную завесу требовалось в первую очередь создать в примыкании к многолетнемерзлым породам правого борта. После попыток в течение нескольких зимних сезонов решить эту задачу все-таки не удалось. У авторов проекта соз-

далось впечатление, что Удачинский ГОК, оценив свои скромные ресурсы по производству работ, тихо саботировал исполнение предлагаемых проектных решений, которое перманентно не успевало за ситуацией. На самом деле ГОК, вероятно, сознательно шел на ситуацию, при которой оттаивание многолетнемерзлых грунтов на участках водосброса и правого борта станет неконтролируемым. В результате к этой ситуации и пришли. Однако авторы монографии считают, что и из этой неудачи можно и должно извлечь ценный опыт производства работ по замораживанию фильтрующих грунтов с высокой водопроницаемостью. Предпринятые технологические попытки преодоления ситуации подробно описаны в монографии.

На участке плотины восстановление мерзлотной завесы проходило относительно беспрепятственно. За период с зимы 1999/2000 г. до конца 2008 г. мерзлотная завеса плотины была восстановлена на фронте около 185 м, а весной 2009 г. она примкнула к водосбросу. В книге анализируется работа замораживающих систем за этот период.

Более удачный опыт производства работ по ликвидации фильтрующего талика с помощью цементационно-мерзлотной завесы относится к гидроузлу на руч. Безымянный (приток р. Марха в Якутии). Талик под траншеей для пропуска строительных расходов глубиной 10 м и шириной более 50 м был ликвидирован в условиях острейшего дефицита времени для выполнения цементации и монтажа парожидкостных колонок благодаря своевременному выполнению комплекса работ, предложенных проектом.

По мнению авторов, весьма поучительным является опыт устройства мерзлотной завесы в сооружениях гидроузла на руч. Лиендокит (бассейн р. Марха — левого притока р. Виллой). При проектировании гидроузла благоприятные инженерно-геологические условия позволили институту “Якутнипроалмаз” остановиться на талом типе плотины с допущением оттаивания многолетнемерзлого основания после наполнения водохранилища. С началом эксплуатации гидроузла сразу обнаружилось несовпадение фактических фильтрационных потерь с расчетными. В таком состоянии гидроузла не мог обеспечить водопотребность поселка и промзоны. Якутнипроалмаз предложил разработать проект ликвидации фильтрации двум организациям: Геостройпроекту (г. Москва) и НПО “Фундаментстройаркос” (г. Тюмень), поставив жесткое условие по допустимым фильтрационным потерям (не более 40 м³ в сутки). Это условие однозначно определило необходимость устройства мерзлотной завесы по всему напорному фронту, что означало изменение типа сооружений гидроузла с талого на мерзлый.

Проектирование осложнялось отсутствием четкого представления о границах талика. Данные о глубине талика, полученные геофизической разведкой, противоречили сведениям изыскателей о трещиноватости долеритов, поэтому были основания сомневаться и в достоверности планового положения талика. В этой ситуации Геостройпроект предложил разработку проекта в две стадии. На первой — выполнить разведочно-цементационные работы с определением границ талика по данным термонаблюдений в скважинах, а также дать принципиальное решение по типу замораживающих устройств и их параметрам. Окончательные решения и прежде всего положение нижней границы мерзлотной завесы предполагалось определить по результатам разведочных работ.

НПО “Фундаментстройаркос” предпочло одностадийно выдать окончательное проектное решение, ориентируясь на границы талика, установленные геофизической разведкой. При этом в качестве замораживающих устройств предложены заполненные парожидкостные СОУ конструкции НПО “Фундаментстройаркос”, соединенные с аппаратом воздушного охлаждения (АВО), обеспечивающим обдув теплообменников СОУ вентилятором. По этому предложению создание сплошной мерзлотной завесы гарантировалось за один зимний сезон при шаге колонок 2 м, снижении водопроницаемости долеритов до 0,3 м/сут. И активно действующем АВО.

Выполнив свои теплотехнические расчеты, Геостройпроект пришел к заключению, что предложение НПО “Фундаментстройаркос” характеризуется как решение с большим запасом, а работу системы замораживания можно организовать без подключения вентиляторов системы АВО, сохранив при этом шаг колонок 2 м.

Получив оба предложения, Якутнипроалмаз принял вариант НПО “Фундаментстройаркос”. После этого началось форсирование работ по бурению скважин, монтажу СОУ и системы АВО. Выполнение разведочно-цементационных работ стало невозможным, а расширение сети термонаблюдений явно запаздывало.

По окончании бурения дополнительных термоскважин, предложенных Геостройпроектом, первые же термозамеры показали, что развитие талика происходит по всей длине плотины и совсем не по той схеме, которая была определена геофизической разведкой. В основании левобережной части плотины, где геофизическая разведка в 2005 г. вообще не зафиксировала талика, в августе 2006 г. грунты основания оттаяли на глубину 25 – 27 м. В результате левое крыло мерзлотной завесы “повисло” в фильтрующем талике. Возникла ситуация, требующая полного пересмотра проектного решения, предло-

женного НПО “Фундаментстройаркос”, поскольку “висячая” мерзлотная завеса с системой замораживания сезонного действия не может быть долговечной в фильтрующем талике.

В главе 11 рассмотрены также вопросы обеспечения температурной устойчивости сооружений Певекского гидроузла, который является первым крупным гидротехническим объектом, построенным по принципу сохранения многолетней мерзлоты, для которого мероприятия по повышению надежности его сооружений были разработаны еще до того, как в самих сооружениях и их основании начали развиваться аварийные тенденции. В этой же главе дается оценка вариантов восстановления мерзлотной завесы сооружений Иреляхского гидроузла. Выполненные проектные проработки показали, что бесконтрольное развитие талика в основании сооружений привело их к такому состоянию, когда восстановление водонепроницаемого напорного фронта с помощью цементационно-мерзлотной завесы вряд ли можно признать оправданным. Благоприятный для этого момент безвозвратно упущен. В этой ситуации более предпочтительным является строительство нового гидроузла.

В заключение в сжатой форме сформулируем результаты, достигнутые авторами монографии в области строительства противофильтрационных завес гидротехнических сооружений в условиях многолетней мерзлоты:

доказана исключительно важная роль цементации грунтов для обеспечения их фильтрационной прочности в процессе оттаивания под воздействием фильтрации, а также при формировании поверхности фильтрационного потока в нижнем бьефе, особенно в период, когда фильтрационно-температурный режим системы “сооружение — основание” еще не стабилизировался;

предпостроечное оттаивание многолетнемерзлых грунтов, выполняемое для последующей их цементации, стало, кроме того, испытанным способом решения задачи консолидации грунтов основания сооружений с высокой степенью термопросадочности;

в условиях реального строительства проверены и усовершенствованы способы оттаивания многолетнемерзлых оснований сооружений;

отработаны технологические приемы цементации трещиноватых скальных пород при больших напорах грунтовых вод и высоких скоростях фильтрации;

разработан и внедрен способ устройства цементационных завес в многолетнемерзлых грунтах с предварительным оттаиванием, позволяющий создавать завесы в основаниях с высокой водопроницаемостью до наполнения водохранилища;

внедрена технология устройства противofильтрационных свайных завес-стенок в многолетне-мерзлых грунтах с бурением скважин большого диаметра в обсадке на глубину 50 м и более и заполнением их глиноцементобетоном. Это позволило расширить круг задач, решаемых при подготовке оснований гидросооружений, а также при ликвидации наиболее сложных аварийных ситуаций, обусловленных фильтрацией;

созданы программы для ПЭВМ, позволяющие в автоматическом режиме рассчитывать параметры процесса замораживания грунтов при создании мерзлотных завес в фильтрующих грунтах, а также производить построение температурных полей в их динамике;

прошел успешную проверку практикой способ восстановления деградирующих под воздействием фильтрации мерзлотных завес гидросооружений на оттаивающих основаниях с высокой водопроницаемостью грунтов.

Европейские инженеры-гидротехники и ученые в области теоретической и прикладной гидродинамики XIX – XX веков

Недавно вышел в свет уникальный двухтомный биографический справочник “Гидравлики в Европе, 1800 – 2000: Биографический словарь ведущих специалистов в области гидротехники и гидромеханики”¹, составленный профессором Цюрихского политехникума (ETH Zürich) Вилли Хагером. Справочник содержит свыше полутора тысяч кратких биографических справок о европейских ученых и инженерах XIX – XX веков, связанных в своей деятельности с гидротехникой, гидравликой и гидродинамикой.

Биографический словарь отличается чрезвычайно широким охватом специалистов. Он включает инженеров-гидротехников — проектировщиков, строителей и изыскателей, ученых — гидравликов и гидродинамиков, а также физиков и математиков, соприкасавшихся в своей деятельности с различными проблемами движения жидкости.

Каждая биографическая справка занимает одну страницу книги и содержит краткие библиографические ссылки. Автору удалось снабдить почти все справки портретами, порой публикуемыми впервые. Справочник свидетельствует о громадной работе, проведенной при его подготовке.

Распределение включенных в справочник лиц по периодам их деятельности характеризуется сле-

Считаем необходимым отметить важную роль авторского надзора за производством работ в подготовке материалов для представленной в этой статье книги. Устройство противofильтрационных завес относится к категории скрытых работ. Авторы хорошо понимали, что объективная оценка полученных результатов во многом зависит от достоверности их документации. Материалы, содержащиеся в книге, основаны на результатах авторского надзора и тщательного контроля производственного процесса специалистами Гидроспецпроекта и Геостройпроекта на строящихся объектах. Очень часто, особенно при внедрении новых технологий, авторский надзор переходил в технологический, предполагающий не только контроль за соблюдением проектных требований, но и, при необходимости, корректировку производственного процесса, а также оформление исполнительной документации на выполненные работы и натурные наблюдения.

дующим образом. Скончавшихся в первой половине XIX века — 57 человек, во второй половине XIX века — 145, в первой половине XX века — 483, во второй половине XX века — 757 и в 2001 – 2007 гг. — 81. Кроме того, в справочник попали 15 человек, работавших и скончавшихся в XVIII веке, хотя он не содержит справок об основателях теоретической гидравлики и гидродинамики Данииле Бернулли (1700 – 1782) и Леонарде Эйлере (1707 – 1783).

Биографические справки сгруппированы по современным европейским странам, в которых работали (или только родились) включенные в справочник ученые и инженеры, хотя распределение это условно, поскольку некоторые инженеры и ученые работали в разных странах, а многие страны, существовавшие в XIX и даже в XX веке, исчезли с современной географической карты (например, Австро-Венгрия и Чехословакия). С целью увеличить охват справочника автор включил в него и некоторых специалистов, которые лишь родились в Европе, но в детстве или юности переехали в США.

Биографическим справкам, отнесенным к каждой стране, предпослана в первом томе краткая характеристика развития гидравлики и гидротехники этой страны. Весь материал условно разбит по 25 странам: Австрия (96 человек), Бельгия (28), Болгария (2), Великобритания (206), Венгрия (28), Германия (344), Греция (1), Дания (12), Ирландия (9), Испания (27), Италия (103), Нидерланды (38), Норвегия (11), Польша (18), Португалия (11), Прибалтий-

¹ Hager W. Hydraulicians in Europe, 1800 – 2000: A biographical dictionary of leaders in hydraulic engineering and fluid mechanics. IAHR, 2003 – 2009. — xxiv + 1757 с.

ские страны – Латвия, Литва и Эстония (8), Россия (155), Румыния (15), Турция (6), Финляндия (4), Франция (255), Чехия и Словакия (33), Швейцария (93), Швеция (25), Югославия (10).

За рамками Биографического словаря В. Хагера, естественно, остались многочисленные инженеры и ученые США. В части американских инженеров-гидротехников и специалистов по гидравлике читателям можно рекомендовать далеко не полную, но содержательную и квалифицированно написанную книгу Х. Рауза “Гидравлика в Соединенных Штатах, 1776 – 1976”².

Российским и советским инженерам и ученым в Биографическом словаре В. Хагера посвящено около 160 справок. Этот материал в таком объеме стал доступен западному читателю впервые. Автор специально указывает на недостаток информации в Западной Европе о российских и советских работах в этой области, подчеркивая их значительность. Надо сказать, что и в русской историко-научной литературе нет подобной сводки биографических данных о наших специалистах.

Приведем перечень российских и советских специалистов, охваченных Биографическим словарем В. Хагера. Это — А. С. Абелев (1913 – 1984), Н. Н. Абрамов (1901 – 1982), Г. Н. Абрамович (1911 – 1995), И. И. Агроскин (1900 – 1968), В. Г. Айвазян (1906 – 1971), Б. К. Александров (1889 – 1973), А. Д. Альтшуль (1913 – 1964), А. К. Ананиян (1915 – 1981), В. И. Аравин (1900 – 1980), А. Н. Ахутин (1892 – 1960), В. С. Бамбург (1894 – 1956), Б. А. Бахметев (1880 – 1951), А. А. Беляков (1894 – 1992), Н. М. Бернадский (1882 – 1935), Л. Б. Бернштейн (1911 – 1996), Д. К. Бобылев (1842 – 1917), Ф. И. Быдин (*1898), С. В. Валландер (1917 – 1975), М. В. Вальтер (1895 – 1968), Б. Е. Веденеев (1885 – 1946), В. В. Ведерников (1904 – 1980), И. А. Вейц (1911 – 1944), М. А. Великанов (1879 – 1964), В. П. Ветчинкин (1888 – 1950), И. Н. Вознесенский (1887 – 1946), П. А. Войнович (1900 – 1965), Б. Г. Галёркин (1871 – 1945), Р. С. Гальперин (1906 – 1992), Г. З. Гершуни (1929 – 1999), И. П. Гинзбург (1910 – 1979), Н. К. Гирицкий (1898 – 1956), В. Г. Глушков (1883 – 1937), В. В. Голубев (1884 – 1954), В. Н. Гончаров (1899 – 1963), А. А. Гриб (1912 – 1978), И. С. Громека (1851 – 1889), Ф. Г. Гунько (1911 – 1990), М. И. Гуревич (1909 – 1975), Н. М. Гюнтер (1871 – 1941), Б. Б. Девисон (1908 – 1961), М. А. Дементьев (1899 – 1991), М. М. Дидковский (1903 – 1986), Д. Е. Долидзе (1908 – 1960), В. Б. Дульнев (1912 – 2001), И. А. Евневич (1831 – 1903),

И. В. Егизаров (1893 – 1971), И. Г. Есьман (1868 – 1955), Н. Е. Жуковский (1847 – 1921), Е. А. Замарин (1884 – 1962), В. П. Захаров (1896 – 1975), А. П. Зегжда (1900 – 1955), П. Л. Иванов (1926 – 1991), И. Е. Идельчик (1906 – 1987), С. В. Избаш (1904 – 1986), Н. Б. Исаченко (1916 – 1996), В. С. Истомина (1899 – 1989), Н. А. Картвелишвили (1915 – 1985), М. В. Келдыш (1911 – 1978), И. А. Кибель (1904 – 1970), П. Г. Киселев (1890 – 1981), В. С. Кнороз (1905 – 1971), Н. Н. Ковалёв (1908 – 2003), А. Н. Колмогоров (1903 – 1987), Н. Е. Кондратьев (1899 – 1985), Н. Е. Кочин (1901 – 1944), П. Я. Кочина (1899 – 1999), А. Н. Крылов (1863 – 1945), А. Я. Кузнецов (1910 – 1969), К. К. Кузьмин (1917 – 1995), Д. И. Кумин (1908 – 1959), М. А. Лаврентьев (1900 – 1980), О. А. Ладыженская (1922 – 2004), Л. Д. Ландау (1908 – 1968), И. И. Леви (1900 – 1965), В. Г. Левич (1917 – 1987), Л. С. Лейбензон (1879 – 1951), Н. С. Лелявский (1853 – 1905), С. Н. Лелявский (1891 – 1963), А. Ф. Лесохин (1895 – 1950), Г. В. Логвинович (1913 – 2002), Л. Г. Лойцянский (1900 – 1991), Г. М. Ломизе (1899 – 1980), В. М. Лохтин (1849 – 1919), А. М. Ляпунов (1857 – 1918), С. О. Макаров (1849 – 1904), В. М. Маккавеев (1896 – 1970), Н. Т. Мелешенко (1904 – 1941), И. В. Мещерский (1859 – 1935), М. Д. Миллионщиков (1913 – 1973), А. Я. Милович (1874 – 1958), К. А. Михайлов (1895 – 1975), А. Ф. Можайский (1825 – 1890), А. Л. Можевитинов (1906 – 1993), Н. Н. Моисеев (1917 – 2000), А. С. Монин (1921 – 2007), И. И. Москвитинов (1885 – 1963), М. А. Мостков (1900 – 1956), А. И. Некрасов (1883 – 1957), И. М. Неудачин (Нелидов) (1894 – 1968), И. К. Никитин (1911 – 1993), С. Н. Нумеров (1910 – 1994), Н. Н. Павловский (1884 – 1937), А. Н. Патрашев (1910 – 1988), Г. Д. Петров (1910 – 1975), Г. И. Петров (1912 – 1987), Н. П. Петров (1836 – 1920), А. И. Пехович (1915 – 1980), Н. Н. Поляхов (1906 – 1987), Н. А. Преображенский (1899 – 1981), Г. Ф. Проскура (1876 – 1958), Б. В. Проскураков (1901 – 1993), А. Н. Рахманов (1900 – 1990), Б. Ф. Рельтов (1898 – 1991), Г. К. Ризенкамф (1886 – 1943), И. Л. Розовский (1908 – 1978), Г. В. Рубинштейн (1919 – 1978), Д. П. Рябушинский (1882 – 1962), А. А. Сабанеев (1886 – 1955), А. А. Саткевич (1869 – 1938), Л. И. Седов (1907 – 1999), Я. И. Серкерж-Зенькович (1899 – 1985), М. Ф. Складнев (1919 – 1991), Н. А. Слезкин (1905 – 1991), В. А. Соколов (1903 – 1964), Д. Я. Соколов (1890 – 1962), В. В. Соколовский (1912 – 1978), Л. Н. Сретенский (1902 – 1973), В. А. Стеклов (1863 – 1926), Г. Ю. Степанов (1922 – 2005), К. И. Страхович (1894 – 1968), В. В. Струминский

² Rouse H. Hydraulics in the United States, 1776 – 1976. — Univ. Iowa Inst. Hydraul. Res., 1976. — ix + 238 p.

(1914 – 1998), Г. И. Сухомел (1888 – 1966),
 И. А. Тиме (1838 – 1920), В. Е. Тимонов
 (1862 – 1936), Г. Г. Тумашев (1910 – 1984),
 А. А. Угинчус (1899 – 1972), М. Е. Факторович
 (1912 – 1971), Н. В. Фёдоров (1901 – 2003),
 Н. А. Филимонов (1894 – 1986), П. Ф. Фильчаков
 (1916 – 1978), Ф. И. Франкль (1905 – 1961),
 А. А. Фридман (1888 – 1925), П. К. Фролов
 (1775 – 1839), А. Д. Халтурин (1902 – 1988),
 М. Д. Хаскинд (1913 – 1963), С. А. Христианович
 (1908 – 2000), С. А. Чаплыгин (1869 – 1942),
 И. А. Чарный (1909 – 1967), М. Д. Чертоусов
 (1892 – 1960), Р. Р. Чугаев (1904 – 1981),
 А. И. Шварц (1900 – 1958), В. Н. Щелкачёв
 (1907 – 2005), Г. А. Юдицкий (1921 – 1975).

Некоторые из них отнесены в Справочнике не к России. Так, основатель знаменитого Кучинского аэродинамического института Д. П. Рябушинский числится по Франции; родившийся близ Двинска С. И. Колупайло (1892 – 1964), работавший впоследствии в Литве, а затем эмигрировавший в США, — к Литве. С другой стороны, к разделу “Россия” отнесены, например, К. П. Воронец (1902 – 1974), Г. Келеган (1890 – 1989) и Я. М. Шпицглас (1869 – 1933), покинувшие Россию в детстве. Один из классиков теории фильтрации, уроженец Риги Морис Мускат (1906 – 1998), учившийся и работавший всю жизнь в США, числится по Прибалтике. Это касается и ряда других инженеров и ученых, родившихся до 1917 г. в западных и прибалтийских губерниях России, которые приписаны в Справочнике не к России, а к другим странам, в частности к Польше (что естественно).

Разумеется, что при таком громадном объеме материала текст биографических справок не лишен неточностей, особенно в справках о российских ученых и инженерах. Последнее объясняется трудностью использования западноевропейскими специалистами русскоязычных источников, на что прямо указывает автор. К тому же и сами русскоязычные источники почти недоступны в Западной Европе. Только журнал “Гидротехническое строи-

тельство” с 1967 г. стал издаваться параллельно на английском языке. В 1990-х гг. рецензент переслал в Швейцарию довольно полный комплект “Известий ВНИИГ” за предшествующие десятилетия и другие издания этого института, которые автор пытался использовать с привлечением коллег-славистов. Он широко использовал также биографическую энциклопедию “Энергетики России” А. И. Мелуа (2001)³, которая, кстати, малоизвестна и в России (автор ссылается на этот источник в 29 биографических справках).

Приводить в короткой рецензии длинный перечень отдельных неточностей в биографических справках едва ли целесообразно. Отмечу только неправильные сведения об основании ЦАГИ, помещенные в первом томе, ошибочно приписанное И. В. Мещерскому сочинение о разведении кормовой кукурузы и искаженное имя Б. В. Проскуракова. Надо, однако, иметь в виду, что автор предполагает выпустить второе, исправленное издание книги, после того как разойдется первый ее тираж. Хотелось бы, чтобы все замеченные исправления к тексту Биографического словаря сообщали автору (Prof. Willi Hager ager@vaw.baug.ethz.ch).

К сожалению, замечательный и, безусловно, уникальный в своем роде Биографический словарь В. Хагера мало известен среди специалистов. Это объясняется как недостаточной рекламой, так и тем обстоятельством, что оба тома напечатаны Международной ассоциацией гидравлических исследований в практически неизвестных издательствах (первый том был напечатан в Сингапуре, а второй — в Мадриде).

*Михайлов Г. К., доктор физ.-мат. наук
 (Российский национальный комитет по
 теоретической и прикладной механике)*

³ Мелуа А. И. Энергетики России: Энциклопедия. — М.-СПб.: Гуманистика, 2001. 432 с. (Изд. 3, доп.: Энергетики России и СНГ: Энциклопедия / Сост. А. И. Мелуа, А. Г. Грек. СПб.: Гуманистика, 2005. — 1088 с.; Изд. 4, доп. 2 т. СПб.: Гуманистика, 2007. — 476 + 460 с.).

Новости гидроэнергетики и гидротехники

Богучанская ГЭС

В марте 2012 г. на строительной площадке Богучанской ГЭС продолжались работы по подготовке к началу заполнения водохранилища и прохождению половодья и паводка.

По состоянию на 22 марта 2012 г. было уложено 3583 м³ бетона, смонтировано 866,7 т металлоконструкций и гидромеханического оборудования. Монтаж вентилируемых фасадов выполнен на площади 1200 м², утепление стен и потолка галерей инженерных коммуникаций здания ГЭС – 1330 м². В здании ГЭС, служебно-производственном корпусе и других объектах смонтировано более 850 м воздухопроводов, в машинном зале уложено 150 м² мраморных полов. Продолжается подготовка к летнему строительному сезону: переработано 18440 м³ песчано-гравийной смеси, предназначенной для последующей отсыпки в каменнонабросную плотину; заготовлено более 5700 м³ песка и гравия разных фракций.

На монтаже гидроагрегатов центр работ переместился на ГА № 3 – 6. На ГА № 3 смонтированы воздухоразделительные щиты, выполнялись вспомогательные работы на рабочем колесе, верхнем лабиринте и валу турбины. Смонтированы часть шкафов для измерительных приборов, щит термометров, освещение и электропроводка в шахте турбины, дренажные насосы и т.д. На ГА № 4 смонтированы верхняя крестовина с перекрытием, верхний и нижний воздухоразделительные щиты. ГА № 5 после проверки формы и зачистки сердечника статора передан подрядной организации для покраски сердечника. На ГА № 6 продолжается монтаж корпуса статора. Степень готовности агрегатов на 1 марта составляла: ГА № 4 – 66 %, ГА № 5 – 26 %, ГА № 6 – 19 %.

В здании ГЭС продолжался монтаж 13 систем вспомогательного оборудования, в том числе магистральных трубопроводов, компрессорной высокого и низкого давления и насосной № 9.

В среднем в течение суток на работу выходило свыше 3300 работников ОАО “Богучанская ГЭС”, ЗАО “Организатор строительства” и подрядных организаций.

Волжская ГЭС

Продолжается модернизация Волжской ГЭС, включающая замену гидротурбин и реконструкцию электротехнического оборудования. В марте 2012 г.

на ГА № 12 велась сборка направляющего аппарата и сервомоторов; на ГА № 7 – сборка рабочего колеса турбины и фундаментных частей, замена оборудования на комплекс генераторный элегазовый типа FKG2S, реконструкция ротора по проекту ТГ-1000, замена оборудования собственных нужд и освещения гидрогенератора. На ГА № 2 производилась замена системы управления и защит, на ГА № 7 выполнена замена оборудования на комплекс генераторный элегазовый типа FKG2S.

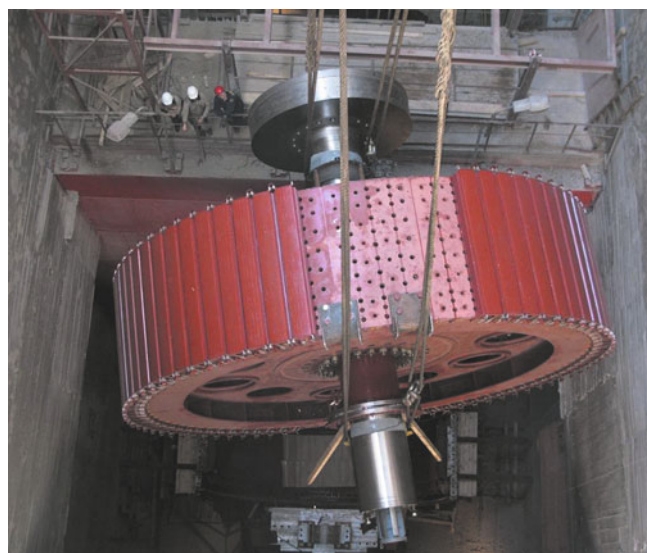
На трансформаторах блоков 1Т, 2Т, 3Т произведена установка системы защиты от взрыва и пожара, ведется подготовка к установке системы защиты от взрыва и пожара на трансформаторах блоков 6Т, 7Т.

Начаты работы по модернизации системы группового регулирования активной мощности, системы телеизмерений и телесигнализации, системы мониторинга оборудования связи.

Ведется согласование технического задания на проект комплексной реконструкции Волжской ГЭС.

Саратовская ГЭС

На Саратовской ГЭС продолжается реализация проекта по замене двух горизонтально-капсульных гидроагрегатов (ГКА). На момент создания (1970 г.) горизонтально-капсульные агрегаты Саратовской ГЭС были самыми мощными в мире. Их установленная мощность – 45 МВт. Это были одни из первых в СССР гидроагрегатов такого типа. Они



Саратовская ГЭС – опускание ротора АГ № 23 в шахту

мантировались как опытно-промышленные образцы. В 2005 г. после 35-летней проблемной эксплуатации оба агрегата были остановлены и выведены в реконструкцию. Реализация проекта реконструкции ГКА относится к разряду наиболее масштабных и приоритетных направлений программы комплексной модернизации Саратовской ГЭС. Поставка гидроагрегатов осуществляется в соответствии с договором с ОАО “Силовые машины”. Новые машины мощнее предыдущих аналогов на 20 %. Они имеют принципиально новую конструкцию рабочего колеса, что позволит повысить эффективность использования водных ресурсов и снизить воздействие на экологию. Показатели новой турбины: поворотно-лопастная, номинальная мощность 54 МВт. Материалы в узлах трения рабочего колеса и направляющего аппарата с не требующим смазки покрытием. Давление в системе регулирования – 6,3 МПа, тип регулятора частоты вращения – на базе микропроцессорной техники, максимальный КПД – не менее 95 %, срок службы – 40 лет.

Основные узлы гидроагрегатов в соответствии с программой контроля качества в 2010 г. прошли испытания на заводе, а сейчас доставлены на гидростанцию. Завершить монтажные работы планируется в 2012 г. Ввод ГКА № 23 намечен на июнь, ГКА № 22 планируется к концу года.

В данный момент на ГКА № 23 ведутся работы по укладке обмотки статора, проведены высоковольтные испытания верхних и нижних стержней уложенной обмотки. После укладки и установки растяжек статора будут проводиться завершающие работы по исправлению формы статора генератора. Ведутся работы по окончательной сборке турбинного подшипника и центровке вала турбины. Выполнены работы по центровке, штифтовке и обтяжке внутреннего кольца направляющего аппарата и опорного конуса. Ведутся работы по монтажу трубопроводов системы регулирования гидроагрегата и технологических систем секции № 23.

На ГКА № 22 к концу февраля закончена контрольная сборка направляющего аппарата, произведены центровка и обтяжка верхней половины статора генератора относительно нижней, ведутся работы по бетонированию закладных плит камеры рабочего колеса.

В секции № 23, где расположены оба капсульных агрегата, ведутся работы по устранению фильтрационных проявлений, выравниванию поверхностей проточного тракта. В связи с пониженной температурой производятся только подготовительные работы: срубка наплывов, разделка каверн и борозд. Заканчивается монтаж систем пожаротушения, водопровода, вентиляции, системы сжатого воздуха низкого давления 0,8 МПа, системы дренажа.

Процесс монтажа ГКА, который производит ОАО “Турборемонт- ВКК”, идет сложно. Сказывается недостаток опыта в монтаже подобных гидроагрегатов, а также существует проблема производства и сборки нетипового оборудования ГКА в заводских условиях. Подобные осложнения способствуют задержке по срокам ввода гидроагрегатов в эксплуатацию.

Реализация проекта по замене горизонтально-капсульных гидроагрегатов “под ключ” на Саратовской ГЭС решит ряд важных задач. Замена генерирующего оборудования секции позволит увеличить мощность гидроагрегатов (суммарно на 18 МВт). Кроме того, реконструкция горизонтально-капсульных агрегатов на Саратовской ГЭС в результате установки экологически чистой турбины исключит риск выбросов масла в воду.

Гоцатлинская ГЭС

Продолжается строительство Гоцатлинской ГЭС на р. Аварское Койсу в Дагестане. В 2011 г. были отсыпаны в проектной контуре верховая перемычка до отм. 629,0 м, низовая призма до отм. 628,0 м, первый ярус плотины до отм. 610,0 м. Завершены устройство цементационной штольни правого берега ЦП-1, проходка цементационной штольни левого берега ЦЛ-1, проходка и обделка дренажной штольни правого берега ДП-1, проходка дренажной штольни левого берега ДЛ-1.

На эксплуатационном водосбросе выполнены проходка и обделка верхнего уступа. На здании ГЭС произведен монтаж колен отсасывающих труб гидроагрегатов № 1 и 2. Бетонные работы по внутреннему массиву здания ГЭС выполнены до третьего яруса.

В 2012 г. планируется продолжить отсыпку плотины, работы по водоприемнику и эксплуатационному водосбросу, смонтировать спиральные камеры гидроагрегатов и начать монтаж механизмов турбин. Необходимо окончательно определить конструкцию противофильтрационного элемента плотины, а именно асфальтобетонная диафрагма или глиноцементобетонная диафрагма из буросекущихся свай, и приступить к ее устройству.

Саяно-Шушенская ГЭС

15 марта 2012 г. на Саяно-Шушенской ГЭС состоялась церемония пуска ГА № 7. Это уже второй полностью новый гидроагрегат, введенный в эксплуатацию (ГА № 1 пущен в декабре 2011 г.). Новые гидроагрегаты, изготовленные концерном “Силовые машины”, имеют ряд отличий: оптимизирована форма рабочего колеса, вместо индивидуального привода каждой лопатки направляющего аппарата выполнен общий привод через регули-

рующее кольцо, в отсасывающей трубе смонтированы стабилизирующие ребра, гидроагрегат оснащен мощной системой мониторинга. В течение 2012 г. на Саяно-Шушенской ГЭС планируется ввести еще два новых гидроагрегата, а также развернуть работы по реконструкции ОРУ-500 кВ с заменой его на КРУЭ.

Ленинградская ГАЭС

Проектная документация строительства Ленинградской ГАЭС получила положительное заключение ФАУ «Главгосэкспертиза России» 3 февраля 2012 г. Ленинградская ГАЭС должна стать крупным источником маневренной мощности общесистемного назначения и предназначена для покрытия дефицитов электроэнергии, возникающих в ОЭС Северо-Запада в пиковые и полупиковые периоды ее потребления. Проект Ленинградской ГАЭС, разработанный ОАО «Ленгидропроект», содержит ряд инновационных решений. Здание ГАЭС располагается в котловане с объединенными шахтами в основании, что позволит снизить стоимость и сроки строительства. Разработана новая конструкция железобетонных засыпных водоводов с возможностью осмотра межсекционных швов и компенсаторов. Особое внимание уделено мероприятиям по охране окружающей среды, в числе которых предусматривается создание системы локального комплексного социально-экологического мониторинга зоны влияния Ленинградской ГАЭС. В настоящее время ведутся работы по реализации подготовительного этапа строительства 1-й очереди, однако перспективы и сроки реализации проекта Ленинградской ГАЭС зависят от решений государственных органов.

Усть-Среднеканская ГЭС

Институт «Ленгидропроект» продолжает разработку рабочей документации по пусковому комплексу, включающему ввод ГА № 1 и 2 с временными рабочими колесами. Пуск агрегатов намечен на 4-й квартал 2012 г. Для пуска ГА № 1 и 2 на пониженных напорах (пусковая отм. 255,20) необходимо возвести сооружения напорного фронта до отм. 260,00. В сооружения напорного фронта входят: глухая бетонная плотина в примыкании к правому берегу, станционная плотина, водосбросная плотина, сопрягающий устой, временная земляная плотина с суглинистым ядром. В последующем временная плотина войдет в объем постоянной земляной плотины. Кроме этого в состав пускового комплекса входят: здание ГЭС в объеме пускового комплекса, блок 1 и 2 производственно-технологического корпуса (ПТК), КРУЭ-220 кВ и централь-

ный пульт управления (ЦПУ), расположенные в первом блоке.

Загорская ГАЭС-2

На строительстве Загорской ГАЭС-2 продолжают работы по бетонированию напорной грани и монтажной площадки. В ближайшее время начнется монтаж сороудерживающих решеток и аварийно-ремонтного затвора. На монтажной площадке ведется сборка двух статоров для ГА № 1 и 2 и ротора гидроагрегатов. Успешно проведены испытания мостовых кранов машинного зала. Статические и динамические испытания кранов произведены с использованием гидронагружателя с последующей настройкой ограничителя грузоподъемности (ОГП) основного подъема. Для проведения первого и последующих плановых освидетельствований в фундаментной плите монтажной площадки смонтировано специальное устройство – грузовой анкер с возможностью установки гидронагружателя с маслonaпорной установкой. Это оборудование при проведении испытаний позволяет создавать заданное усилие на грузоподъемный механизм крана. В ближайшее время, после оформления регистрации и получения разрешения в надзорных органах (Ростехнадзор) на применение, краны будут задействованы в работе. В марте запланировано начало укрупнительной сборки механизмов турбины.

Помимо станционного узла, работы ведутся еще на пяти участках: напорных водоводах, водоприемнике, в нижнем и верхнем бассейнах, а также на КРУЭ-500 кВ. В марте 2012 г. планируется уложить 15 746 м³ монолитного железобетона, осуществить выемку 500 тыс. м³ грунта в нижнем бассейне и насыпь 640 тыс. м³ грунта в дамбу верхнего бассейна.

ОАО «Ленгидропроект»

Институт «Ленгидропроект» ведет работы по целому ряду проектов, в частности осуществляется рабочее проектирование Усть-Среднеканской, Нижнебурейской ГЭС, продолжают работы над крупными проектами – Канкунской ГЭС и Ленинградской ГАЭС.

Ведутся работы по актуализации проекта Зарамагской ГЭС-1. Необходимость этого обусловлена крайне затянувшимися сроками строительства, за время которого произошли значительные изменения в нормативно-правовой базе. Актуализированный проект направлен на рассмотрение Главгосэкспертизы. В данный момент устраняются ее замечания.

По проектной документации Канкунской ГЭС в конце февраля 2012 г. в г. Алдане были проведены общественные слушания. Получено положительное решение. 22 марта 2012 г. прошел научно-тех-

нический совет ОАО “РусГидро” по проектной документации пятого этапа. В апреле планируется передача документации в ФАУ “Главгосэкспертиза России”.

Продолжается разработка комплексного проекта реконструкции Волго-Балтийского водного пути. Данный проект в соответствии с техническим заданием разбит на 10 этапов. На данный момент получено положительное заключение Главгосэкспертизы по двум этапам: реконструкции участка устье р. Вытегра (892 – 893,5 км) и реконструкции Ковжской плотины. Основными задачами проекта является повышение надежности и безопасности существующих гидротехнических сооружений, замена устаревшего механического и электротехнического

оборудования на новое, а также строительство ряда сооружений, повышающих надёжность и безопасность эксплуатации. Одним из таких сооружений является заградительное устройство в верхнем бьефе шлюза № 6 Вытегорского района гидротехнических сооружений и судоходства - откатные ворота. Помимо этого данным проектом предусмотрены модернизация средств навигационной обстановки, реконструкция бассейновой речной информационной службы, а также устройство комплекса системы централизованного управления движением судов.

Материалы подготовлены пресс-службой ОАО “РусГидро”: И. Слива, Г. Шацкая, И. Егорова, А. Бутусова, С. Дроздова, В. Крайчук.

Сдано в набор 27.03.2012. Подписано в печать 12.04.2012. Формат 60×84 1/8.

Печать офсетная. Печ. л. 8,0. Цена свободная

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

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

Отпечатано в типографии издательства “Фолиум”

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.

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 _____