



# 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.

№ 5

май

2011

## Содержание

### Проектирование, строительство, эксплуатация

Шуйфер М. И., Аргал Э. С. Создание плотины Камбаратинской ГЭС-2 крупномасштабным взрывом: некоторые результаты наблюдений . . . . . 2

Сметанин В. И., Согин А. В. Очистка и строительство водоемов с помощью средств гидромеханизации . . . . . 12

Анисимов А. Д., Березин В. К., Кириллов Ю. И., Сааков Г. А., Чаев Н. П., Шишов Г. А. Через повышение качества и надежности электрооборудования — к энергосбережению . . . . . 16

Радченко В. Г., Радченко С. В. Ремонт плотин из грунтовых материалов в случае нарушения фильтрационной прочности . . . . . 20

### Безопасность гидротехнических сооружений

Калустян Э. С. Безопасность плотин на примере диагностики основания строящейся Богучанской ГЭС. . . . . 27

Щедрин В. Н., Косиченко Ю. М. О проблемах безопасности гидротехнических сооружений мелиоративного назначения . . . . . 33

Поздравление Гевирцу Г. Я. . . . . 39

### Дискуссии

Клюкач А. А. К вопросу об оценке вибрационного состояния гидроагрегатов ГЭС . . . . . 40

Сидоров Н. П. Численные гидродинамические модели на высотных растрах географических информационных систем . . . . . 45

Беликов В. В. Рецензия на статью “Численные гидродинамические модели на высотных растрах ГИС” . . . . . 54

Сидоров Н. П. Ответ на рецензию . . . . . 55

Беликов В. В. Рецензия на статью “Численные гидродинамические модели на высотных растрах ГИС”, опубликованную в журнале. . . . . 57

### За рубежом

Финк А. К. Гидроэнергокомплекс Тери на р. Бхагирати в Индии . . . . . 58

Каганов Г. М. Новые словари по водному хозяйству (3 стр. обл)

На обложке – Рыбинский шлюз

## Создание плотины Камбаратинской ГЭС-2 крупномасштабным взрывом: некоторые результаты наблюдений

Шуйфер М. И., зам. директора проектной мастерской,  
Аргал Э. С., зам. главного инженера, доктор техн. наук (Гидроспецпроект)

Анализируются результаты комплексных аппаратурных наблюдений при крупномасштабном взрыве по сооружению плотины Камбаратинской ГЭС-2 на р. Нарын в Республике Киргизия. Целью выполненных наблюдений являлись: определение фактических параметров сейсмического процесса, оценка воздействия ударных воздушных и акустических волн, изучение кинематики формируемой взрывом поверхности его очаговой области в массиве разрушаемых пород.

**Ключевые слова:** крупномасштабный взрыв, сейсмическое воздействие, акустические волны, формирование навала.

Для решения практических задач инженерного обеспечения безопасности крупномасштабного взрыва (КМВ) в качестве первоочередных объектов наблюдений, которые осуществлялись институтами “Гидроспецпроект” и Сейсмологии НАН (КР) в рамках Соглашения по консорциуму, организующему научное сопровождение КМВ, были приняты охраняемые капитальные сооружения, ответственные за эксплуатационную надёжность ГЭС, расположенные наиболее близко к участку производства КМВ, а также относительно малоустойчивые объекты жизнеобеспечения местного населения. Для наблюдений были выбраны представительные участки и точки, характеризующие воздействие на охраняемые объекты, подготовлены и привязаны площадки установки измерительных станций и реперные точки наблюдения за движением дневной поверхности над зарядами КМВ.

**Инженерно-геологические условия.** В пределах изучаемой территории долина р. Нарын выходит из относительно узкого ущелья в обширные пространства Кетмень-Тюбинской впадины. Борты в ущельной части створа имеют крутизну 30 – 35° на правом берегу и 40 – 45° — на левом. Ширина долины по гребню плотины — около 250 м. Борты сложены метаморфизованными песчаниками, алевролитами ордовика, которые перекрыты четвертичными отложениями (аллювиальный галечник, в местах накопления — щебёнистый материал пролювия-делювия). На выходе из ущелья в Кетмень-Тюбинскую впадину геологический разрез ордовика прерывается тектоническим надвигом амплитудой 1 – 2 км, за которым залегают породы неогена (N2) и четвертичные образования (Q). В районе створа плотины и по участку сейсмических исследований на правом берегу долину р. Нарын пересекает разлом II порядка Южный, мощность зоны влияния которого достигает 100 м. По левому

берегу трассируется также разлом III порядка с зоной влияния 10 – 12 м.

Проектом выделены четыре инженерно-геологические зоны. Зона 0 мощностью до 3 м — элювированные породы, распространенные фрагментарно узкими полосами вдоль хребтов. Характеристики остальных зон и принятые в проекте значения некоторых показателей свойств скальных пород представлены в табл. 1.

В отношении трещиноватости массив пород определяется как мелкоблочный с преобладающим размером отдельностей до 0,1 м (90 % от общего объема).

Непосредственно выделяемыми проектом объектами рисков принимались: потенциально-неустойчивый массив на припортальном склоне входного участка водоводов – водоприёмника, участок пересечения водоводов Южным разломом и основание здания ГЭС, расположенного за упомянутым надвигом и на его пересечении в галечниковых грунтах. Расчётная интенсивность сейсмического воздействия принята в проекте 9-балльной по шкале MSK.

**Организация и методика производства наблюдений.** Для производства КМВ в специально пройденных в скальном массиве выработках-штольнях были размещены заряды ВМ — гранулита РП в количестве 700 т для 1-го взрыва и 2160 т для 2-го (основного) взрыва. Схема расположения выработок с зарядами и пунктов наблюдений (ПН) с сейсмостанциями (СС) приведена на рис. 1. Расстояния между зарядами и сейсмостанциями измерялись как эпицентральные от ближних к пунктам точек каждого заряда: при фланговом расположении от концов зарядов, при фронтальном — по нормали и т.д.

Исследования эффектов от действия сейсмических и ударных воздушных волн осуществляются по результатам измерений с регистрацией быстро-

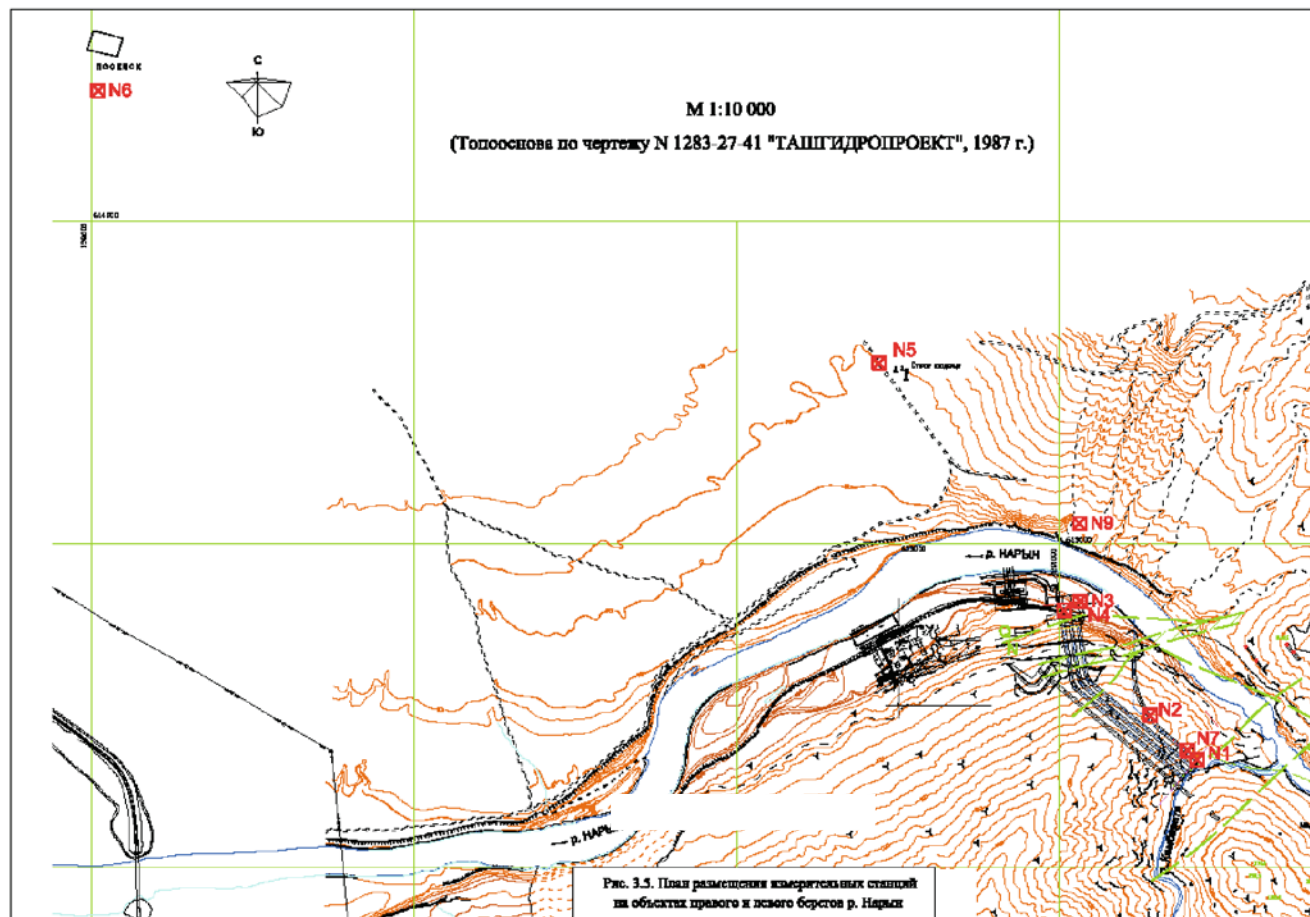


Рис. 1. Схема размещения выработок с зарядами и ПН

протекающих процессов изменений параметров движения и давления на фронте соответствующих волн. Сейсмометрическая регистрация осуществлена зарубежными компьютеризированными комплексами трёхосевых акселерографов CMG-5T (Англия) и велосиграфов "Kinometrics" (Episensor, США), а также отечественной аппаратурой, состоящей из одноосевых сейсмоприемников (акселеро-

метров) ОСП-2М, управляющего блока АЦП и серийного портативного компьютера.

Технические характеристики СС и места расположения ПН приведены в табл. 2.

ПН № 1 – 4 и 7, расположенные на левом берегу р. Нарын, предназначены для наблюдения за колебаниями основных сооружений (СЭВ, здание ГЭС) и поэтому имеют обусловленные ограничения в

Т а б л и ц а 1

Характеристики зон и показатели физико-механических свойств пород

Зона	I	II	III	Неогеновые отложения зоны I
Характеристика зоны	Выветривание	Разгрузка	Неизменённые породы	–
Мощность зоны в русле / в отметках гребня	5/15-20	5/60-65	–	–
Плотность пород, кг/м <sup>3</sup>	2700	2700	2700	2480
Временное сопротивление сжатию / растяжению, МПа	68/9,5	96/11	96/11	20/1,5
Скорость продольных упругих волн, м/с	1400	2100	2600	–
Модуль деформации, МПа	1000 – 1500	2000 – 3000	4000 – 5000	–

диапазоне расстояний до зарядов: 330 – 600 м до нижнего заряда и 430 – 700 м до верхнего (основного) заряда. СС № 9, 6, 5 расположены, как и заряды КМВ, на правом берегу по профилю во фланге зарядов с последовательным удалением от них на 0,64; 1,44 и 4 км.

**Результаты сейсмометрических наблюдений и их анализ.** Материалы обработки информации, полученной при сейсмонаблюдениях, сведены в табл. 3.

Как следует из результатов сейсмонаблюдений, например, в туннеле СЭВ (ПН № 2), первые вступления интенсивных волн в пункт регистрации отмечаются в 11 ч 54 мин 31 с (по регистрации времени СС), что при расстоянии до 1-го заряда на отм. 915 м (с учётом огибания по дну р. Нарын траектории распространения волн) около 400 м и средней скорости продольной волны 3400 м/с даёт время 1-го взрыва 11 ч 54 мин 30,9 с и 2-го — 11 ч 54 мин 32,58 с.

Из табл. 3 следует, что максимальные амплитуды ускорений по радиальной (0,85g и 0,6g) и вертикальной (0,85g и 0,9g) компонентам имеют сопоставимые значения, втрое превышающие значения амплитуд поперечных относительно источника колебаний (вдоль оси СЭВ). Очевидно, наиболее интенсивные воздействия связаны здесь с продольной волной. Видимые (по акселерограммам) частоты колебаний в фазах максимумов варьируют незначительно: для 1-го взрыва — 18 – 25 Гц; для 2-го — 25 – 40 Гц, укладываясь в диапазон частот колебаний порталного участка (СС № 1).

Общая продолжительность процесса в ПН № 2 достигает в среднем 1,0 с после 1-го и 1,7 с после 2-го взрыва, причем в основном за счёт колебаний туннеля. Несмотря на это, сейсмические проявления обоих взрывов разделены по времени. Оценка подтверждает опосредованное влияние 1-го взрыва на уменьшение излучаемой в точку наблюдения сейсмической энергии от основного заряда, вероятно, вследствие её частичного поглощения в разрушаемой первым зарядом среде: значение вектора скорости смещения от основного заряда снижено до 5,5 см/с против 9 см/с при первом взрыве.

В распределении продолжительности колебаний устанавливается определённый тренд: для каждого из взрывов она заметно повышается с увеличением расстояний — от 0,6 – 0,7 с для ПН № 1 до 1,1 с для ПН № 3 (для ПН № 2 возрастает до 1,7 с вследствие реакции туннеля) и ещё более существенно от 1,0 до 9,9 с по правому берегу.

Итоги наблюдений за показателем интенсивности сейсмического воздействия КМВ — скоростью смещения обнаруживают очевидную обусловленность закономерности распределения этого показателя свойствами пород, размером области наблюдений, типом энергоносителя — волн. По сравнению с результатами измерений при опытных взрывах в грунтах правого берега приведённая к масштабу взрыва интенсивность колебаний от КМВ существенно выше, что можно объяснить волноводным усилением колебаний грунтовым слоем, не задействованным мелкомасштабными опытными взрывами. В грунтах основания здания ГЭС локальное

Т а б л и ц а 2

Номер СС	Технические характеристики СС	Место расположения ПН
1	Составлена из трёх сеймоприёмников ОСП-2М, измерительные оси которых ориентированы относительно участка КМВ по компонентам вектора движения	Массивный бетон (на скальном основании) входного портала туннеля строительно-эксплуатационного водосброса (СЭВ)
2	Оснащена CMG-5T с трёхкомпонентным сенсором	Бетон обделки туннеля СЭВ в его середине (ПК 2+00)
3	Акселерометр CMG-5T	Массивный бетон на отм. 888 м основания здания ГЭС на галечнике за Южным разломом
4	Episensor, используемый как велосиметр	Бетонное перекрытие 2-го яруса монтажной площадки (отм. 907 м) здания ГЭС
5	То же, что и СС № 1	Шурф глубиной 1 м грунт — суглинок с валуно-галечником, перед участком старого кладбища
6	То же, что и СС № 1	Ближняя к взрыву окраина пос. Кара-Жигач
7	Акселерометр CMG-5T	Массивная бетонная опора скального откоса с потенциально неустойчивым массивом над СЭВ и турбинным водоводом № 1. Отм. установки 970 м
9	То же, что и СС № 1	Шурф в грунте, условия установки СС аналогичны ПН № 5 и 6, но с максимальным приближением к участку взрыва

увеличение скорости смещения отмечено и при опытных взрывах.

Из сопоставления значений показателя сейсмического воздействия в области излучения  $\bar{V}_r^2$  от массы заряда для ближней зоны действия КМВ в скальных породах получено, что оба оцениваемых взрыва по эффективности выхода сейсмической энергии в 2 – 2,5 раза ниже, чем камуфлетные взрывы тех же масс зарядов. Это даёт основание по рассматриваемому эффекту отнести КМВ к взрывам рыхления.

**Анализ волнового состава колебаний.** Для уточнения типа и кинематических параметров интенсивно действующих при КМВ волн осуществлялись синхронизация записей сейсмических сигналов и построение по профилю сеймопунктов годографов времени вступления начальных фаз участка процесса, на котором определялись максимумы амплитуд колебаний.

На рис. 2 приведены зарегистрированные в НП № 9 акселерограммы и на 4-м канале (внизу) — минутная метка GPS, имеющая вид прямоугольного импульса. Такая метка, записанная в каждом файле,

Т а б л и ц а 3

Номер СС	Расстояния, м		Ускорения $\alpha$ , g		Периоды $T_{p, s}$ , с		Скорость $V_{p, s}$ , см/с		Вектор скорости $V_{p, s}$ , см/с		Скорость $V_r$ , см/с		Приведённая масса заряда $\rho$ , кг <sup>1/3</sup> /м		Интенсивность $J$ , баллы			
	Номер взрыва																	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
1	330	430	X 0,7	0,9	0,06	0,06	6,4	8,1	7,2	9,4	3,8	5,35						
			Y 0,24	0,42	0,04	0,04	1,5	2,6			-	-	0,27	0,3	7	7		
			Z 0,79	1,1	0,024	0,024	2,9	4,1					6,4	5,2				
2	370	490	X 0,85	0,57	0,055	0,04	7,2	3,6	9,1	5,4								
			Y 0,28	0,3	0,045	0,03	2,0	1,4					-	-	0,24	0,26	7	6
			Z 0,84	0,89	0,04	0,025	5,25	3,75										
3	520	650	X 0,28	0,36	0,015	0,015	0,57	0,9	4,0	6,2	5,1	4,25						
			Y 0,14	0,2	0,04	0,04	0,87	1,25					5,3	6,6	0,17	0,2	6 – 7	7
			Z 0,82	1,05	0,03	0,035	3,8	5,95					7,9	3,1				
4	575	698			0,04	0,04	1,1	1,2	3,2	3,5								
			-	-	0,02	0,03	1,0	1,3					-	-	0,15	0,185	-	-
					0,04	0,05	2,8	3,0										
5	1420	1520	X 0,2	0,24	0,06	0,06	1,9	2,25	2,8	3,2	2,4	3,4	0,062	0,085	5 – 6	6		
			Z 0,21	0,25	0,06	0,06	2,0	2,3					1,9	2,3				
6	3950	4065	X 0,02	0,04	0,099	0,12	0,35	0,71	0,71	1,22	-	1,15						
			Y 0,02	0,03	0,088	0,16	0,26	0,69					-	2,1	0,022	0,032	3	4 – 5
			Z 0,04	0,04	0,088	0,11	0,56	0,72					-	2,2				
7	355	450	X 0,88	0,65	0,045	0,045	6,2	4,6	10,8	8,1	10,5	5,0						
			Y 0,65	0,6	0,045	0,068	4,6	6,4					5,6	5,3	0,25	0,29	7	6
			Z 0,72	0,85	0,068	0,03	7,6	4,5					6,8	6,1				
9	641	743	X 0,237	0,36	0,06	0,077	2,1	4,4	4,75	8,0	3,2	4,8						
			Y 0,13	0,24	0,06	0,06	1,2	2,6					1,0	1,7	0,14	0,17	6	6
			Z 0,34	0,61	0,077	0,065	4,1	6,2					4,6	4,6				

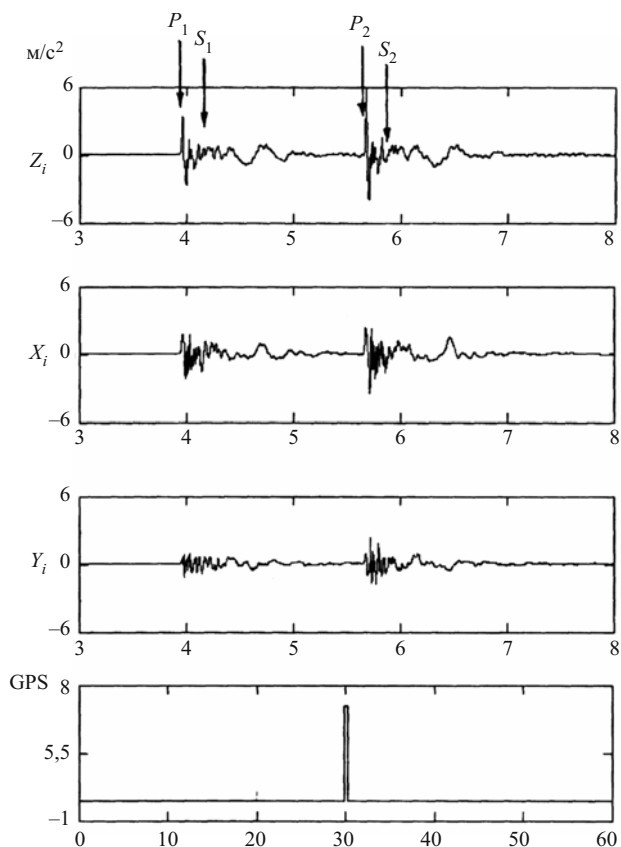


Рис. 2. СС № 9, правый берег. Акселерограммы и минутная метка GPS

позволяет с точностью до 1 мс определить время прихода сейсмозрывной волны. Стрелками отмечены времена вступления нескольких фаз сейсмозрывных волн:  $P_1$  — вступление продольной волны от 1-го взрыва,  $P_2$  — от 2-го взрыва,  $S$  — вторая фаза, привязанная к моменту прихода низкочастотных цугов волны. Определённые таким образом времена вступления всех фаз занесены в табл. 4.

Скорости распространения  $P$  и  $S$  фаз для волны от 1-го и 2-го зарядов приведены в табл. 5. Можно

Т а б л и ц а 4

Номер СС	Фаза волны	Эпицентральное расстояние до заряда, м	Время вступления по сейсмограмме, с
9	$P_1$	660	3,931
	$S_1$		4,146
	$P_2$	740	5,648
	$S_2$		5,868
6	$P_1$	3970	16,313
	$S_1$		17,782
	$P_2$	4060	18,165
	$S_2$		19,573

считать, что взрывы обоих зарядов дали практически одинаковые скорости распространения фаз.

Очевидно, что вдоль правого берега Нарына до эпицентральных расстояний менее 4 км сейсмозрывные волны распространялись в слоях выше гранит-базальтового комплекса земной коры в покровных аллювиальных и пролювиальных отложениях четвертичного возраста.

Экстраполяция годографов позволила определить интервал времени между детонацией 1-го и 2-го зарядов, который равен 1,67 с и практически совпадает со временем, определяемым по электромагнитному излучению взрывов, — 1,675 с. Эта оценка близка к интервалу замедления второго взрыва — 1,6 с, который был реализован взрывниками.

На рис. 3 приведена сейсмогеологическая модель разреза по профилю наблюдений правого берега.

**Анализ макросейсмических характеристик воздействия.** Наблюдения за видимыми последствиями сейсмического воздействия КМВ осуществлялись как непосредственно после взрыва, так и через период времени, достаточный для проявления возможных скрытых деформаций объектов наблюдения.

На доступных для обследования конструкциях в районе установки СС № 1 и № 2 — во входном припортомальном участке СЭВ, на участках обделки, в железобетонных балках перекрытий, опорах, стыках рамных конструкций, в плитах рисбермы здания ГЭС — до и после взрыва дефектов не отмечено, что согласуется с измеренным уровнем воздействия (6 – 7 баллов).

На левом берегу претерпели изменения некоторые участки скального борта, в том числе ранее выделенные как потенциально неустойчивые: над туннелями СЭВ и водовода № 3 произошло обрушение пород части потенциально неустойчивого массива высотой 3 – 5 м на бетонную опору в месте установки СС № 7. Причиной обрушения, очевидно, являются колебания от КМВ (от 1-го заряда) при скорости смещения по горизонтальной составляющей 11 см/с, чему соответствует 7-балльное воздействие. Подобное обрушение наблюдалось также на правом (по течению) откосе подводящего к водоводам канала.

Т а б л и ц а 5

Фаза	Скорость распространения, км/с, для волны заряда	
	первого	второго
$P$	3,434	3,021
$S$	1,492	1,452

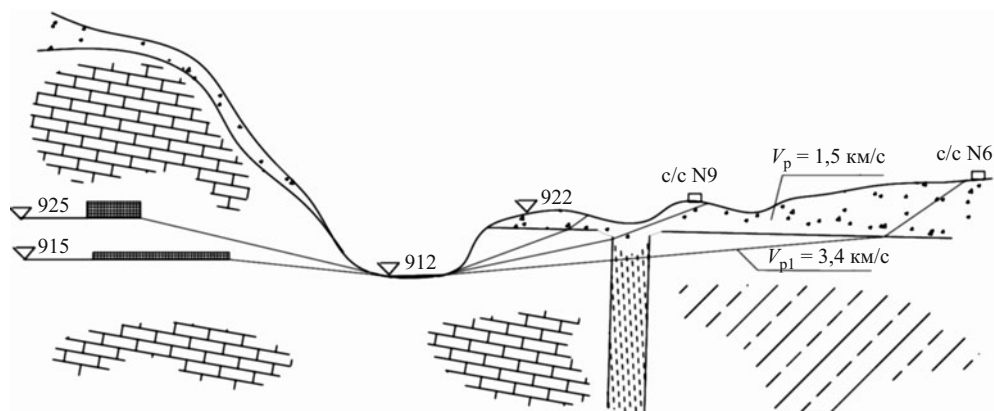


Рис. 3. Сейсмогеологическая модель разреза по профилю наблюдений правого берега

На расстояниях от портала СЭВ приблизительно 100, 75 и 50 м отмечены клинообразные осыпи (по стенке трещины в виде зеркала скольжения) с последовательным уменьшением объёма в сторону СЭВ. Горизонтальная скорость смещения оценивается от 10 до 12 см/с. При скоростях менее 10 см/с (6,5 баллов) устойчивость данного откоса не нарушается.

По видеосъёмке отмечены также локальные обрушения на береговых откосах правого и левого берегов р. Нарын, предположительно в рыхлых грунтах четвертичных отложений.

На правом берегу наблюдения до и после взрыва осуществлены за отдельными сооружениями охраняемого комплекса: мазаром старого кладбища, ближним к СС № 5 (приблизительно в 20 м), и кирпичным жилым зданием пос. Кара-Жигач возле пункта наблюдений № 6. Обследование показало отсутствие изменений в состоянии объектов через 54 дня после КМВ. По макросейсмическим оценкам эффективная интенсивность колебаний здесь может быть принята равной 5 баллам по MSK-64.

В стенах жилых кирпичных зданий села, расположенных вблизи ПН № 6, изменений состояния также не отмечено. В одно- и двухэтажных глинобитных и кирпичных зданиях села и чабанского хоздвора, обследовавшихся специалистами строительного университета (КГУСТА, г. Бишкек), реакции установленных на стенах маяков на КМВ ни в одном случае не обнаружено, несмотря на то что расчётная скорость может достигать здесь 8 см/с, что соответствует 7-балльному воздействию.

Подобные наблюдения за маяками на административных и хозяйственных объектах ГЭС на левом берегу в пределах 1,0 – 1,1 км до зарядов подтвердили их сохранность после взрыва, что согласуется с расчётным определением интенсивности колебаний в основании объектов 6 баллов.

**Акустическое действие взрыва.** Воздушная ударная волна, сопровождающая детонацию ВМ, характеризуется резким скачком давления на фрон-

те волны и скоростью распространения, превышающей скорость звука в атмосфере. По мере распространении волны амплитуда изменения её давления (АД) уменьшается и, когда оно становится много меньше атмосферного давления, скорость его распространения уменьшается до скорости звука, т.е. волна становится акустической. Негативное воздействие сильной ударной волны проявляется в её разрушающем действии при падении на преграду.

Исследования акустического эффекта КМВ осуществлялись путём регистрации (выполненной специалистами Института динамики геосфер РАН) воздушной волны с помощью акустического канала, оснащённого измерительным микрофоном конденсаторного типа серии 4170 фирмы “Bruel&Kjaer”. Сигнал с микрофона поступал на поляризационный усилитель аналогового сигнала, а затем на 14-разрядный АЦП типа Е-440 и записывался на винчестер ноутбука. Акустический канал со специальным калибровочным генератором акустического давления фирмы “Bruel&Kjaer” был размещен на СС № 5. На СС № 1 измерительный микрофон был заменён на датчик давления фирмы “Honeywell”, тип 24PCDFA6A, в канале регистрации использовался тензоусилитель.

Исходная регистриграмма воздушной волны и акселерограмма вертикальных колебаний, полученная в ПН № 1, показана на рис. 4. Сейсмопункт находился на расстоянии 330 м от заряда 1-го ряда и 430 м от заряда 2-го ряда. Для сопоставления вверху приведена акселерограмма. Из рисунка видно, что возмущения акустического давления начинаются в момент времени, совпадающий с приходом сейсмической волны от взрыва заряда 1-го ряда: датчик давления регистрирует воздушную волну, которую излучают вертикальные сейсмические колебания грунта (основания). Первая воздушная волна приходит через 1 с после сейсмической, её амплитуда 739 Па, фаза сжатия около 0,8 с. Эта волна акустическая, потому что у неё нет ударного фронта и её давление в 100 раз меньше атмосфер-

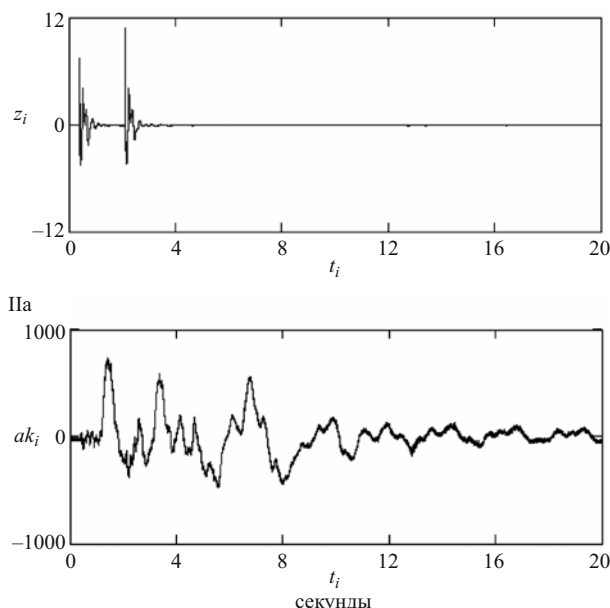


Рис. 4. СС № 1, акселерограмма вертикальных колебаний (вверху) и регистраграмма воздушных волн

ного. Сопоставление регистраграммы воздушной волны с видеозаписью взрыва показывает, что излучение этой волны по времени совпадает с подъёмом купола от заряда 1-го ряда. Поднимающийся купол представлял собой полусферу с радиусом 90 м.

Рассчитав скорости движения точек купола и поток энергии акустической волны, излучаемой движущимся куполом, при плотности воздуха  $1,29 \text{ кг/м}^3$ , скорости звука  $340 \text{ м/с}$  и скорости подъёма центра купола  $32,5 \text{ м/с}$  получим для СС № 1 на эпицентральной расстоянии  $360 \text{ м}$  амплитуду акустической волны  $1025 \text{ Па}$ . Поскольку по порядку величины она близка к зарегистрированной амплитуде  $739 \text{ Па}$ , можно считать установленным, что именно вертикальные движения грунта при подъёме купола от заряда 1-го ряда излучают 1-ю акустическую волну. 2-я акустическая волна с амплитудой

$587 \text{ Па}$  зарегистрирована через  $2 \text{ с}$  после 1-й. Видеофильм показал, что этому моменту времени соответствует начало подъёма купола от заряда 2-го ряда.

Через  $3 \text{ с}$  после 1-й акустической волны происходит прорыв первого купола струями продуктов детонации (ПД), на регистраграмме воздушной волны им соответствуют три пика давления в интервале времени от  $4$  до  $5,5 \text{ с}$ . Ещё через  $2 \text{ с}$  происходит прорыв второго купола, на регистраграмме воздушной волны (от  $6$  до  $8 \text{ с}$ ) ему соответствует рост акустического давления. Низкочастотный спектр волны и отсутствие ударных волновых фронтов на регистраграмме показывают, что при этом массовом взрыве не было “выстрела” ПД через зарядную штольню и что энергия ПД была поглощена в разрушенном массиве пород до уровня ниже необходимого для формирования ударной воздушной волны при “прорыве” купола.

Результаты регистрации воздушных волн, ударивших по гидротехническим сооружениям и зданию ГЭС, показали, что их АД не превышают  $800 \text{ Па}$ . Так как волна является акустической, то при её отражении от преград давление не увеличится свыше  $1600 \text{ Па}$ . Такие нагрузки не представляют опасности для строительных конструкций.

Негативное воздействие воздушных волн обычно оценивается по их АД или уровню давления. В табл. 6 приводится оценка результатов воздействия давления воздушной волны на объекты наблюдения и акустической опасности для них.

**Видеонаблюдения за движением дневной поверхности над зарядами КМВ.** Наблюдения осуществлялись видеокамерами “SONY” HDR-XR 500 E (видеоматериал получен от ГИПа Камбаратинской ГЭС-2 А. Ю. Обополя) и “SONY” HDR-НС3Е с разрешением  $1920 \times 1080$ . Пункты размещения видеокамер располагались в  $800$  и  $2000 \text{ м}$  от участка КМВ. Индикация движения на фотоизображении осуществлялась по участку выхода проектной линии наименьшего сопротивления (ЛНС) на дневную поверхность, устанавливаемому по выставленным на откосе маякам.

Над 1-м зарядом до 6-го кадра, т.е. до  $250 \text{ мс}$  от начала взрыва, движения поверхности в фиксируемом размере не отмечается. После  $0,250 \text{ с}$  и, по крайней мере, до  $0,625 \text{ с}$  происходит последовательное увеличение смещений с преобладанием вертикальной составляющей (табл. 7).

Диаграмма перемещения дневной поверхности в куполе на участке выхода проектной ЛНС 1-го заряда представлена на рис. 5. Из диаграммы и табл. 6 следует, что движение в куполе является двухзнаковым с фазами выпора пород и опускания их в сторону массива, что соответствует проявле-

Т а б л и ц а 6

Опасное значение АД, кПа (дБ)	Результат акустического воздействия	
	возможный	фактический
0,5	Разрушение остекления строений	Разрушений не было
33 (184)	Поражение человека	Уровень не превышен
15 (157)	Поражение органов слуха	То же
63 (130)	Болевой порог ощущения звука в диапазоне частот $30 \text{ Гц} — 10 \text{ кГц}$	То же



ниям волны сжатия–разгрузки, распространяющейся к поверхности от заряда № 1.

Волна сжатия, формирующая купол, входит в массив из выработки 1-го заряда с начальным давлением, оцениваемым (при плотности ВМ и пород во взрываемом массиве соответственно 800 и 2600 кг/м<sup>3</sup>, скорости детонации используемого ВМ и продольной волны соответственно 3500 и 3400 м/с) приблизительно в  $5 \cdot 10^9$  Па. Принимая показатель затухания волны сжатия равным 1,5 и учитывая удвоение на поверхности скорости смещения, соответственно корректируя измеренную скорость до среднего значения 3,9 м/с, получаем практическое совпадение расчётных (4 м/с) и наблюдаемых скоростей, что подтверждает достоверность данных видеонаблюдений.

На кадрах видеосъёмки на правом берегу с расстояния около 800 м от участка КМВ видно, что с начала взрыва (рис. 6, а) до массового прорыва продуктов взрыва (рис. 6, б) — через 4,3 с от взрыва № 1 (2,6 с от взрыва основного заряда) и далее до затухания событий породная масса над зарядом № 1 продолжает налегать на объём пород, разрушаемых основным зарядом. Частичное оползание пород в русло отмечается с 3-й с после 1-го взрыва (через 1,3 с от детонации основного заряда). Один из этапов такого оползания (через 5,4 с от начала КМВ) демонстрируется на рис. 6, в и отслеживается в течение всего периода съёмки до финальной стадии последствия КМВ (12 с и далее). Отмеченное явление, очевидно, обусловлено и сдвигом массы совместным действием взрывов, и обрушением (осыпанием) разрушенных пород вследствие потери устойчивости.

По видеосъёмке устанавливается завершение процесса формирования воронки разрушения от 1-го взрыва: граница скола в массиве контрастно выделяется выходом по ней продуктов взрыва на 2-й с от начала КМВ.

Оценка потенциальной энергии взрыва, использованной в данном случае для разрушения и движения пород, может быть осуществлена по значению эффективной удельной энергии применённого ВМ, которое округлённо равно  $2,3 \cdot 10^6$  Дж/кг, что заметно ниже энергии эталонного ВМ. Приходится заключить, что при прочих равных условиях эффект от КМВ, оцениваемый, например, по тротиловому эквиваленту, должен ожидаться пониженным. Возможно, это обстоятельство, наряду с другими неблагоприятно действующими факторами (завышение ЛНС 1-го заряда, проявление ослаблений в массиве перегруженного 2-го заряда и т.д.), сказалось на уменьшении объёма обрушенных в русло пород, но одновременно исключило ударную воздушную волну, уменьшило разброс камней и т.д.

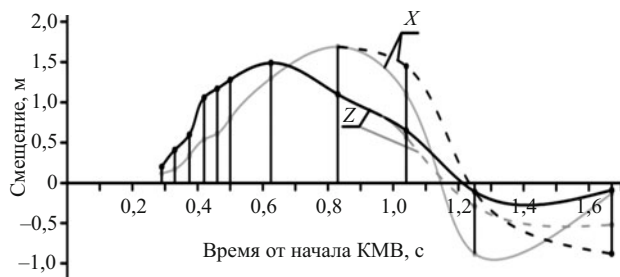


Рис. 5. Диаграмма смещения поверхности участка КМВ в куполе под зарядом № 1

вследствие пригрузки взрыва основного заряда массой пород над первым взрывом.

Взрыв основного заряда, как следует из рис. 6, инициирован в конце фазы разгрузки волны сжатия при возвратном движении породной массы (в сторону от русла р. Нарын) над 1-м зарядом, что обусловило её налегание на разрушаемый 2-м взрывом массив. Первые смещения поверхности в районе выхода проектной ЛНС отмечаются приблизительно через 1,15 с после начала этого взрыва. Более

Т а б л и ц а 7

Номер кадра / время, с	Смещение, м		Отношение смещений по составляющей вектора	Вектор смещения, м	Скорость смещения по объёмному вектору, м/с	Кажущийся угол наклона вектора смещения к горизонтали, град
	вертикальное	горизонтальное в сторону русла				
6 / 0,25	0	0	0	0	-	-
7 / 0,29	0,2	0,12	1,72	0,26	6,2	60
8 / 0,33	0,41	0,17	2,5	0,48	5,8	68
9 / 0,375	0,6	0,34	1,79	0,77	6,2	61
10 / 0,42	1,06	0,54	1,96	1,3	7,8	63
11 / 0,46	1,11	0,61	1,9	1,45	7	62
12 / 0,5	1,28	0,8	1,55	1,7	6,8	57
15 / 0,625	1,49	1,3	1,15	2,37	6,3	49
20 / 0,83	1,1	1,69	0,68	2,63	12,6	34
	0,65	1,1	0,59	1,69	8	31
25 / 1,04	0,97	1,45	0,39	2,1	10	21
	-0,11	-0,88	0,125	1,66	8	-7
30 / 1,25	-0,29	-0,11	2,6	0,33	1,6	-69
	-0,09	-0,13	0,69	0,2	0,48	-35
40 / 1,67	0,52	-0,35	1,49	0,7	1,68	-56



а)



б)



в)

**Рис. 6.** Участок КМВ, взрыв № 1: а — начальный момент; б — через 2,1 с; в — через 5,4 с (3,7 с от взрыва № 2)

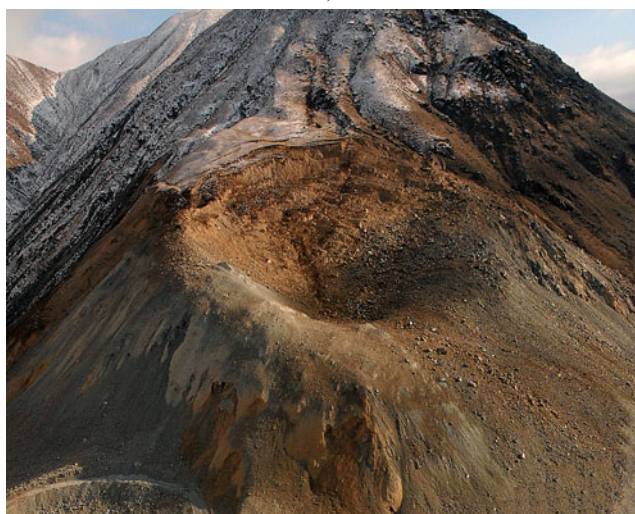
слабые движения прослеживаются в окрестности выделенного участка уже через 0,4 с от этого момента.

К 4 – 5-й с от начала КМВ (3,3 с от детонации основного заряда) оформляется контур воронки разрушения (трассируется линия скола) по боковой поверхности массива КМВ, т.е. во фланге основного заряда. Тогда же начинается массовый прорыв продуктов взрыва (ПВ), в основном вверх. Параллельно наблюдается оползание нижней части разрушенных пород в русло. Процесс внешних проявлений КМВ в его очаге завершается на 12 – 15-й с от его инициирования с просматриваемыми в снопе выброса ПВ и пыли признаками продолжающегося подвигания пород в русло.

Ко времени формирования волн в атмосфере энергия выходящих на поверхность продуктов де-



а)



б)

**Рис. 7.** Воронки, оставшиеся в массиве пород после перемещения грунта первым (а) и вторым (б) взрывами

тонации недостаточна для образования ударных воздушных волн, что подтверждает поглощение энергии ВМ процессами разрушения, перемещения пород внутри массива, включая также волновые эффекты, до выброса продуктов взрыва.

Начало массового прорыва продуктов взрыва (ПВ) по границе скола в массиве от 1-го взрыва фиксируется на дневной поверхности приблизительно на 1,9 – 2 с от детонации, ещё через 3 с прорыв развивается в сноп выброса ПВ и пыли. К этому времени волновые воздействия от 1-го взрыва полностью затухают или накладываются (для объектов на правом берегу в 1,5 км и более от КМВ) на проявление 2-го взрыва. Поверхность скола от взрыва основного заряда оконтуривается выходом ПВ на 4,5 – 5 с с начала КМВ. За указанный период сброса разрушенного обоими взрывами массива не наблюдается. Колебания продолжаются еще 5 с на расстоянии 4 км, на окраине пос. Кара-Жигач, и происходят в условиях взрыва, пригруженного массой налегающих пород.

На рис. 7 показаны воронки, оставшиеся в массиве пород после перемещения грунта взрывами, а на рис. 8 — схема полученного после КМВ профиля взрывонабросной плотины.

## Выводы

1. Сейсмическое воздействие на охраняемых объектах ГЭС и пос. Кара-Жигач соответствует по интенсивности и временным параметрам процесса прогнозным оценкам. Волновой состав агентов излучения сейсмической энергии в массиве в окрестности КМВ соответствует характеристикам сейсмогеологического разреза участка и условию закономерной смены волн, несущих интенсивные колебания. Макросейсмические характеристики, исследованные после КМВ, подтверждают сделанную ранее инструментальную оценку балльности.

Признаков деформации сооружений ГЭС, зданий поселка, мазаров на старом кладбище не обнаружено.

2. Отмечено районированное распределение сейсмических параметров: относительное усиление (уменьшение затухания) колебаний покровными грунтами на правом берегу р. Нарын и в основании здания ГЭС, заметное снижение в скальном массиве интенсивности колебаний по сравнению с данными наблюдений на ранее осуществлённых КМВ. Особенностей колебаний, связанных с масштабом взрыва, не выявлено. Акустические измерения показали отсутствие ударного фронта в распространяющейся при КМВ воздушной волне, что свидетельствует об отсутствии ударного импульса на выходе очага взрывов в атмосферу.

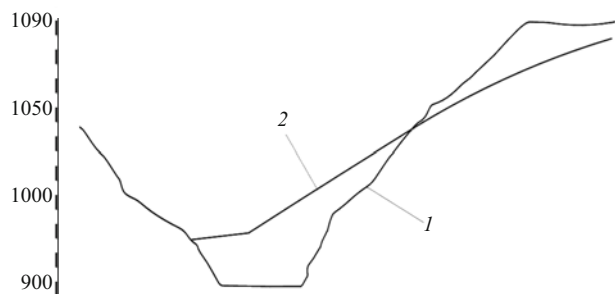


Рис. 8. Продольный разрез по оси плотины (вид с НБ): 1 — очертание берегов в районе створа; 2 — граница навала

3. Вторичного сейсмического воздействия от акустических волн и негативных эффектов в отношении сооружений и состояния населения не наблюдалось. По эффективности излучения сейсмической и акустической энергии КМВ может оцениваться как взрыв рыхления с пригрузкой. Сброс энергии продуктов детонации при выходе их во внешнюю среду и сдвиге массива происходит после затухания действия выше указанных волновых процессов. Сброса разрушенного обоими взрывами массива не наблюдается;

4. Эффективный сброс пород в русло потребовал бы увеличения энергии взрыва и/или уменьшения объема пород над нижним зарядом, подпирающих основной массив, соответствующим размещением ВМ в нижней части массива, но не требует увеличения интервала замедления между 1-м и основным зарядами (желательно этот интервал согласовать со временем положительной фазы волны сжатия).

## Очистка и строительство водоемов с помощью средств гидромеханизации

Сметанин В. И., доктор техн. наук, профессор  
(Московский государственный университет природообустройства),  
Согин А. В. кандидат техн. наук, директор ООО “Сапропель”

Материалы статьи основаны на практической работе предприятия ООО “Сапропель” по очистке водоемов и малых рек в г. Нижний Новгород и области. Для этой цели предприятием разработаны и построены малые земснаряды производительностью 400 – 1600 м<sup>3</sup>/ч по воде. С помощью этих земснарядов выполнены значительные объемы расчистки водоемов от илистых отложений с целью приведения их в нормальное экологическое состояние для водопользования. На основе анализа выполненных работ разработан алгоритм подбора типа земснаряда в зависимости от объема расчистки, срока их выполнения и особенностей грунтов. Приводятся краткие технические характеристики применяемых земснарядов.

**Ключевые слова:** водоемы, очистка и строительство, землесосные снаряды, ООО “Сапропель”.

В настоящее время в водоемах Российской Федерации скопилось огромное количество донных отложений. Такие отложения образованы многолетними промышленными и бытовыми стоками, атмосферными сточными водами. Количество сапропелевых донных отложений в водоемах России увеличивается ежегодно на 1 млн. м<sup>3</sup> за счет оседания естественной органики: листвы, отмерших водных растений, веток, экскрементов рыб и водоплавающих птиц. Общее количество сапропелевых отложений в РФ более 200 млрд. м<sup>3</sup>.

Донные отложения изменяют качество воды, нарушают биологическое равновесие в водоеме, подавляют самоочищение водоема и в конечном счете изменяют экосистему. В ряде регионов из-за скопления в водоемах огромного количества донных отложений существует реальная угроза ухудшения санитарно-эпидемиологической обстановки, возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с недостатком питьевой воды для населения, воды для пожарно-спасательных ситуаций и для ведения хозяйственной деятельности (полив, орошение, рыб- и птицеводство).

Для создания достаточного резерва чистой воды в первую очередь необходимо провести очистку и восстановление заиленных и отмирающих водоемов, построить достаточное количество пожарных и производственных водоемов. Кроме того, очистка водоемов и русел рек уменьшает угрозу подтопления территорий, разрушения плотин, дамб, а следовательно ведет к уменьшению чрезвычайных ситуаций и материальных затрат на их ликвидацию.

Очистку и строительство водоемов можно проводить двумя способами:

*механизированным способом с производством земляных работ “насухо”;*

*гидромеханизированным способом.*

Механизированный способ включает:

опорожнение водоема;

обезвоживание и подсушку донных залежей;

разработку донных отложений экскаваторной техникой;

транспортирование;

складирование и укладку в илохранилище.

Гидромеханизированный способ при наличии слоя воды, обводненных территорий и водосбора является одним из наиболее эффективных и экономичных способов выполнения земляных работ. Он позволяет объединить разработку, транспортирование и укладку грунта.

Разработка донных отложений происходит путем всасывания грунта из-под воды. Интенсивность разработки зависит от физико-механических свойств отложений, характера их залегания в водоеме и правильного выбора грунтозаборного устройства. При этом процесс грунтозабора является определяющим для обеспечения эффективной работы землесосного снаряда (рис. 1 – 6).

Способы воздействия грунтозаборных устройств на разрабатываемый грунт подразделяются на две основные группы:

свободное всасывание с эрозийным размывом грунта потоками воды, подтекающими к всасывающему наконечнику;

всасывание с использованием рыхлительных устройств для интенсификации грунтозабора.

При разработке свободным всасыванием всасывающий наконечник погружается в слой грунта, а поток воды, фильтрующий из разрабатываемого грунта, способствует отрыву частиц грунта и поступлению их во всасывающую трубу. На интенсивность всасывания влияют расход жидкости, скорость движения всасывающего потока воды, форма всасывающего наконечника. Расход жидкости определяется производительностью грунтового насоса по пульпе, которая связана со скоростью всасывания и площадью приемного отверстия всаса грунтозаборного устройства.

Площадь приемного отверстия наконечника  $F$  определяется по формуле

$$F = \frac{Q_n}{3600 \cdot V_{\text{вс}}}, \quad (1)$$

$$Q_n = \frac{w[q + (1 - m)]}{8ntcK_B}, \quad (2)$$

где  $Q_n$  — паспортная производительность грунтового насоса земснаряда, м<sup>3</sup>/ч;  $V_{\text{вс}}$  — скорость всасывания, м/с.

На основании экспериментальных данных получена оптимальная скорость всасывания пульпы для мелкодисперсных грунтов, к которым можно отнести донные отложения:  $V = 1,5 \dots 2$  м/с.

Разработка свободным всасыванием применяется для донных несвязных грунтов: песчаных, легких супесей, неслежавшихся грунтов, а также для верхних слоев водонасыщенных отложений, которые являются малосвязанными и подвижными. Такие отложения могут разрабатываться без механического рыхления свободным всасыванием.

В ООО «Сапрпель» (г. Нижний Новгород) разработаны и созданы образцы землесосных снарядов с различной производительностью, которые решают задачи по очистке водоемов (табл. 1).

Определенные трудности у потребителей услуг возникают при выборе типа земснаряда для очистки водоемов. Выбор типа земснаряда необходимо проводить с учетом объема выполнения работ, характеристик донных отложений и сроков выполнения работ. Необходимая часовая производительность земснаряда по пульпе  $Q_n$ , м<sup>3</sup>/ч, при условии 8-часовой рабочей смены определяется по формуле

где  $w$  — объем грунта, подлежащего разработке, м<sup>3</sup>;  $m$  — пористость грунта;  $q$  — удельный расход воды, м<sup>3</sup>, на разработку и транспортирование 1 м<sup>3</sup> грунта;  $n$  — число рабочих дней в месяц;  $t$  — число смен в сутки;  $c$  — продолжительность работы, мес.;  $K_B$  — коэффициент использования землесосного снаряда по времени.

Пористость грунта характеризуется отношением объема пор  $V_{\text{п}}$  к общему объему грунта  $V_{\text{гр}}$ :

$$m = V_{\text{п}}/V_{\text{гр}}. \quad (3)$$

Донные отложения по трудности разработки можно отнести к I и II группе грунтов. К I группе относятся иловые осадки с удельным расходом воды на разработку 1 м<sup>3</sup> грунта  $q = 6,5$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> и пористостью  $m = 0,6 - 0,9$ . Ко II группе относятся донные отложения из супеси и пылеватых песков с пористостью  $m = 0,25 \dots 0,4$  и с удельным расходом воды на разработку 1 м<sup>3</sup> грунта  $q = 8,5$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Коэффициент использования земснаряда по времени  $K_B$  определяется исходя из:

коэффициента внутрисменного использования  $K_{\text{см}}$ , зависящего от способа укладки грунта (эстакадный, безэстакадный, торцевой намыв, рассредоточенный);

коэффициента, учитывающего межсменный и другие простои, —  $K_{\text{мс}}$ ;

Т а б л и ц а 1

Техническая характеристика земснарядов, изготавливаемых и используемых в ООО «Сапрпель»

Параметры	Земснаряд «Нижегородец-1»	Земснаряд «Нижегородец-2»	Земснаряд «ЗРС-М»
			
Подача воды, м <sup>3</sup> /ч	400	800	1600
Напор, м вод. ст.	20	40	50
Установленная мощность, кВт	75	250	370
Максимальная глубина разработки с эжектором, м	8	11	16
Дальность транспортирования, м	300	800	1600
Габариты корпуса, м:			
длина	6,6	10	10,4
ширина	2,41	5,1	5,2
высота	2,9	4,0	4,2
длина бортового понтона	8,7	12	20
Масса земснаряда, т	7,5	14	20
Персонал в смену, чел.	2	2	3



Рис. 1. Работа земснаряда по очистке канала инженерной защиты (Фокинская сельхознижина, Нижегородская область)

коэффициента, учитывающего засоренность водоема корнями, топляками, болотной и водной растительностью, —  $K_3$ .

Общий коэффициент использования земснаряда по времени будет составлять

$$K_B = K_{CM} \cdot K_{MC} \cdot K_3. \quad (4)$$

Опыт работы ООО «Сапропель» при очистке водоемов показал, что осредненное значение коэффициента использования по времени на указанных земснарядах можно принимать 0,68 – 0,72.

В табл. 2 приводится усредненная часовая производительность различных земснарядов по объему выработанного грунта исходя из условий производительности по пульпе.

В табл. 3 рекомендуются землесосные снаряды для очистки водоемов в зависимости от сезонного объема работ при толщине донных отложений до 2 м.

Созданные конструкции земснарядов в ООО «Сапропель» защищены патентами [1, 2] и в комплексе с различными грунтозаборными устройствами использовались:

при расчистке каналов инженерной защиты Чебоксарского водохранилища (рис. 1);

при очистке и дноуглублении городских водоемов (рис. 2);

при восстановлении нарушенного русла р. Железница, связанного со строительством прокатного стана 5000 в г. Выкса Нижегородской области (рис. 3);

Таблица 2

Условная производительность земснаряда по пульпе, м <sup>3</sup> /ч	Нижегородец-1	Нижегородец-2	ЗРС-М
400	21	-	-
800	-	36	-
1600	-	-	45



Рис. 2. Очистка и дноуглубление городского водоема в микрорайоне «Водный мир», г. Нижний Новгород

при очистке водохранилища на р. Валава, г. Лысково Нижегородской области (рис. 4).

При восстановлении русла р. Железница в г. Выкса осуществлялось дноуглубление реки в твердых известковых породах, для чего использовались фрезерные рыхлители собственной конструкции [3, 4] (рис. 5).

Строительство хозяйственного водоема в пос. Лакша Богородского района Нижегородской области осуществлялось с помощью земснаряда «Нижегородец-1» в пойме р. Кудьма (рис. 6), где сухоройная техника не могла передвигаться из-за обводненной территории с торфяными залежами. Такая работа могла быть выполнена только с помощью земснарядов.

В своей производственной деятельности ООО «Сапропель» разработало и осуществляет модульный принцип создания техники для очистки водоемов на основе функционально-структурного подхода [5]. Весь производственный процесс — от проекта до объекта — выполняется в комплексе одной организацией и заключается в формуле

$$\Sigma F_i \rightarrow \Sigma S_i \rightarrow S^0 \rightarrow O_i,$$

где  $F_i$  — элементарная производственная функция технического объекта;  $S_i$  — элементарная структура, способная выполнять элементарную функцию;  $S^0$  — обобщенная структура технического объекта, например земснаряда;  $O_i$  — конкретный производственный объект по очистке водного объекта.

Элементарные структуры  $S_i$  стараются подбирать модулями — конструктивными единицами, от-

Таблица 3

Сезонный объем работ по грунту, тыс. м <sup>3</sup>	Нижегородец-1	Нижегородец-2	ЗРС-М
До 100	1	-	-
200	-	1	-
300	-	-	1



Рис. 3. Восстановление русла р. Железница в г. Выкса



Рис. 4. Очистка водохранилища на р. Валава, г. Лысково Нижегородской области



Рис. 5. Фрезерный рыхлитель собственной конструкции



Рис. 6. Земснаряд “Нижегородец-1” на строительстве хозяйственного водоема пос. Лакша Богородского района

дельными изделиями, готовыми к монтажу и отвечающими функциональным требованиям.

Следует отметить, что возможности по созданию новой техники внутренними резервами одного предприятия весьма ограничены, так как они определяются объемами выполнения работ. Несмотря на большую общественную потребность в очистке водоемов, объемы выполнения работ по очистке водоемов и русел малых рек весьма незначительны, а отсюда и возможности создания инновационной отечественной техники весьма ограничены. При этом переход на рыночную систему отрицательно сказался на потенциале инженерно-технических работников, на основных фондах, что при отсутствии финансирования неблагоприятно повлияло на создание новой техники.

В сегодняшних условиях для модернизации отрасли от федеральных властей требуется финансовая поддержка по двум направлениям:

опытно-конструкторские разработки по созданию инновационной техники, способной с высокой производительностью и наилучшим качеством производить работы по очистке водоемов;

более масштабные работы по очистке водоемов и русел малых рек в целях обеспечения экологической безопасности.

## Выводы

Разработан алгоритм определения типа земснаряда для разработки определенного объема грунта на основе многолетнего использования земснарядов производственного и опытно-конструкторского предприятия “Сапропель” при очистке водоемов.

## Список литературы

1. Пат. № 54841. Земснаряд / Согин А. В. // Промышленные образцы. 2003. № 7. С. 93.
2. Пат. № 32142. Землесосный снаряд / Согин А. В. // Бюллетень изобретений. 2003. № 25. С. 688.
3. Иванов Е. Г., Согин А. В. Проектирование сварных рыхлительных фрез из листовых заготовок // Материалы междунар. научн.-практ. конф. Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии. Нижний Новгород, 2010. С. 151 – 156.
4. Пат. № 45144. Грунтозаборное устройство землесосного снаряда / Согин А. В. Бюллетень изобретений. 2005. № 12. С. 491.
5. Согин А. В. Поискное проектирование и создание машин для добычи сапропеля и очистки водоемов // Материалы Четвертого съезда гидромеханизаторов России. — М.: МГТУ, 2006. Вып. 4.

## Через повышение качества и надежности электроснабжения — к энергосбережению

Анисимов А. Д., генеральный директор ЗАО “Лидесм”,  
Березин В. К., кандидат техн. наук,  
Кириллов Ю. И., генеральный директор ЗАО “Инвестэнергострой”,  
Сааков Г. А., ГИП ЗАО “Лидесм”, Чаев Н. П., ГИП ЗАО “Инвестэнергострой”,  
Шишов Г. А., кандидат техн. наук

Дано описание положительных свойств ГАЭС. Предлагаются некоторые технические решения, позволяющие, по мнению авторов, существенно уменьшить стоимость и сократить сроки строительства ГАЭС.

**Ключевые слова:** гидроаккумулирующие электростанции, режим суточного регулирования, снижение потерь топлива, уменьшение рисков негативных явлений, технико-экономические показатели ГАЭС, функции ГАЭС, асинхронизированный гидрогенератор, Высокинская ГАЭС.

Позитивные действия государства в интересах своих граждан предусматривают основополагающее развитие:

энергетики, что выражается в создании электрических и тепловых мощностей;

потребительского сектора, в первую очередь производства продовольствия;

среды обитания, включающей занятость населения с преобладанием высококвалифицированного труда, инфраструктуру, обеспечивающую комфортность и гармонию с природой.

Первостепенным фактором является развитие энергетики, так как без этого невозможно обеспечить развитие потребительского сектора и среды обитания (жилье, инфраструктура, зарплата населения, минимизация ущерба природе и т.д.). Развитие энергетики определяет также уровень энерговооруженности работника и энергообеспечения жилья, инфраструктуры.

При развитии энергетики весьма важно развивать технологии энергосбережения и энергоэффективности оборудования потребителя.

Принимая во внимание вышеизложенные положения, Правительство РФ заявило требования по энергосбережению и энергоэффективности при модернизации промышленного и сельскохозяйственного производства, развитию инфраструктуры, строительстве жилья.

Наряду с количественным прибавлением мощностей владельцы генерирующих мощностей должны обеспечить качественный подход, заключающийся в себе извлечение из топлива и водных ресурсов максимального объема энергии (показателем чего в тепловой энергетике является удельный расход условного топлива на производство 1 кВт · ч энергии), а также снижение расхода энергетических ресурсов на собственные нужды электростанции и потерь при транспорте электроэнергии и трансформации по классам напряжения. Одновре-

менно потребуется уменьшить значительные потери энергии, возникающие при регулировании соотношения спроса и потребления.

Энергия (электрическая, тепловая) является особым товаром, который невозможно накопить впрок и продать по мере спроса: сколько энергии выработали ТЭС, АЭС и ГАЭС, столько и должно быть использовано потребителями. Данная особенность порождает две проблемы. Первая — выработанный объем энергии сверх объема потребления рассеивается в пространстве в виде теплового, электромагнитного излучения, создает эксплуатационные проблемы в электросетевом хозяйстве и у потребителей по причине перехода активной энергии в реактивную, повышения напряжения в электрических сетях, перегрева трансформаторов и аппаратуры подстанций. В итоге — перерасход органического и атомного топлива, гидроресурсов, создание предпосылок для возможных аварий. Вторая проблема — если объем потребления энергии превышает ее производство, то падает частота и, как следствие, мощность электроприводов, а при значительном падении частоты тока срабатывают противоаварийные защиты и происходит “веерное” отключение потребителей, которое наносит ущерб как потребителям, так и производителям энергии.

Проблемы производства и сбыта энергии имеют традиционные апробированные решения гибкого регулирования производства электроэнергии и аккумуляирования при ее перепроизводстве путем диспетчерских команд Центрального диспетчерского управления или региональных объединенных диспетчерских управлений по снижению или повышению выработки электроэнергии. Команды передаются в первую очередь на ТЭС, имеющие маневренные блоки, ГАЭС и ПГУ.

Особо важной задачей при регулировании производства энергии является использование мощностей в ночное время и выходные дни. Как правило,



в этот период полностью используется маневренный диапазон гидроэлектростанций, разгружаются все мелкие конденсационные станции, более чем на 40 % снижаются мощности блочных ГРЭС, а также вынужденно останавливается значительное количество мощных блоков ТЭС.

Практикуются также режимные остановы (продолжительностью менее 20 ч) блоков ГРЭС единичной мощностью 200 и 300 МВт. Подобные режимы работы приводят к повышению удельных расходов условного топлива, сокращению ресурса работы теплотехнического и теплоэнергетического оборудования, росту затрат средств и времени на проведение ремонтов.

Необходимо обратить внимание на пережог топлива при регулировании мощностей и режимных остановах агрегатов ТЭС. По экспертным оценкам перерасход условного топлива на ТЭС по причинам, упомянутым выше, составляет 21,5 г при производстве 1 кВт · ч энергии. По Российской Федерации при среднегодовой выработке 1170,0 млрд. кВт · ч пережог составляет 25,2 млн. т, что в ценах 2010 г. в сумме около 80,5 млрд. руб. существенно влияет на величину тарифов, соответственно увеличивает нагрузку на бюджет, а также расходы потребителей.

В вопросах оценки допустимой величины разгрузки атомных электростанций нет достаточно обоснованных предложений ни по возможным техническим пределам разгрузки, ни по интенсивности осуществления. На основе имеющихся данных можно считать очевидным, что использование энергоблоков атомных электростанций в режимах суточного регулирования невозможно.

Владельцев электростанций не беспокоят пережоги топлива по режимным условиям, так как затраты, связанные с пережогами, включаются в тарифы и их компенсирует государство через оплату за энергию бюджетными и государственными предприятиями, а также население и прочие потребители. Следовательно, заинтересованными в снижении пережога топлива и, соответственно, тарифов являются потребители и государство.

Проблемы снижения потерь топлива и уменьшения рисков негативных явлений при регулировании спроса и предложения электроэнергии возможно решить традиционными методами на новой технологической основе путем ввода в эксплуатацию специальных маневренных электростанций. В качестве маневренных электростанций обычно рассматриваются пиковые гидроаккумулирующие электростанции с продолжительностью работы в пиковом режиме не менее 6 ч в сутки, полупиковые гидроаккумулирующие и полупиковые тепловые электростанции продолжительностью с работы в режиме регулирования 16 ч в сутки, газотурбинные

электростанции с продолжительностью работы до 3 ч в сутки. За исключением гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС), другие типы станций неспособны аккумулировать электроэнергию, вырабатываемую в ночные часы.

Сравнение технико-экономических показателей ГАЭС и газотурбинных, полупиковых тепловых электростанций указывает на ряд существенных преимуществ гидроаккумулирующих электростанций, в частности:

ГАЭС используются и для покрытия пиковых или полупиковых зон графиков нагрузок, и для заполнения “ночных провалов”. Таким образом, общий маневренный диапазон ГАЭС увеличивается на время “ночных провалов”;

ГАЭС не используют органическое топливо, как ГТЭ;

заряд ГАЭС может осуществляться энергией атомных электростанций, развитие которых предусматривается решениями Правительства РФ;

оборудование ГАЭС обладает более высокой степенью быстродействия, чем оборудование тепловых электростанций, включая ГТУ. Время набора гидроагрегатом полной нагрузки в генераторном режиме 10 – 60 с, в насосном — 6 – 9 мин;

удельные затраты труда и в целом эксплуатационные издержки на ГАЭС значительно ниже, чем на газотурбинных и полупиковых тепловых электростанциях. Сооружения и оборудование ГАЭС более просты, надежны и долговечны.

Широкий диапазон маневренной мощности и высокая степень быстродействия ГАЭС позволяют использовать их для выполнения различных функций в работе энергосистемы, таких, например, как:

потребление избыточной электроэнергии, вырабатываемой атомными и тепловыми электростанциями в часы ночных провалов нагрузок, и создание таким образом условий для оптимальной равномерной работы АЭС и ТЭС;

выдача электроэнергии потребителям в часы пик, т.е. в часы максимальных нагрузок;

выработка электроэнергии для покрытия полупиковой зоны графиков нагрузки;

оперативное регулирование мощности и поддержание нормируемой частоты тока в энергосистеме;

краткосрочный или среднесрочный аварийный резерв мощности;

работа в режиме синхронного компенсатора.

Эффект работы ГАЭС заключается в уменьшении неравномерности режимов электропотребления и в конечном итоге в выравнивании режимов работы АЭС и ТЭС, а следовательно в повышении качества электроэнергии.

Одно отличие ГАЭС, которое пока не учитывается экономическими расчетами, заключается в

большей надежности энергоотдачи этих электростанций по причине их независимости от водности года. В остальном эффективность сооружения ГАЭС выявляется в результате экономического сопоставления двух вариантов развития и функционирования энергетической системы — с проектируемой ГАЭС и без нее.

Существенные экономические эффекты дает объединение атомных и гидроаккумулирующих электростанций в энергетические комплексы.

Наиболее реальным и экономически обоснованным путем дальнейшего наращивания маневренных мощностей в Объединенной энергосистеме европейской части РФ является строительство ГАЭС и энергетических комплексов, объединяющих АЭС, ТЭС и ГЭС. Программы строительства атомных, тепловых и гидроаккумулирующих электростанций должны быть тесно увязаны между собой, в особенности для решения задачи покрытия полупиковых, пиковых и ночных зон графиков нагрузок. Во всех развитых странах мира эти проблемы успешно решаются. Этому, в частности, способствует разработка (Япония, Европа) новой конструкции обратимых мощных гидроагрегатов с переменной частотой вращения, с асинхронизированными синхронными гидрогенераторами (АСГД). Они позволяют повысить КПД гидроаккумулирования на 10 – 12 %, что очень важно для ГАЭС с обратимыми гидроагрегатами.

В настоящее время ГАЭС эксплуатируются в 35 странах мира. Наиболее развито гидроаккумулирование в США, Японии, Германии, Франции, Швейцарии. На долю этих стран приходится около 200 ГАЭС, или 60 % от их общего числа, а всего в мире построено более 320 ГАЭС и строится около 40 крупных ГАЭС. Первенство принадлежит США — 11 ГАЭС общей мощностью 16 200 МВт и Японии — 6 ГАЭС общей мощностью 7200 МВт, причем на одной из ГАЭС установлены обратимые агрегаты с АСГД мощностью в турбинном режиме до 400 МВт. В КНР строится 3, в Индии — 2 мощные ГАЭС. В Украине построено 3 и строится 2 мощные ГАЭС, в том числе Днестровская с шахтным расположением семи обратимых гидроагрегатов мощностью по 330 – 350 МВт при расчетном напоре 155 м, но без АСГД. Один гидроагрегат мощностью 345 МВт пущен в 2009 г.

При всей важности и необходимости гидроаккумулирующих электростанций в настоящее время в РФ функционирует только одна — Загорская ГАЭС и строится ее вторая очередь.

По генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики на период до 2030 г., разработанной ОАО “РАО ЕЭС”, предусматривается строительство пяти ГАЭС на европейской части России. В проектных проработках и экономических обос-

нованиях находятся несколько крупных ГАЭС: Ленинградская, Владимирская, Курская, две Средневожские и ряд других ГАЭС, более удаленных от центральной части РФ. Места выбраны на основе проектных предложений, разработанных в 80-е гг. прошлого века. Технические решения, заложенные в планируемые к строительству ГАЭС, предполагают использование опыта возведения Загорской ГАЭС, который имеет значительный негатив, в частности большую продолжительность возведения ГАЭС.

Особенностью проектов средненапорных ГАЭС ( $H_p = 90 \dots 120$  м), предусмотренных по генсхеме к строительству, является то, что они запроектированы на нескальных грунтах, по деривационной схеме, с подводом воды к стальным спиральным камерам обратимых гидроагрегатов с помощью наклонных (на нескальных грунтах) сталежелезобетонных напорных водоводов, под которыми предполагается устройство свайного поля, с буронабивными сваями. Самый главный недостаток, при такой “линейной” конструкции здания ГАЭС — большая продолжительность строительства (12 – 15 лет), так как для пуска в эксплуатацию 1-го обратимого гидроагрегата мощностью 200 МВт необходимо выполнить 75 – 80 % всех бетонных работ по зданию ГАЭС и по водоприемнику-водовыпуску и почти 100 % всех земляных работ по верхнему и нижнему бассейнам.

Насущной потребностью является разработка нестандартных подходов к компоновке ГАЭС и технологии строительства, которые будут обеспечивать высокий КПД гидравлического аккумулирования энергии (более 0,80) и кратчайшие сроки строительства (3 – 5 лет). Решение этой проблемы возможно путем использования оборудования типа АСГД и переработки так называемого типового проекта ГАЭС на нескальных основаниях. По нашему мнению, целесообразно применять шахтную схему установки обратимого гидроагрегата и оборудования водоприемника-водовыпуска, для связи верхнего и нижнего бассейнов взамен укладки открытых сталежелезобетонных водоводов сооружать гидротехнические туннели, хорошо зарекомендовавшие себя при возведении Днестровской ГАЭС. Предлагаем размещать оборудование водоприемников-водовыпусков в вертикальных шахтах, а оборудование обратимых гидроагрегатов — в осевых вертикальных шахтах. Данные конструктивные решения позволяют сократить сроки строительства, уменьшить затраты на пусковой комплекс двух первых обратимых гидроагрегатов ГАЭС до 30 % от полной сметной стоимости строительства ГАЭС.

Кроме того, в первую очередь необходимо отдавать предпочтение строительству ГАЭС в тех ре-

гионах, где уже имеются почти готовые верхний и нижний бассейны естественного или техногенного происхождения, например: Средневожская ГАЭС, где нижним бассейном является водохранилище Жигулевской ГЭС; Карельская ГАЭС, где верхним бассейном может стать Пяозеро; Высокинская ГАЭС, где верхним бассейном будет оз. Высокинское, а нижним — Ермиловский залив Балтийского моря.

По нашему мнению, основными критериями выбора площадки строительства ГАЭС должны быть объем инвестиций на 1 кВт установленной мощности и КПД гидравлического аккумулирования энергии и время срабатывания запасов воды. Упомянутые критерии позволят создавать экономически эффективные ГАЭС, в том числе и на низких напорах (20 – 30 м), что весьма важно для европейской части России. Эффективность низконапорной ГАЭС была доказана проектными проработками Цимлянской ГЭС-ГАЭС мощностью 1000 МВт рядом с Ростовской АЭС, которая крайне нуждается в ней.

Упомянутая выше низконапорная Высокинская ГАЭС мощностью от 600 до 1000 МВт, по которой выполнены экспертные проектные проработки, потребует затрат на 1 кВт установленной мощности в два раза меньше, чем строящаяся Загорская ГАЭС-2. Сроки строительства Высокинской ГАЭС не превысят 5 – 7 лет. При работе совместно со строящейся ЛАЭС-2, которая будет выдавать мощность на трансформаторную подстанцию в Ермилово, расположенную рядом с площадкой Высокинской ГАЭС, она будет влиять на устойчивость работы АЭС и качество электроэнергии в Северо-Западном регионе.

Предлагаемая программа создания ГАЭС в европейской части Российской Федерации на основе предлагаемых технических решений вполне реальна, так как значительно сократит объем инвестиций, удешевит системные услуги, упростит регулирование производства и потребления электроэнергии.

Мы предлагаем в интересах эксплуатации ЛАЭС-2 и отработки технологии строительства ГАЭС шахтным методом возвести Высокинскую ГАЭС на условиях частно-государственного партнерства. Возведение Высокинской ГАЭС экономически выгодно. При мощности 1000 МВт затраты на 1 кВт установленной мощности составят около 50 тыс. руб. (цены 2008 г.). При начале работ по проектиро-

ванию в 2011 г. возможно ввести два блока к 2015 г., т.е. к ожидаемому сроку ввода первого энергоблока ЛАЭС-2.

При проектировании Высокинской ГАЭС необходимо отработать типовые решения для низконапорных ГАЭС со сформированными верхним и нижним бассейнами, для выбора оборудования и новых технологий строительства таких ГАЭС за 5 – 7 лет. По нашему мнению, два первых обратимых шахтных гидроагрегата Высокинской ГАЭС единичной мощностью 125 МВт можно ввести в эксплуатацию очень быстро — за 2 – 3 года после разработки технической документации и ее экспертизы. Этому способствуют следующие обстоятельства:

ВГАЭС в качестве верхнего бассейна использует существующее, не имеющее хозяйственного потенциала оз. Высокинское с уровнем воды в нем на 10 м выше уровня воды Ермиловского залива, а при сооружении дамбы вокруг озера уровень воды поднимается еще на 18 м, что при площади озера 15 км<sup>2</sup> (3 × 5 км) обеспечит полезный объем сработки до 105 млн. м<sup>3</sup> при глубине сработки до 7 м и 135 млн. м<sup>3</sup> при сработке 9 м;

ВГАЭС имеет в качестве нижнего бассейна неограниченный объем воды Финского залива с колебаниями уровня ± 0,5 м, средняя глубина которого примерно 10,0 м, что позволит ВГАЭС работать в любых необходимых режимах для энергосистемы Северо-Запада РФ;

шахтное расположение пускового комплекса ВГАЭС из двух гидроагрегатов мощностью 2 × 125 МВт = 250 МВт в турбинном режиме позволяет ввести два первых агрегата в эксплуатацию при освоении не более 30 % сметной стоимости ВГАЭС, что резко сократит срок окупаемости инвестиций.

Реализация проекта Высокинской ГАЭС обеспечит стабильную ночную загрузку ЛАЭС и позволит отработать новые строительные и технические решения, а также эксплуатационные качества основного и вспомогательного оборудования низконапорных мощных ГАЭС в европейской части РФ.

Альтернативы строительству мощных ГАЭС в районе размещения АЭС практически нет, и чем быстрее будут приняты решения по их сооружению на основе частно-государственного партнерства, тем эффективнее будет выполняться крайне необходимая для Российской Федерации программа энергосбережения.

# Ремонт плотин из грунтовых материалов в случае нарушения фильтрационной прочности

Радченко В. Г., кандидат техн. наук,  
Радченко С. В., инженер (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева)

Рассмотрены случаи серьезных нарушений фильтрационной прочности плотин из грунтовых материалов. Приведены способы ремонта таких плотин, в частности с помощью возведения стенок-диафрагм методом “стена в грунте”. Изложены причины так называемых “гидравлических трещин”.

**Ключевые слова:** грунтовые плотины, деформации, трещины, ходы сосредоточенной фильтрации, ремонт, стенка-диафрагма, метод “стена в грунте”

Водоподпорные плотины и в частности плотины из грунтовых материалов, являются сложными техническими системами. В процессе их эксплуатации могут возникать отказы по самым разным причинам, которые в целом определяются теорией надежности, но применительно к конкретным условиям в значительной мере зависят от неточностей, а иногда и ошибок, допущенных при изысканиях, проектировании, строительстве и в период эксплуатации этих сооружений. Анализ причин повреждений и аварий плотин показывает, что их перечень может быть весьма широким. По данным СИГБ, после перелива воды через гребень плотин из грунтовых материалов на втором месте по частоте стоит нарушение фильтрационной прочности грунтов плотин и их оснований [1, 2].

Фильтрационная прочность грунта — это его способность сопротивляться фильтрационным деформациям, которые представляют собой деформации его твердой фазы, вызываемые в основном силами гидравлического воздействия [3 – 5]. В зависимости от типа грунта (связный или несвязный) могут возникать разные типы фильтрационных деформаций, а именно:

*суффозия* грунта (несвязного) — перемещение и вынос из массива грунта отдельных его частиц фильтрационным потоком. Различают внутреннюю и внешнюю суффозию;

*контактный суффозионный выпор* (вынос) — разрушение мелкозернистого (глинистого) грунта на контакте с крупнозернистым материалом фильтрационным потоком, направленным перпендикулярно линии контакта. Частный случай — это выпор грунта на границе выхода фильтрационного потока в нижний бьеф или на откос плотины в зоне высачивания;

*контактный размыв* — разрушение мелкозернистого (песчаного или глинистого) грунта на контакте с крупнозернистым грунтом фильтрационным потоком, направленным параллельно линии контакта;

*отслаивание грунта* — отрыв от толщи агрегатов частиц связного грунта на контакте с крупно-

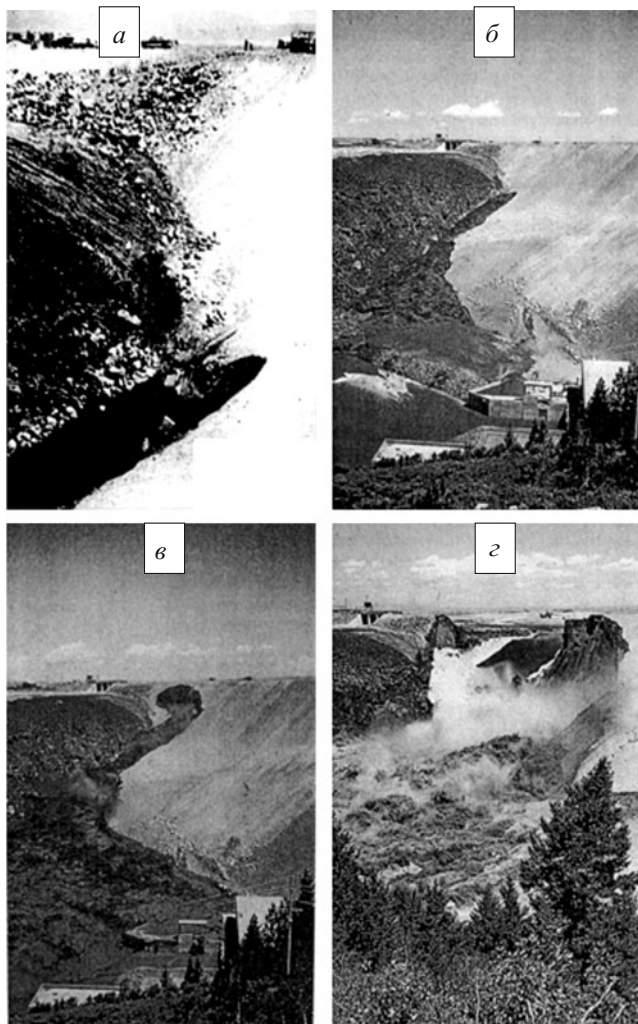
зернистым грунтом, в том числе на контакте с обратным фильтром;

*кольматация* — отложение перемещенных фильтрационным потоком частиц в порах грунта (внутренняя кольматация) или на поверхности грунтового массива (поверхностная кольматация);

*химическая суффозия* — растворение солей, содержащихся в грунтах.

Указанные выше фильтрационные деформации относятся к каким-то заранее известным зонам или отдельным участкам в плотинах. Но есть еще один вид фильтрационных деформаций, результатом которых являются трещины. Образование таких трещин в теле и основаниях грунтовых плотин, в ядрах и экранах каменно-земляных плотин связано в основном с неравномерными деформациями, с напряженно-деформированным состоянием и одновременным действием фильтрационных сил. В международной практике это явление называется “hydraulic fracturing”, в результате которого могут возникать ходы сосредоточенной фильтрации, приводящие к выносу грунта, повреждению плотин и нередко к полному их разрушению. Зоны возникновения “гидравлических трещин” определить сложнее, чем другие места нарушения фильтрационной прочности. Но именно трещины, из которых и развиваются ходы сосредоточенной фильтрации, являются наиболее опасными с точки зрения последствий, часто приводивших к серьезным авариям. В целом же возможность возникновения трещин в грунтовых плотинах предопределена тем, что грунты практически не воспринимают растягивающие напряжения, поэтому трещины могут возникать в плотинах во многих местах и по самым разным причинам.

Анализ обширной зарубежной и отечественной литературы по проблеме трещинообразования, а также причин аварий позволяет определить главные причины, вызывающие это явление [6 – 12]. Основная из них — это неравномерные деформации как всей плотины в целом, так и отдельных ее элементов, что приводит к появлению областей предельного состояния, ослабленных зон, к растя-



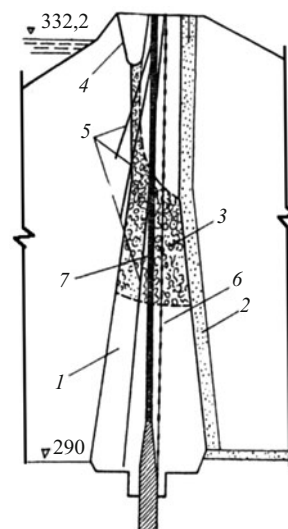
**Рис. 1.** Авария плотины Титон:  
а, б, в, г — этапы разрушения

жению, к сдвиговым деформациям и т.д. Этому способствуют следующие факторы:

*топографические условия* размещения плотин, когда при строительстве в узких каньонах с крутыми бортами и резкими переломами их поверхности появляется опасность значительных неравномерных деформаций, зон сдвига и растяжения, особенно в гребневой части, где возникают поперечные трещины на гребне, нарушается контакт с бортовыми примыканиями из-за сдвигов;

*инженерно-геологические условия*, когда расположенные в основании грунты с повышенной сжимаемостью в ходе строительства и наполнения водохранилища получают значительные осадки, вызывающие неравномерные деформации. Тектонические разломы и трещины могут вызывать подвижки основания, особенно при сейсмических воздействиях, и неравномерные деформации элементов сооружения;

*конструктивные особенности плотины* в связи с тем, что отдельные их элементы состоят из грунтов с различными прочностными и деформативными свойствами и различия в сжимаемости этих эле-



**Рис. 2.** Схема повреждения ядра плотины Боулдерхэд и размещения грунтобетонной диафрагмы:

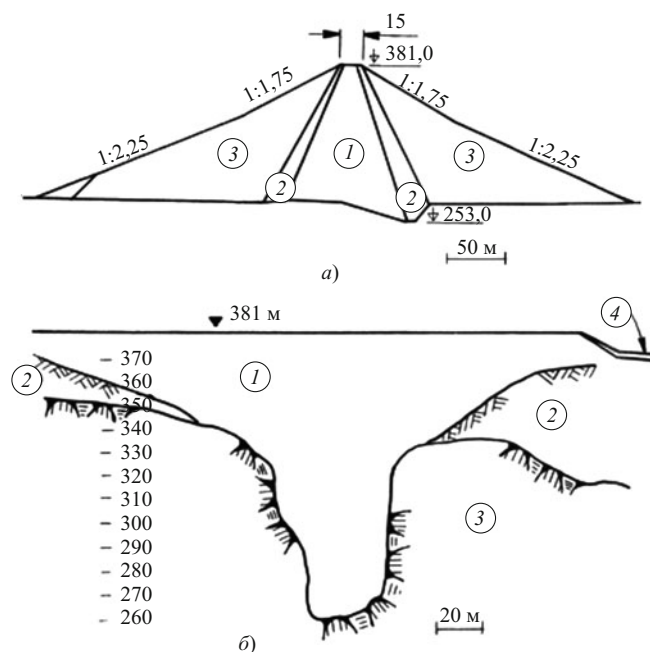
1 — ядро; 2 — фильтр; 3 — зона эрозии в ядре; 4 — воронка просадки; 5 — цементационные скважины; 6 — манжетная цементация; 7 — диафрагма, выполненная способом “стена в грунте”

ментов под действием собственного веса, гидростатического давления, просадки при замачивании, сейсмических воздействий и других причин приводят к перераспределению деформаций и напряжений в грунтах, возникновению в них арочного эффекта, развитию касательных напряжений на контакте отдельных элементов и в результате к образованию трещин;

*свойства грунтовых материалов плотин*, которые в связи с качеством грунтов (зерновой состав, плотность, сжимаемость, реологические свойства, способность к перераспределению деформаций и др.) влияют на развитие неравномерных деформаций в сооружении. Например, недоуплотнение приводит к существенным осадкам, особенно при наполнении водохранилищ или при воздействии дополнительных нагрузок;

*характер действующих нагрузок*, которые в зависимости от темпов наращивания плотины, скорости наполнения или сработки водохранилища, величины и продолжительности сейсмических воздействий, попеременного увеличения и уменьшения нагрузок при сработке и наполнении водохранилищ влияют на изменение напряженно-деформированного состояния и способность к трещинообразованию.

К прочим факторам относятся: атмосферные воздействия, вызывающие трещины усадки или усушки; морозобойные трещины; особенности микрорельефа на поверхности контакта “глинистый противотеплоизоляционный элемент — основание”; качество выполнения работ при укладке грунтов и их уплотнении. Практически все вышеперечисленные факторы необходимо учитывать в контексте возможного нарушения фильтрационной



**Рис. 3.** Поперечное (а) и продольное (б) сечения плотины Мад Маунтин:

а) 1 — ядро; 2 — переходные зоны; 3 — упорные призмы; б) 1 — ядро; 2 — четвертичные отложения; 3 — скала; 4 — водослив

прочности при проектировании, строительстве и эксплуатации плотин из грунтовых материалов.

Трещины, образующиеся в противофильтрационных элементах грунтовых плотин, в основном классифицируют следующим образом [9]:

по геометрии и расположению (поверхностные, внутренние, поперечные, продольные, сквозные, закрытые, волосяные, широкие, зияющие и т.д.);

по виду воздействий (статические и динамические нагрузки, давление воды, усушка, усадка, морозы и др.);

по характеру происхождения (трещины отрыва в зонах растяжения, трещины сдвига, трещины от размыва как в массиве грунта, так и на контактах отдельных зон; в результате эрозии грунта при фильтрационном потоке);

по степени опасности (от очень опасных до малоопасных). Наиболее опасные трещины те, что в результате эрозии их стенок превращаются в сосредоточенные пути фильтрации, чреватые возникновением аварии или полным разрушением плотины в результате выноса грунта сосредоточенным потоком фильтрующейся воды.

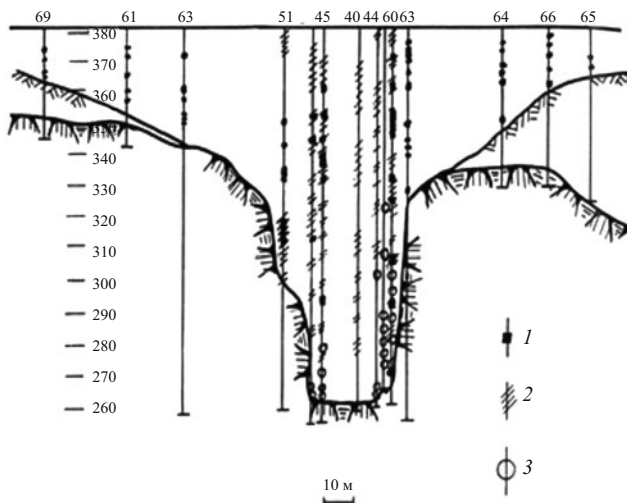
История строительства и эксплуатации грунтовых плотин знает много подобных аварий, особенно в начале прошлого века, когда грунтовые плотины строили без достаточного научного обоснования. Перечень плотин, подвергшихся аварии в результате суффозионного выноса грунта по ходам сосредоточенной фильтрации, возникшим либо в теле плотины, либо вдоль стенок трубопроводов, пересекающих плотины у их оснований в направлении потока, весьма широк. По данным [7] насчи-



**Рис. 4.** Вид на котлован плотины Мад Маунтин в русле реки, разработанный под ядро до скального основания

тываются десятки таких плотин. Особенно много подобных аварий плотин было в США, например: Хорз Крик (1914), Хейрвью (1922), Апишапа (1923), Макуокета (1927), Крэйн Крик (1928), Плэзант Велли (1928), Десабаи Форсбэй (1932), Драйн Крик (1939) и многие другие. Даже во 2-й половине XX в., когда большинство причин, вызывающих нарушение фильтрационной прочности, были достаточно хорошо изучены и решения по их преодолению успешно внедрялись в практику проектирования и строительства, в разных странах имелись многочисленные случаи аварийных ситуаций и даже разрушения плотин, связанных в основном с возникновением в плотинах и их основаниях ходов сосредоточенной фильтрации, с внутренней эрозией, с выносом частиц грунта. Примерами таких плотин на основании данных [8 – 12] могут служить: Уистор (27 м, США, год аварийной ситуации 1949); Стоктон Крик (24 м, США, 1950); Ист Бранч (17 м, США, 1957); Эль Изиро (9 м, Венесуэла, 1963); Джатилухур (112 м, Индонезия, 1965); Хиттеювет (90 м, Норвегия, 1966); Раунд Батт (134 м, США, 1967); Маттмарк (100 м, Швейцария, 1967); Матахина (61 м, Новая Зеландия, 1967); Боулдерхэд (48 м, Великобритания, 1967); Титон (93 м, США, 1976) и др.

Наиболее показательным примером аварийного разрушения грунтовой плотины, происшедшего 5 июня 1976 г. в результате возникновения хода со-

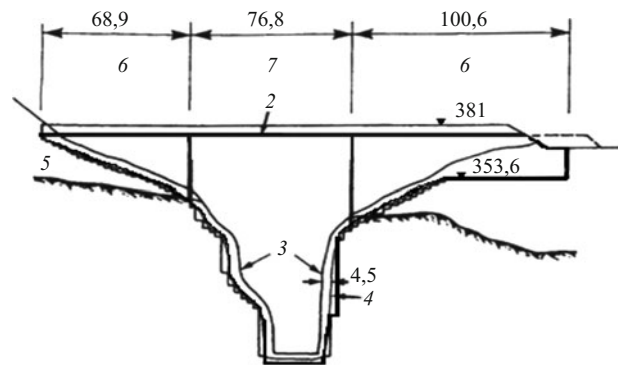


**Рис. 5.** Результаты контрольного бурения в ядре плотины, вскрывшие зоны разуплотнения и трещины:

1 — зоны разуплотненного грунта ядра по данным бурения; 2 — зоны грунта ядра с относительно низкой плотностью по данным геофизических исследований; 3 — зоны поступления и потерь воды при бурении, а также потерь раствора в скважине RD-60

средоточенной фильтрации, является плотина Титон [13, 14]. Каменно-земляная плотина высотой 93 м, длиной по гребню 760 м и объемом 7,65 млн. м<sup>3</sup> была построена в 1975 г. на р. Титон (притоке р. Снейк) в штате Айдахо. Основание плотины, сложенное риолитами, имеет тектонические нарушения, значительную трещиноватость и отдельные пустоты. Ядро плотины состояло из смеси глинистых илов, песка, гравия и каменных отделистей. Со скальным основанием ядро сопрягалось зубом-траншеей глубиной до 30 м. В береговых примыканиях глубина траншей составляла до 21 м при ширине поверху 9 м. Инъекционная завеса общей длиной 930 м была выполнена трехрядной при глубине скважин до 91 м. Шаг скважин в наружных рядах 6 м, в центральном ряду 3 м. В русловой части створа шаг скважин во всех рядах 3 м. Первый сигнал о грозящей опасности был получен 3 июня, когда в правобережной части плотины со стороны нижнего бьефа появился выход фильтрации с расходом около 75 л/мин. 5 июня к 9 ч утра фильтрация заметно увеличилась и расход воды уже составлял 1,4 – 1,7 м<sup>3</sup>/с. В 9 ч 30 мин расход равнялся уже 2 м<sup>3</sup>/с. Было дано распоряжение об эвакуации населения из трех городов, расположенных ниже плотины: Ньюдейл, Титон и Рексбург. В 10 ч 30 мин положение резко ухудшилось, через плотину фильтровало уже около 28 м<sup>3</sup>/с. Началось интенсивное разрушение плотины. В течение последующих 30 мин было вынесено порядка 40 % объема плотины. К 12 ч плотина оказалась разрушенной. Этапы разрушения показаны на рис. 1.

Волна прорыва затопила и размывла 120 тыс. га земель в нижнем бьефе. Были разрушены тысячи зданий предприятий и жилых домов, погибли 11 человек, 2 тыс. были ранены, 30 тыс. человек оста-



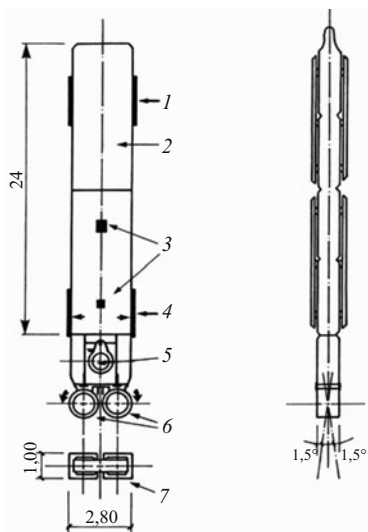
**Рис. 6.** Продольное сечение по стенке-диафрагме, выполненной в ходе ремонта плотины Мад Мауэнтин:

1 — гребень плотины; 2 — отметка, с которой велись ремонтные работы; 3 — стенки каньона; 4 — минимальная глубина врезки в скалу; 5 — зона основания выше материковой скалы; 6 — стенка-диафрагма шириной 0,85 м; 7 — стенка-диафрагма

лись без крова. Были разрушены коммуникации; занесены илом дороги, сельскохозяйственные угодья, ирригационные каналы; вырваны деревья; разрушены ограждающие дамбы. Общий ущерб по разным данным составил порядка 1 млрд. долл. В первом же отчете специального комитета по расследованию аварии плотины указывалось на пять возможных причин, но все они сводились к возникновению ходов сосредоточенной фильтрации, а именно: 1) значительная фильтрация воды через инъекционную завесу и особенно в месте сопряжения насыпи плотины со скальным основанием в правобережном примыкании; 2) фильтрация воды через ядро по контакту ядра со скалой в правобережном примыкании; 3) фильтрация воды через ядро выше основания зуба-траншеи в месте сопряжения ядра со скалой; 4) фильтрация воды через поперечные трещины в ядре в правобережной части насыпи; 5) значительная фильтрация воды по трещинам в скальном массиве в обход инъекционной завесы и по контакту насыпи плотины со скалой в правобережном примыкании. Нужно отметить, что практически все комиссии, участвовавшие в анализе причин аварии, имели замечания, относящиеся к проекту плотины, полагая, что именно отмеченные в замечаниях причины могли способствовать возникновению сосредоточенной фильтрации.

Авария плотины Титон еще раз подчеркнула чрезвычайную опасность возникновения ходов сосредоточенной фильтрации в грунтовых плотинах, тем более сопровождающихся выносом частиц грунта. В американской практике и до плотины Титон встречались подобные примеры нарушения фильтрационной прочности, но тогда были приняты срочные меры, позволившие остановить разрушительный процесс и затем отремонтировать плотины.

Известно, что при необходимости проведения ремонтных мероприятий в случае нарушения



**Рис. 7.** Схематический чертеж гидрофрезы “12000” фирмы “Солетанш”:

1 — верхние продольные направляющие, приводимые в действие домкратами; 2 — инклинометры; 3 — нижние продольные направляющие; 4 — насосы; 5 — направления вращения режущих колес; 6 — размер траншеи в плане; 7 — пределы отклонения при бурении  $\pm 1,5^\circ$

фильтрационной прочности грунтовых плотин обычно применяют ряд мер, таких, как пригрузки глинистыми грунтами верховых откосов плотин, а также экранирование как поверхности верховых откосов, так и поверхности основания перед плотинами с целью кольматажа ходов фильтрации. Может оказаться полезным дренирование фильтрующей воды и ее организованный отвод. Наиболее часто применяют инъецирование в поврежденные участки тела плотин и оснований цементных, глиноцементных, силикатных и химических растворов с разного рода наполнителями. Однако с помощью этих мер не всегда удается полноценно отремонтировать плотины. Наиболее надежным решением, как показывает практика, является возведение стенок-диафрагм, выполняемых способом “стена в грунте”, когда для проходки скважин большого диаметра или ограниченных участков траншей используют специальные буровые установки, грейферы или гидрофрезы. В качестве примеров плотин, надежно отремонтированных с помощью такого способа, следует прежде всего назвать такие, как Боулдерхэд (Великобритания), Курейская (Россия) и еще три плотины в США — Фонтенель, Навахо и Мад Мауэнтин.

Грунтовая плотина Боулдерхэд с центральным ядром из валунных глин и призмами из сланцев была построена в 1965 г. Высота плотины 48 м, длина по гребню 914 м. Основание сложено сланцами. Под ядром располагается зуб-стенка шириной 1,8 м и глубиной до 25 м. Под зубом цементационная завеса еще на глубину до 30 м. В процессе наполнения водохранилища (1964 – 1966 гг.) расход фильтрующейся воды к моменту, когда уровень

водохранилища достиг НПУ, составлял 55 л/с. Во время наблюдений, продолжавшихся в 1967 – 1968 гг. отмечалось, что мутность воды постепенно увеличивалась, появились оползни на низовом откосе и провал до 2,5 м на гребне плотины. Контрольное бурение показало, что в ядре есть поврежденные зоны, материал сегрегирован, мелкие частицы грунта частично вынесены за счет суффозии. Было принято решение о ремонте. Перед ремонтом уровень водохранилища был снижен. Ремонт включал вначале цементацию с целью заполнения образовавшихся в ядре трещин, а затем сооружение стенки-диафрагмы из грунтобетона толщиной 0,65 м (рис. 2). Материал стенки был подобран соответствующим по деформируемости окружающему грунту с целью отвечать деформациям ядра без возникновения трещин. Состав смеси: портландцемент (12 %), бентонит (2,5 %), заполнитель (85,5 %). Вода — 24 %. Коэффициент фильтрации диафрагмы составлял  $10^{-6} - 10^{-4}$  см/с. Траншеи глубиной до 45 м проходили с помощью грейфера. После ремонта водохранилище наполняли до НПУ постепенно в течение полутора лет. С тех пор плотина работает в штатном режиме [8, 15].

В Российской Федерации с помощью “секущихся” свай в 1999 г. был осуществлен ремонт на аварийном участке русловой плотины Курейской ГЭС. Каменно-земляная русловая плотина максимальной высотой 81,5 м и длиной по гребню 1576 м была возведена вместе с тремя другими плотинами гидроузла к 1990 г. 26 июля 1992 г. на участке в районе ПК7+00 произошел прорыв напорного фронта. Расход составлял 1730 л/с. На гребне плотины возникли трещины и понижения, на низовом откосе — провал глубиной 0,5 м, диаметром около 10 м. Немедленно был начат сброс воды из водохранилища. После снижения уровня на 5 м расход воды снизился до 200 л/с. Затем на гребне плотины в зоне прорыва выполнили трехрядную цементационную завесу. Принятые меры позволили локализовать повреждение плотины, но для приведения ее в рабочее состояние в последующем был проведен ремонт с устройством по оси плотины на длине 94 м стенки-диафрагмы из “секущихся” свай диаметром 1200 мм. Бурение скважин вели с опережающей обсадкой трубами и их извлечением по мере бетонирования. Работу осуществили с помощью установки “Казагранде С-60” итальянского производства. Машина была укомплектована грейфером, шнековым буром, ковшовым буром и крестовым долотом. Максимальная глубина стенки в зоне аварийного участка ядра плотины составила 35 м. Заглубление в плотный грунт под ядром плотины достигало 8 – 10 м [16]. Состав грунтоцементного материала, использованного для заполнения свай, был следующим:

*Портландцемент ПЦ-400Д20 140 кг/м<sup>3</sup>;*



*Бентонит порошок черногогорского месторождения марки ПБН по ТУ 39-202 120 – 130 кг/м<sup>3</sup>;*  
*Песок, модуль крупности  $M_n = 2,0$*   
*620 – 630 кг/м;*  
*Гравий Березовского карьера фракции 5 – 20 мм*  
*920 – 930 кг/м<sup>3</sup>;*  
*Пластифицирующая добавка ЛСТ 0,42 кг/м<sup>3</sup>;*  
*Вода 380 – 390 кг/м<sup>3</sup>.*

В 1984 г. в США был выполнен ремонт плотины Фонтенель. Гравийно-галечниковая плотина с супесчано-суглинистым ядром высотой 50 м и длиной по гребню 2000 м была построена на р. Грин в штате Вайоминг. Основание плотины сложено твердыми трещиноватыми песчаниками. При первом наполнении водохранилища в 1964 г. возникли течи в нескольких местах у правого берега и оползень на низовом откосе плотины на половине ее высоты. Сразу же провели лечение переуложив грунт в зоне оползня и выполнив восьмиметровую цементационную завесу в массиве скального берега с заходом на гребень плотины. После проведенных мероприятий плотина некоторое время работала нормально, однако в 1982 г. фильтрация снова увеличилась и появились признаки суффозии. После анализа данных, полученных с помощью шурфов и по показаниям пьезометров, было решено выполнить стенку-диафрагму на всю высоту плотины — от основания до гребня. Перед началом ремонта уровень водохранилища был понижен. Отдельные траншеи под стенку глубиной 55 м и шириной 0,65 м выполняли с помощью гидрофрезы фирмы “Солетанш”. Стенку из жесткого бетона уложили в два этапа: в 1985 г. была выполнена стенка площадью 10 тыс. м<sup>2</sup>, в 1986 г. — 6 тыс. м<sup>2</sup> [17].

Гравийно-галечниковая плотина Навахо с центральным ядром (призмой) из илисто-глинистых грунтов с примесью песка и гравия была построена в 1962 г. на р. Сан Хуан в штате Нью Мехико (США). Высота плотины 123 м, длина по гребню 1112 м. Основание сложено трещиноватыми песчаниками с прослоями сланца. Сильная фильтрация возникла сразу же после первого наполнения водохранилища в 1963 г. Расход составлял порядка 120 л/с. Исследования показали, что цементационная завеса работала неудовлетворительно, возник риск аварии, так как ядро было возведено из суффозионного грунта. Положение осложнялось наличием горизонтальных и вертикальных трещин в скале бортовых примыканий в зоне контакта с ядром плотины. Риск возникновения неконтролируемой фильтрации на контакте со скалой был очевиден. В качестве ремонтных мероприятий было решено на правом берегу у водослива выполнить дополнительный дренаж, а у левого берега возвести стенку-диафрагму от основания до гребня плотины высотой до 120 м и длиной 140 м. Траншею выполнили с помощью гидрофрезы фирмы “Солетанш”.

танш”. Беспрецедентная глубина потребовала создания специальной конструкции гидрофрезы и разработки уточненной технологии как бурения, так и бетонирования траншеи. В результате в 1987 г. стенка-диафрагма площадью 11 тыс. м<sup>2</sup> была выполнена без каких-либо осложнений [18].

Особенно показательным примером является ремонт каменно-земляной плотины Мад Мауэнтин, построенной в 1953 г. на р. Уайт в штате Вайоминг [19, 20]. Высота плотины 128 м, длина по гребню 213 м. Плотина возведена в узком каньоне с крутыми бортами, поднимающимися на высоту 60 м и более (рис. 3). Скальное основание под плотиной и борта каньона сложены трещиноватыми андезитами с прослоями туфа. Ядро плотины состоит из смеси глин (20 %) с песком и гравийно-галечниковым материалом (80 %). Переходные зоны выполнены из дробленого диорита (< 100 мм). В упорные призмы каменная наброска поступала из карьеров, где 45 – 55 % каменных отдельностей весили до 450 кг, 25 – 35 % — от 450 до 1360 кг, 15 – 25 % — от 1360 до 4540 кг. В процессе строительства русло реки под плотиной было расчищено от русловых отложений на всю глубину каньона до скального основания (рис. 4). При этом неровности поверхности бортов были сглажены, скальные выступы убраны, а углубления заделаны бетоном.

На первом этапе эксплуатации гидроузла замечаний к работе плотины не было. Но позже, в начале 1980-х гг., наблюдения по пьезометрам показали, что в ядре увеличались градиенты фильтрации и, возможно, образовались ходы сосредоточенной фильтрации, а также зоны, где мелкие частицы грунта могли быть вынесены. Опыты с наливом воды в пьезометры показали хорошую гидравлическую связь между пьезометрами на большей части центральной зоны плотины. Эксперты предположили, что это результат внутренней эрозии и появления ходов фильтрации, которые могли возникнуть из-за не вполне качественной работы переходных зон, неравномерных деформаций и влияния арочного эффекта в ядре в зоне каньона. Для проверки возникших предположений выполнили контрольное бурение, подтвердившее имевшиеся опасения (рис. 5). В результате анализа сложившейся ситуации было принято решение о необходимости ремонта плотины. Из нескольких вариантов был выбран вариант, разработанный Корпусом военных инженеров США, включавший создание по оси плотины грунтоцементной стенки-диафрагмы, выполняемой методом “стена в грунте” по технологии фирмы “Солетанш”. Глубина стенки достигала 120 м при ширине в центральной части плотины 1 и 0,85 м на участках, примыкающих к бортам долины. Заглубление в скальное основание было принято до 4,5 м (рис. 6). Проходку отдельных траншей размером 2,8 × 1,0 м наметили выполнять с помощью гидрофрезы “12000” (фирма “Солетанш”) ве-

сом 45 т, стандартная конструкция которой была специально модернизирована для этой работы. Схематический чертеж этой гидрофрезы представлен на рис. 7. В верхней головной части гидрофрезы располагается блок управления, предназначенный для контроля отклонений от вертикали. Была применена специальная электронная система для постоянного слежения за параметрами бурения при проходе траншей и за положением гидрофрезы в пространстве, что позволяло корректировать проходку — изменять скорость вращения режущих агрегатов, оценивать качество пород в процессе проходки. Были предусмотрены также и другие методы контроля, например проверка состояния горных пород в стенках траншеи при ее проходке.

При выемке первых же траншей выяснилось, что их стенки неустойчивы и, несмотря на то что бурение проходит под бентонитовым раствором, происходят вывалы, раствор уходит. В связи с этим было решено упрочнить материал ядра, выполнив уплотнительную и барьерную цементации по программе, специально разработанной фирмой “Соле-танш”. Программа включала уплотнительную цементацию (gravity grouting) в один ряд по оси будущей стенки с шагом скважин 1,5 м и еще два ряда скважин барьерной цементации с шагом 1,8 м (recompression grouting), проходящих на расстоянии 1,5 м выше оси стенки и на 2,5 м ниже. Благодаря выполнению этой программы удалось уплотнить материал ядра так, что при последующей проходке глубоких траншей гидрофрезой особых трудностей не возникало и стенку-диафрагму удалось выполнить в полном объеме (рис. 6). Для надежности сопряжения отдельных панелей между собой величина их врезки друг в друга была увеличена до 36 см. Пятнадцать панелей имели глубину более 100 м, наиболее глубокая 122,5 м. Максимальное боковое отклонение при бурении составило 20 см (т.е. менее 2 % при глубине 120 м) при среднем отклонении 7 см. После ремонта плотина работает в штатном режиме.

## Выводы

Аварийные состояния грунтовых плотин, возникающие в связи с выходами неорганизованной фильтрации в пределах их тела или основания и грозящие непредсказуемыми последствиями, — явления нередки в гидротехнической практике. В случаях, когда по мнению специалистов это не представляет значительной опасности, ремонт таких плотин с целью ликвидации выходов фильтрации или их организованного оформления может осуществляться достаточно недорогими и доступными способами — каптированием, устройством дренажей, пригрузками на откосах, отсыпкой грунтов специального состава со стороны верхнего бьефа на откос и основание перед плотиной с целью коль-

матажа возможных входов фильтрующейся воды, но в основном инъектированием растворов требуемого состава и т.д. В случаях, вызывающих серьезные опасения нарушения фильтрационной прочности, учитывая значительный международный и уже имеющийся отечественный опыт, плотины могут быть надежно отремонтированы с помощью устройства стенок-диафрагм методом “стена в грунте”.

## Список литературы

1. ICOLD. Dam failures. Statistical analysis // Bulletin № 99. 1995.
2. ICOLD. Rocha M. (editor). Deterioration of dams and reservoirs. Examples and their analysis. — A. A. Balkema / Rotterdam / Brookfield. 1984. 367 p.
3. Чугаев П. П. Земляные гидротехнические сооружения. — Л.: Энергия (Л. о.), 1967. 459 с.
4. Праведный Г. X. Руководство по расчетам фильтрационной прочности плотин из грунтовых материалов: П55 – 76 / ВНИИГ. Л., 1976. 79 с.
5. Жиленков В. Н. Руководство по расчету фильтрационной прочности грунтовых сооружений и их оснований: П59 – 94 / ВНИИГ. СПб., 1995. 108 с.
6. Leonards G., Narain J. Flexibility of clay and cracking of earth dams. Proc ASCE. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. V. 89, NO. SM2, March 1963, Part 1, PP. 47 – 97.
7. Sherard J. L., Woodward R. J., Gizienski S. F. and Clevenger W. A. Earth & Earth-Rock Dams // John Wiley and Sons. Inc. 1963. 725 p.
8. Sherard J. L. Embankment dam cracking. Embankment-Dam Engineering. Casagrande Volume // John Wiley & Sons. 1973. P. 271 – 348.
9. Тейтельбаум А. И., Мельник В. Г., Савина В. А. Трещинообразование в ядрах и экранах каменно-земляных плотин. — М.: Стройиздат, 1975. 165 с.
10. Айрантян П. А. Проектирование каменно-земляных и каменнонабросных плотин. — М.: Энергия, 1975. 326 с.
11. Розанов Н. Н. Плотины из грунтовых материалов. — М.: Стройиздат, 1983. 295 с.
12. Wan C. F., Fell R. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. Proc. ASCE // Journal of Geotechnical and Geo Environmental Engineering. V. 130. № 4. P. 373 – 380.
13. Авария плотины Титон и ее причины (США) // Гидротехническое строительство. 1978. № 8. С. 49 – 51.
14. Finer Teton reports faults designer // Engineering News-Record. 1980. V. 204. № 7. P. 31.
15. Voughan P. R., Kluth D. J., Leonard M. W., Pradoura H. H. M. Cracking and erosion of the rolled clay core of Balderhead dam and the remedial works adopted for its repair // 10-th ICOLD Congress. V. 1, Q. 36. R. 5. PP. 73 – 93.
16. Федосеев В. И., Шишов И. Н., Пехтин В. А. и др. Противоплотинные завесы гидротехнических сооружений на многолетней мерзлоте. — СПб: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2009. Т. 1, 2.
17. Bellport B. P. Bureau of Reclamation experience in stabilizing embankment of Foutenelle earth dam // 9-th ICOLD Congress. 1967. Q. 32, R. 5. PP. 67 – 79.
18. Jansen R. B. Assessment of potential detriment of leakage through the foundations of existing embankment dams // 18-th ICOLD Congress. 1994. Q. 68. R. 18. PP. 1375 – 1388.
19. Graybeal K. D. Seepage control at Mud Mountain dam // 16-th ICOLD Congress. 1988. Q. 61. R. 29. PP. 557 – 570.
20. Graybeal K. D., Levallois F. Construction of a cut off wall with the hydrofraise through the core of Mud Mountain dam // 17-th ICOLD Congress. 1991. Q. 66. R. 49. PP. 879 – 908.

## Безопасность плотин на примере диагностики основания строящейся Богучанской ГЭС

Калустьян Э. С., доктор технических наук

Обеспечение безопасности напорных гидротехнических сооружений является одной из основных задач системы эксплуатационного контроля. Безопасность гидротехнических сооружений определяется техническим состоянием объекта – его надёжностью, а также опасностями для населения на участке расположения сооружения и персонала гидроузла в случае повреждения или разрушения сооружения. Обеспечение надёжности – недопущение опасностей для населения и персонала ГЭС, т.е. безопасности ГЭС, достигается диагностикой состояния строящегося или эксплуатируемого сооружения по результатам анализа данных натурных наблюдений.

Практика использования диагностики в широком смысле сегодня позволяет констатировать, что при потенциально высоком риске неблагоприятных последствий аварии, современные высокие плотины относятся к сооружениям с низкой величиной реализуемого технического, социального и других рисков. Так, реализованная величина технического риска аварии высокой плотины достигает  $10^{-3}$  по повреждению и  $10^{-4}$  по разрушению, при этом реализованный социальный риск гибели людей при разрушении плотины может быть ориентировочно

оценен  $10^{-7}$  (один из десяти миллионов человек). Реализованный материальный риск (убытки) при разрушении плотины, как правило, на порядок превышает стоимость сооружения, который при крупном повреждении может быть сопоставим со стоимостью плотины. Отметим, что это не самая высокая величина социального риска от техногенных катастроф. К примеру, риск гибели в результате аварии на автомобильном транспорте на три порядка выше и составляет  $10^{-4}$ . Однако население стремится к обладанию личным автотранспортом, поскольку это считается элементом комфорта жизнедеятельности человека.

Социальный риск от природных катастроф, связанных с водной средой существенно выше, чем при разрушении плотин. По нашим подсчётам реализованная его величина составляет  $10^{-5} \div 10^{-6}$ . Разрушения и повреждения плотин от различных внешних воздействий и свойств сооружения продолжают фиксироваться, что требует **постоянного** совершенствования существующих критериев оценки надёжности плотин, изучения вновь фиксируемых сценариев аварий и их причин, повышения квалификации эксплуатационного персонала ГЭС, пополнения банка данных по авариям, и т.д.

Модель для оценки риска отказов бетонной плотины

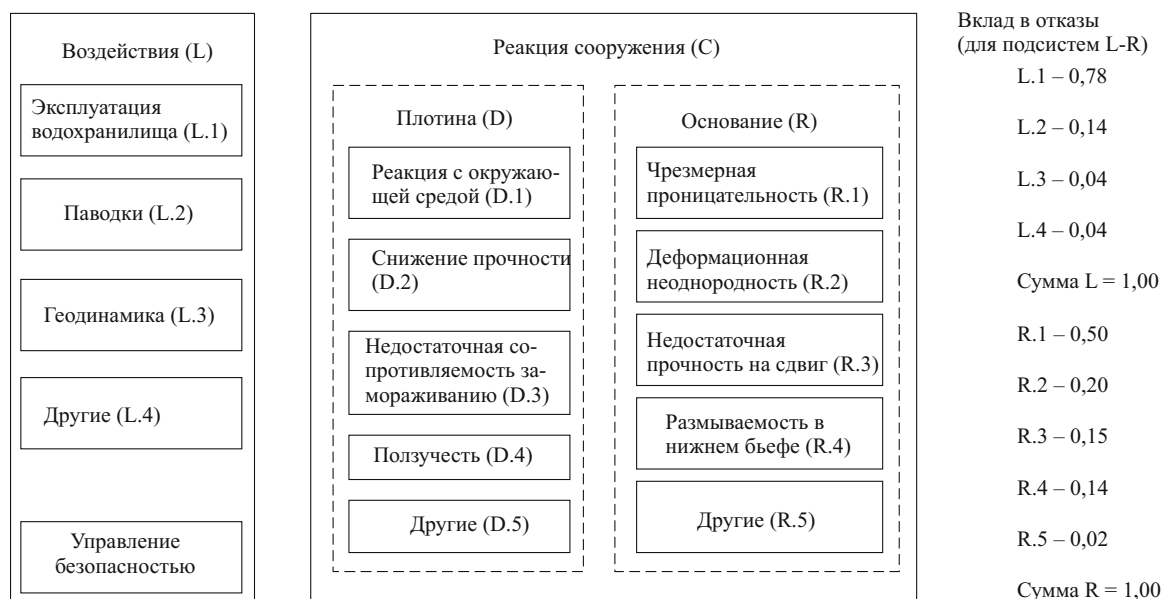


Рис. 1. Оценка риска отказов по многофакторной модели



Рис. 2. Состояние керна долерита из скважины в секции 25

**Надёжность и безопасность плотин** проблема актуальная. Значение проблемы обеспечения безопасности существующих напорных ГТС возрастает с увеличением количества плотин, их старением, ростом численности населения в нижнем бьефе плотин. Подтверждение сказанному свидетельствует не снижающееся количество человеческих жертв и материальных убытков от природных и техногенных катастроф, связанных с водной средой. Так, в результате разрушительного землетрясения в мае 2008 г. в Китае погибло 86 тыс. человек [1], последствия землетрясения отмечены на 2473 водохранилищах и 822 ГЭС.

Проблема безопасности плотин актуальна и для РФ. Катастрофическая авария на крупнейшей в компании РусГидро и в России Саяно-Шушенской ГЭС вследствие отказа оборудования послужила причиной гибели 75 человек эксплуатационного персонала, ещё 13 человек пострадали, убытки на сентябрь 2009 г. были определены в размере 7,34 млрд. рублей. Возможности других электроэнергетических компаний, в собственности которых находится не меньшее, чем в РусГидро число высоких плотин и водохранилищ в решении вопросов безопасности ГТС менее известны. Всего же в Регистре плотин РФ насчитывается 26 тыс. ГТС, из которых в Федеральной собственности находится примерно 2,0 тысячи сооружений. Согласно инвентаризации ГТС на 2005 г. по последним данным Регистра почти 8 тысяч сооружений не имеют деклараций безопасности.

Безопасность водохранилищных плотин в условиях рыночных отношений в РФ регулируется Законом №117-ФЗ “О безопасности гидротехнических сооружений”, который был принят в 1997 г.

после разрушения в 1993 – 1994 гг. Киселёвской и Тирлянкой плотин, входивших в состав металлургических предприятий Свердловской области. В результате разрушения этих плотин в общей сложности погибло 85 человек, а убытки в ценах соответствующих лет превысили 93 млрд. руб. Террористический акт на Боксанской ГЭС в 2010 г., в результате которого погибли два человека, травмирован обслуживающий персонал, а гидроагрегаты выведены из эксплуатации, свидетельствует о необходимости учёта подобных сценариев на других объектах гидроэнергетики.

**Надёжность плотин обеспечивается диагностикой состояния сооружений.** Диагностические параметры состояния плотины и критерии их безопасности должны быть определены в проекте сооружения. В процессе строительства и эксплуатации необходимо следить за соблюдением не превышения проектных значений диагностических параметров и критериев безопасности и в случаях их несоответствия выяснять причины выявленных отклонений. Из сказанного выше очевидно, что одной из задач обеспечения безопасности ГТС и в частности задачей натурных наблюдений и специализированных обследований является разработка рекомендаций по обеспечению надёжности каждого конкретного сооружения в эксплуатации, как и в период строительства и на начальном этапе эксплуатации сооружения.

Повреждение плотин по причинам экстремальных природных или техногенных явлений довольно частое явление. В этих условиях выявление и профилактика повреждений на ранних стадиях их возникновения остаётся важнейшей задачей наблюдений и обследований. Успешное решение задач диагностики – напрямую связано с квалификацией специалистов, выполняющих натурные наблюдения. Системная многофакторная оценка взаимодействия ГТС с окружающей средой при отказах, уроки аварий, информация по которым накапливается в специальных банках данных, позволяет повысить достоверность оценки возможного влияния различных опасностей технического и управленческого характера в условиях эксплуатации сооружения в экстремальных условиях (рис. 1) [2]. Отмеченные выше отказы на ГЭС компании РусГидро по классификации отказов в системе “сооружение - внешняя среда” напрямую связаны с подсистемой “управление безопасностью”.

Использование диагностирования для обеспечения надёжности, рассмотрим на примере результатов натурных наблюдений за основанием сооружений напорного фронта Богучанской ГЭС.

**Река Ангара** в течение более 60 лет является объектом гидроэнергетического строительства. Первенец гидроэнергетики на Ангаре – Иркутская

ГЭС была построена в 1958 г.; следующая ступень – Братская ГЭС на Ангаре введена в 1967 г., а Усть-Ильимская ГЭС находится в эксплуатации с 1980г. Сегодня на завершающей стадии строительства находится Богучанская ГЭС, проект которой разрабатывался с учётом требований надёжности и безопасности, действовавших в РФ в 80-е годы прошлого столетия.

Сооружения напорного фронта гидроузла протянулись на 2690 м, основание которых на длине 1920 м представлено долеритами, остальную часть основания занимают осадочные породы [4]. Состояние и особенности свойств осадочных пород на правом берегу определены близостью интрузии долеритов. Бетонная гравитационная плотина в левобережном примыкании длиной 828,7 м и полностью расположена на скальном основании, представленном долеритами. Особенность скальных пород основания бетонной плотины определена наличием в долеритах русловой части реки группы набухающих минералов. Разгрузка таких пород при вскрытии котлована вызывала сильное разуплотнение скального массива, особенно в секциях 23 – 34, вплоть до образования щебенки (рис. 2). С самого начала работ в котловане строящейся бетонной плотины были организованы натурные наблюдения за деформациями поверхностной и активной областей. Основание каменно-набросной плотины до ПК 19+20 возводится на долеритах, а от ПК 19+20 до правобережного примыкания представлено толщей осадочных пород.

На сложные инженерно-геологические условия основания сооружений напорного фронта Богучанской ГЭС наложились суровые климатические условия Сибири, когда колебания температуры наружного воздуха в течение года превышают 90 °С. Например, в течение семи месяцев 2008 – 2009 гг. перепад температуры достиг рекордной величины за всё время наблюдений, составив - 98 °С (от +46 °С до -52 °С).

В процессе наблюдений одновременно с измеряемыми деформациями скалы, отслеживаются температуры наружного воздуха, воды реки Ангары и основания как поверхностной с бетоном плотины области, так и по глубине скального массива.

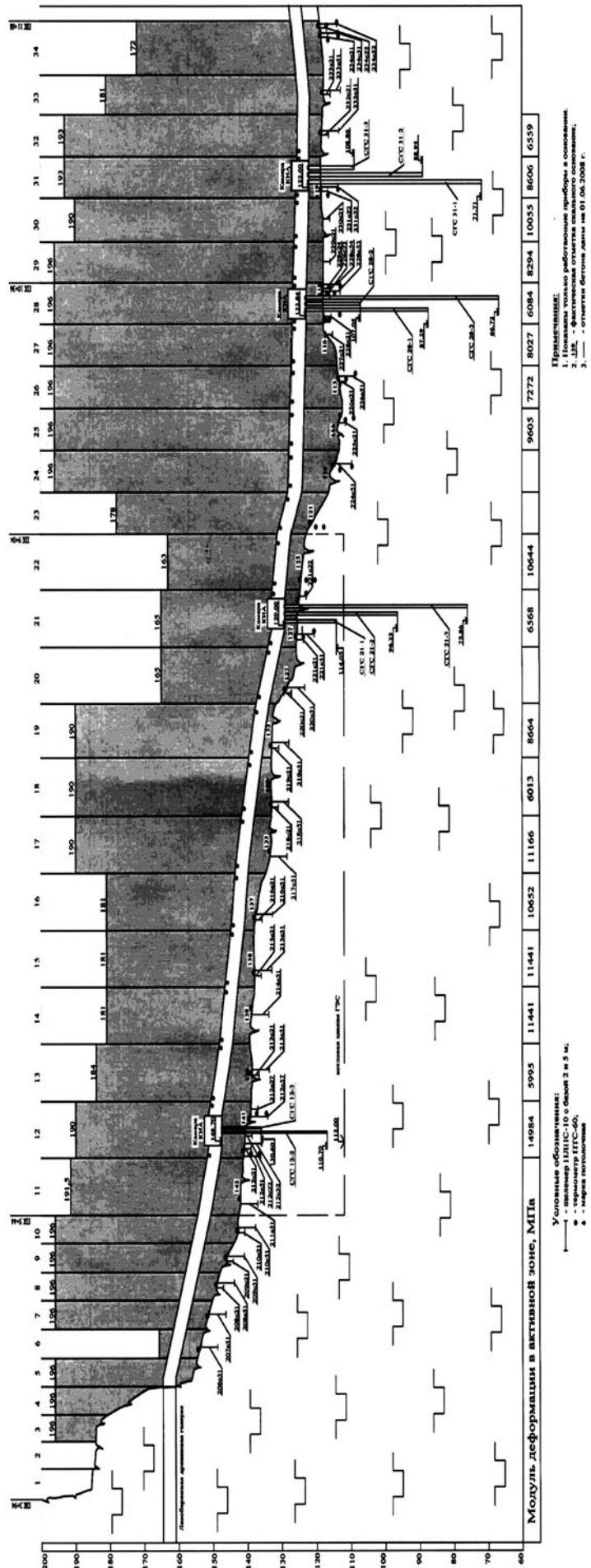


Рис. 3. КИА в основании бетонной плотины Богучанской ГЭС

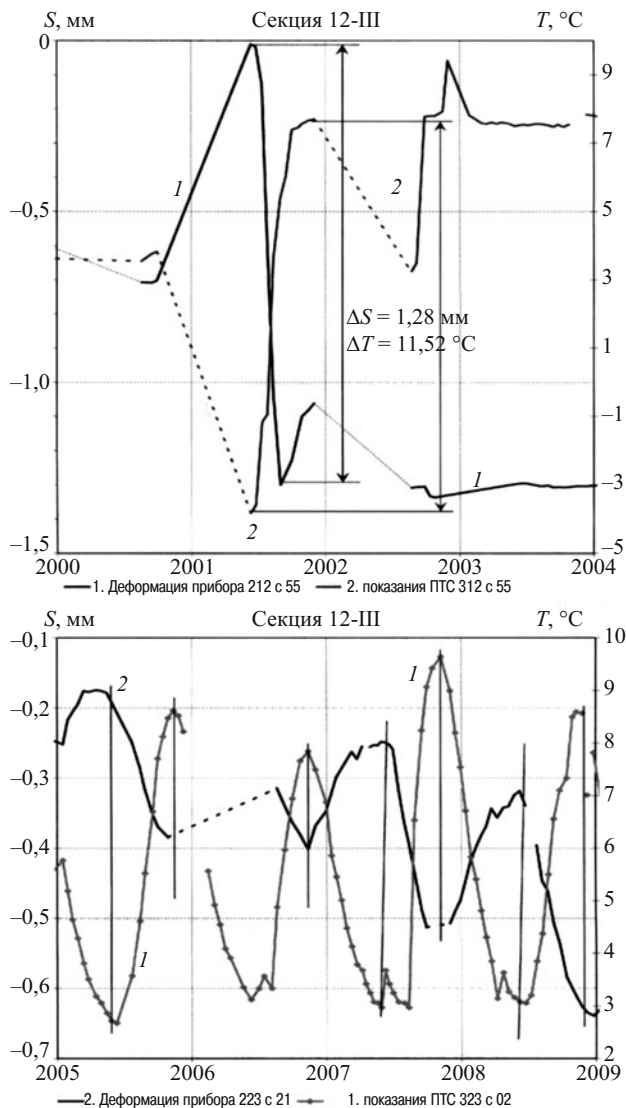


Рис. 4. Влияние температуры наружного воздуха на деформации приконтактной зоны

Оказалось, что температурные перепады в подобных условиях создают дополнительную нагрузку на основание, а с учётом особенностей ослабленной части долеритов, как представляется, способствуют разуплотнению скалы на участках неприкрытого скального массива и являются фактором активного его старения. На рис. 3 показано влияние температурных перепадов на деформации скалы в поверхностной области некоторых секций: образование трещин и изменение деформаций.

В таких условиях, ещё до наполнения водохранилища, создаётся вероятность реализации сценария образования трещин в основании со стороны напорной и низовой граней плотины уже на стадии строительства. Диагностика состояния поверхностной части основания бетонной плотины Богучанской ГЭС приобретала особое значение, т.к. позволила выделить области возможного разуплотнения основания и заблаговременно принять необходи-

мые меры по недопущению развития трещинообразования [2]. К одному из таких мероприятий можно отнести засыпку траншеи со стороны напорной грани плотины в секциях 11 – 20, что привело к повышению температур основания указанных секций до положительных значений.

**Важнейший позитивный фактор** - нагрузка от веса уложенного бетона на основание бетонной плотины за исключением участка здания ГЭС в настоящее время повсеместно превысила разгрузку, вызванную съёмом породы при разработке котлована под сооружения. Естественные напряжения при разработке скалы в котловане секций 24 – 34 бетонной плотины были компенсированы уже к 1990 г., а в секциях 6 – 24 этот процесс продолжался вплоть до 2000 г. Наибольшие величины напряжений по подошве основания достигнуты в первых столбах секций 24; 25 и 26, которые составили соответственно 2,30; 2,26 и 2,19 МПа. Наименьшее среднее напряжение в основании секции 7 составило 0,51 МПа. Перед укладкой бетона в тело плотины в основании большинства секций осуществлялась установка дистанционной струнной и геодезической КИА. Приборы устанавливались в скважинах скального основания на расстоянии 1 ÷ 3 м от напорной и низовой граней. Глубина скважин составляла 2 – 5; 7,5 м. В настоящее время измерение относительных деформаций и температуры в поверхностной области основания производится практически во всех 34 секциях бетонной плотины (рис. 3, 4).

Осадки в активной области с 1985 г. определяются нивелированием потолочных марок в галерее бетонной плотины. Заблаговременно установленная в основании бетонной плотины КИА эксплуатационного периода и наблюдения по ней за деформациями позволили отслеживать особенности развития процесса формирования осадок во времени.

**Напряженно-деформированное состояние системы “сооружение-основание”** в строительный период при действии гравитационных факторов, как и при действии на неё расчётных нагрузок в эксплуатации, формируется под действием уложенного бетона в тело плотины и температурных колебаний. Диагностическим параметром являются деформации основания. Укладка бетона в тело плотины была начата в конце 1982 г. Наиболее характерные особенности в состоянии приповерхностной области скального массива фиксируются со стороны верховой и низовой граней плотины. В процессе диагностики выделены особенности деформирования отдельных участков скального массива под весом бетона плотины.

**Левобережные глухие секции 6 – 10.** Деформации поверхностной 2 – 5 метровой области основания секций 6 – 10 при изменении нагрузок от бе-

тона плотины по состоянию на 2010 г. в интервале от 1,09 до 1,58 МПа увеличились с 0,56 мм (206 с. 51) до 5,27 мм (208 с. 51). Напорный фронт бетонных сооружений бетонной плотины в 2006 г. был замкнут в секции 9. До этого основание секции использовалось в качестве строительного проезда из верхнего в нижний бьеф.

В течение всего периода наблюдений в основании секций 6 – 10 со стороны верховой грани плотины фиксировались устойчивые отрицательные значения температур. В настоящее время такое положение сохраняется в основании секции 8, при этом минимальная температура в 2010 г. в основании секции 8 составила  $-2,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Станционные и водосливные секции 11 – 29.** В основании этих секции на длине 504 м при увеличении нагрузки в основании первых столбов до 2,30 МПа деформации поверхностной области основания изменились от наименьшего значения 2,11 мм (секция 12 – 1) до наибольшего – 9,98 мм (секция 19)

В 1996 – 2005 гг. в период практического постоянства нагрузок от уложенного бетона в поверхностной области основания секций 11 – 23 отмечено приращение относительных деформаций до 0,42 мм.

С апреля 2006 г. в основании секций, где была возобновлена укладка бетона, приращение деформаций поверхностной области основания заметно выросло. При этом деформации основания как видно из рис.5 соответствуют приращению нагрузки.

По результатам нивелирования потолочных марок, установленных в своде галереи бетонной плотины в 2010 г., осадки основания составили 9,90 мм (секция 12 – 2) до 22,3 мм (секция 29 – 2).

В 2007 г. для контроля деформаций “бетон – скала” в основании водосброса №2 в секции 21-IV были установлены скальные деформометры. За время наблюдений четыре из пяти датчиков фиксируют разуплотнение основания по величине составляющее от 0,01 до 0,46 мм. Подобное поведение скальных деформометров до этого не отмечалось в основании ни одной из 39 секций бетонной плотины. Разуплотнение основания в котловане секции 21-IV наблюдалось до августа – декабря 2010 г., когда под весом укладываемого бетона на водосбросе началось уплотнение основания.

**Секции 30 – 34 переходного участка к каменнонабросной плотине.** Деформации поверхностной области основания указанных секций при изменении напряжений от 1,85 МПа до 2,14 МПа изменились в диапазоне от 2,64 до 9,76 мм. В активной области осадки достигли 15,4 – 26,8 мм. Температуры скального массива основания рассматриваемых участков на всех наблюдаемых глубинах положительные.

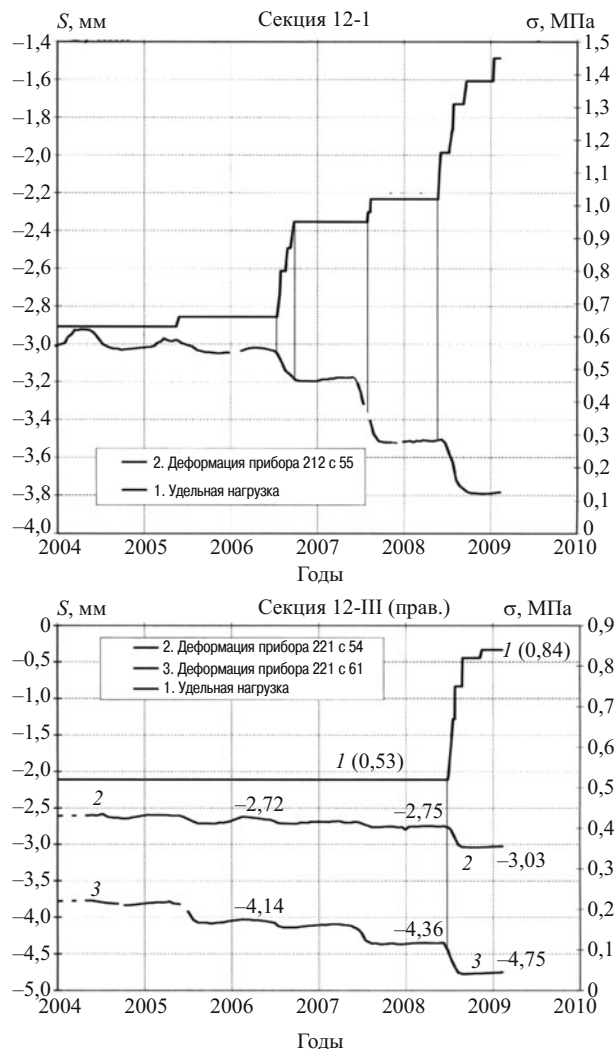


Рис. 5. Влияние нагрузок от бетона на деформации приконтактной зоны

В целом осадки поверхностной и активной областей основания под действием веса бетонной и каменно-земляной плотины дают полезный исходный материал для сравнения с проектными данными.

**Модули деформации основания бетонной плотины** по данным натурных наблюдений должны быть сопоставлены с величинами использованными в проекте. Они необходимы для оценки надёжности сооружения. При различных соотношениях модуля деформации основания и плотины могут создаваться условия для реализации риска повреждения, например в виде трещинообразования в контактной области плотины и основания. Одной из целей специальных натурных наблюдений на Богучанской бетонной плотине было определение модулей деформации основания в процессе её бетонирования по данным натурных наблюдений. Для решения этой задачи требовались данные по динамике развития деформаций основания и соответствующие им нагрузки на основание от уложенного бетона. Использовался способ, разработанный нами на строительстве арочной плотины

Ингури ГЭС. Определение значений модулей деформации приконтактной и активной области основания бетонной плотины Богучанской ГЭС выполнено на основе технического решения, в соответствии с которым при определении значений модуля деформации учитывалась упругая составляющая деформаций основания при действии веса укладываемого бетона [4].

Расчёты при частично возведенной бетонной плотине Богучанской ГЭС показали, что модуль деформации поверхностной 2 – 5 м области основания отличается по величине от его значения в активной зоне: в поверхностной области на контакте Богучанской бетонной плотины с основанием также как и в основании арочной плотины Ингури выявлена прослойка скального массива, осредненные значения модуля деформации которой составили 2000 МПа. В активной области по глубине массива значения модулей деформации для отдельных секций плотины оказались существенно выше и составили для действующих нагрузок в основании по состоянию на 01.08.2007 г. 6013 ... 14984 МПа. Согласно полученным данным имеет место деформационная неоднородность массива долеритов по фронту бетонных сооружений. Так, в основании секций 12 – 13; 17 – 18 и 21 – 22 (рис. 3) значения модулей деформации в активной области отличаются друг от друга в два и более раза. Проверка возможного влияния неоднородности основания по раскрытию частично зацементированных межсекционных швов в секциях 12 – 13; 17 – 18 и 21 – 22 бетонной плотины показала, что последние незначительно отличаются от раскрытия межсекционных швов в других секциях. Как правило, раскрытие межсекционных швов определяется температурными воздействиями и по данным ОАО “Сибирский НТЦ” (к.т.н. Маркин Л. И) в ряде секций составило 3,95 – 10,09 мм. Определенное влияние на выравнивание неоднородности основания в дан-

ном случае может оказывать податливая прослойка скалы на контакте с бетоном плотины.

В целом по данным инструментальных наблюдений при действии гравитационных факторов состояние основания бетонной плотины оценивается как работоспособное.

**Надёжность плотины** на сдвиг определяется по смещениям сооружения под нагрузкой возрастающего напора воды. Во время первоначального заполнения водохранилища предусмотрены наблюдения за смещениями по прямым (ПО) и обратным (СГС) отвесам. Обратные и прямые отвесы размещены в камерах КИА в секциях 12, 21, 28 и 31 (рис. 3). В каждой из камер КИА в этих секциях пробурены три скважины, забой которых располагается на различной глубине. В одной это 15 м, во второй – 30 м и в третьей – 50 м. Якоря сдвигомеров (СГС) установлены на забое скважин, а струна обратного отвеса закреплена на поплавке в камере КИА. Работы по установке обратных отвесов в камерах КИА в настоящий момент завершены, что позволило начать выполнение измерений “нулевых” отсчётов.

Надёжность сооружений напорного фронта Богучанской ГЭС определяется состоянием основания каменнонабросной плотины с противотрационным элементом в виде асфальтобетонной диафрагмы и правобережного примыкания, за которыми также ведутся инструментальные и визуальные наблюдения.

#### Список литературы

1. Stein S., Onal E. A. The 2004 Sumatra earthquake and .... Earth Scientist. 2005. XXI (2). p. 6 – 11
2. Калустян Э. С. Геомеханика в плотиностроении. М.: Энергоиздат. 2008
3. Смутьский П. Я. Богучанская плотина на р. Ангаре// Геология и плотины. Том XII. М. 1992
4. Калустян Э. С. Способ определения деформационных характеристик скального основания по данным натурных наблюдений. Патент РФ № 2220251 от 27 декабря 2003 г.



## О проблемах безопасности гидротехнических сооружений мелиоративного назначения

Щедрин В. Н., академик РАСХН, доктор техн. наук,  
Косиченко Ю. М., доктор техн. наук, профессор (ФГНУ “РосНИИПМ”)

В соответствии с федеральным законом “О мелиорации земель” [1] при эксплуатации мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений собственники (физические и юридические лица) обязаны содержать указанные объекты в исправном (надлежащем) состоянии и принимать меры по предупреждению их повреждений. Правила эксплуатации мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений устанавливаются федеральным органом исполнительной власти.

В правилах эксплуатации гидротехнических сооружений мелиоративного назначения должны быть учтены требования по их безопасной эксплуатации согласно федеральным законам “О безопасности гидротехнических сооружений” [2], “О техническом регулировании” [3] и “Технический регламент о безопасности зданий и сооружений” [4]. Реализация этих законов позволит установить:

комплекс технических, организационных и хозяйственных требований, обеспечивающих содержание сооружений в исправном и безопасном состоянии;

выполнение сооружениями технологических задач (их потребительской ценности);

формы и способы оценки технического состояния и уровня безопасности сооружения.

Выполнение собственниками сооружений указанных мероприятий обеспечит: защиту жизни и здоровья граждан, имущества физических или юридических лиц, государственного и муниципального имущества; охрану окружающей среды, жизни и здоровья животных и растений; предупреждение действий, вводящих в заблуждение приобретателей; энергетическую эффективность сооружений.

В процессе эксплуатации безопасность сооружений должна обеспечиваться посредством технического обслуживания и ремонтов сооружений, технических осмотров и обследований, контрольных проверок, проведения мониторинга и своевременного устранения обнаруженных на сооружениях дефектов и неисправностей.

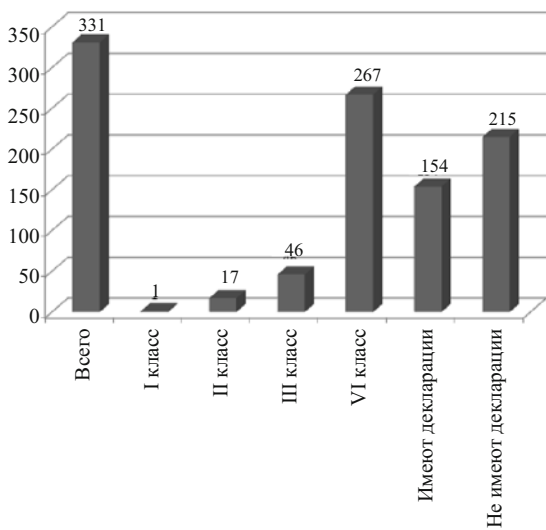
Согласно закону “О безопасности гидротехнических сооружений” на всех этапах жизненного цикла сооружений их собственники или эксплуатирующие организации должны составлять декларации безопасности. Декларация безопасности является основным документом, обосновывающим

безопасность гидротехнических сооружений, их соответствие критериям безопасности, проекту, действующим техническим регламентам и правилам, а также определяющим характер, масштаб возможных аварийных ситуаций и меры по обеспечению безопасной эксплуатации.

Важным направлением при проектировании, строительстве и эксплуатации является обеспечение безопасности гидротехнических сооружений (ГТС) различных отраслей экономики, в том числе гидротехнических сооружений мелиоративного комплекса, находящихся в ведении Министерства сельского хозяйства РФ. Следует отметить, что большинство сооружений мелиоративного назначения эксплуатируется более 30 – 50 лет, и срок их службы подходит к критическому пределу. Кроме того, многие сооружения (грунтовые плотины водохранилищ, дамбы обвалований каналов, рек и др.) находятся в неудовлетворительном техническом состоянии, представляя потенциальную опасность для населения, хозяйственных объектов и сельскохозяйственных угодий. Аварии с прорывом напорного фронта плотин, происшедшие на Киселевском (1993 г.) и Тирляндском водохранилищах (1994 г.), разрушения защитных дамб обвалования, берегоукрепительных сооружений на прудах и малых водохранилищах, на малых реках и каналах в бассейнах рек Дон (1998 г.) и Кубань (2002 г.) имели катастрофические последствия. Только за последние годы в Ростовской области, Ставропольском и Краснодарском краях были разрушены десятки плотин и дамб, что повлекло за собой затопление нижележащих территорий. Последствия аварий показали особое значение концепции безопасности ГТС, которая должна включать теоретические положения надежности и методы решения таких взаимосвязанных задач, как контроль, оценка и управление безопасностью.

О проблемах и сложностях применения на практике федерального закона “О безопасности гидротехнических сооружений” и действующих нормативных документов свидетельствует ряд публикаций [5, 6, 7 – 10].

По данным мелиоративного кадастра в настоящее время в России количество гидротехнических сооружений мелиоративного назначения составляет 1 млн. 918 тыс., в том числе в госсистемах — 282 тыс. сооружений, из них в федеральной собст-



**Рис. 1.** Количество ГТС мелиоративного назначения, находящиеся в ведении МСХ РФ, подлежащих декларированию (на 1.12.2009 г.)

венности — 58 тыс., в собственности субъектов Российской Федерации — 224 тыс.

На рис. 1 и 2 по классам и типам представлены ГТС мелиоративного назначения, находящиеся в ведении Минсельхоза России и подлежащие декларированию. Общее количество ГТС, находящихся на балансе Минсельхоза РФ и подлежащих декларированию, на 1 декабря 2009 г. составило более 300 шт., из них: к I классу относится 1 сооружение (Новотроицкое водохранилище в Ставропольском крае, декларация безопасности утверждена в 2008 г.); ко II классу — 17 ГТС (Чограйское, Сенгилеевское, Усть-Джегутинское, Грушевское водохранилища, Терско-Кумский гидроузел на р. Терек, Федоровский гидроузел на р. Кубань, Невиномысский, Право-Егорлыкский каналы и др.); к III классу — 46 ГТС (Аксайское, Фроловское, Отказненское, Вадинское водохранилища, Тиховский гидроузел на р. Кубань, каналы БСК-2, БСК-3, БСК-4 и др.); к IV классу — 267 ГТС, в том числе пруды, малые и средние водохранилища, каналы, дамбы обвалования. Из общего количества ГТС, подлежащих декларированию, 154 сооружения имеют действующие декларации, а по 215 — декларации отсутствуют либо срок их действия истек.

На долю Южного федерального округа (ЮФО) и Северо-Кавказского федерального округа (СКФО) приходится наибольшее количество ГТС мелиоративного назначения (более 500 тыс. сооружений), что составляет 62 % от общего их количества. К наиболее крупным сооружениям относятся 84 водохранилища, 1490 регулирующих гидроузлов, более 300 водозаборов, более 23 тыс. км крупных каналов, 1267 км защитных дамб, 194 туннелей, акведуков, дюкеров, 650 насосных станций. Часть из этих сооружений представляет потенци-

альную опасность для населения, окружающей среды и хозяйственных объектов. В этих округах 135 таких ГТС, в том числе 38 водохранилищ, 27 гидроузлов, 10 плотин, 23 дамбы общей протяженностью 803 км, 12 магистральных каналов и др. (рис. 3).

Предварительные расчеты по некоторым объектам, представляющим потенциальную опасность, показывают следующее. Так, в случае аварии на Шапсугском водохранилище будет подтоплено и затоплено 5 населенных пунктов и около 400 тыс. га сельскохозяйственных земель. В связи с этим предусмотрена реконструкция водохранилища с затратами 236 млн руб. На Аксайском водохранилище в Дагестане существует опасность подтопления и затопления 5 населенных пунктов (7,2 тыс. чел.) и 32 тыс. га сельскохозяйственных земель. На реконструкцию потребуется 1,46 млрд. руб.

Наиболее крупными объектами ГТС, представляющими потенциальную опасность для населенных пунктов и сельскохозяйственных земель и требующими значительных средств на реконструкцию, являются: Черноземельский магистральный канал в Республике Калмыкии (стоимость реконструкции 1 млрд. руб.), Донской магистральный канал в Ростовской области (4,5 млрд. руб.), Невиномысский канал (5,0 млрд. руб.), Большой Ставропольский канал (I очередь, 7,5 млрд. руб.), Терско-Кумский гидроузел (500 млн. руб.), противопоаводковая система обвалования р. Кубань (1,46 млрд. руб.) и ряд других гидротехнических сооружений ЮФО и СКФО.

Только по ЮФО и СКФО общее количество ГТС мелиоративного назначения, подлежащих декларированию, составляет 93, из них в СКФО — 71, в ЮФО — 22. На 1 декабря 2009 г. имели действующие декларации безопасности 49 ГТС, или 53 % от общего количества. Наибольшее количество ГТС, где имеются разработанные декларации безопасности, находится в Ставропольском крае и Волгоградской области. Планируется составление деклараций безопасности в течение 2010 – 2012 гг. в основном в Чеченской Республике, Республике Дагестан и Ставропольском крае.

Однако сопоставление этих данных с количеством потенциально опасных ГТС на рис. 3 показывает, что количество потенциально опасных ГТС в ЮФО и СКФО составляет 135 ГТС, а подлежат декларированию только 93 ГТС. Таким образом, 42 потенциально опасных ГТС, или 31 % от общего количества, не включено в перечень объектов, подлежащих декларированию. В их числе такие крупные объекты II III класса, как I очередь Большого Ставропольского канала, Донской МК в Ростовской области, Моздокское водохранилище в Ставрополь-

ском крае, берегоукрепительные дамбы на р. Кубань в Карачаево-Черкесской Республике.

Проведенная инвентаризация показала, что в ведении федеральных государственных учреждений Департамента мелиорации Минсельхоза России находятся 250 водохранилищ, 2201 регулирующий гидроузел, 499 водозаборных сооружений, 163 плотины, 29 тыс. км каналов оросительных и 13 700 км осушительных систем, 7578 водовыпусков, 9253 сетевых сооружения, 5570 регуляторов, 3343 км дамб и других объектов. Из них, по данным Российского регистра, особо потенциально опасных сооружений, создающих напорный фронт и находящихся на балансе Минсельхоза РФ, насчи-

тывается 250, в том числе 44 водохранилища объемом более 10 млн. м<sup>3</sup>, 105 — объемом от 1 до 10 млн. м<sup>3</sup>, 101 — водоёмы и пруды объемом менее 1 млн. м<sup>3</sup>.

В связи с продолжительной эксплуатацией и недостаточными объемами производимых ремонтно-восстановительных работ происходят разрушение основных конструкций сооружений и заиливание водохранилищ, а также создается высокая вероятность чрезвычайных ситуаций, особенно при прохождении весенних половодий и паводков. В зонах риска только крупных водохранилищ (емкостью более 10 млн. м<sup>3</sup>) расположено 370 населенных пунктов с численностью населения до 1 млн. чело-

Данные по субъектам РФ о ГТС с пониженным, неудовлетворительным и опасным уровнями безопасности

Субъект РФ	Всего ГТС	Доля ГТС, %, с уровнем безопасности		
		пониженным	неудовлетворительным	опасным
Белгородская область	242	60	10	3
Владимирская область	85	49,4	4,7	4,7
Вологодская область	88	30,7	16	6,8
Воронежская область	289	62,3	20	15,6
Калужская область	175	33	10,3	9,2
Кировская область	88	58	18	5,7
Красноярский край	252	25,4	13,5	7,1
Курганская область	146	38,4	16,4	3,4
Курская область	430	52,6	15,1	6,3
Ленинградская область	65	58,5	17	0
Липецкая область	520	46,4	6,4	5
Московская область	238	43	16,4	10,5
Мурманская область	153	40,5	4,6	1,3
Нижегородская область	474	24,7	16,9	6,5
Орловская область	123	28,5	21,1	16,3
Приморский край	101	20,8	34,7	0
Республика Дагестан	66	6,1	33,3	10,6
Республика Карелия	299	26,4	9	0,3
Ростовская область	323	32,5	22,6	8,1
Самарская область	372	39,8	16,1	5,4
Свердловская область	183	19,1	11,5	0,5
Ульяновская область	82	24,4	11	18,3
Челябинская область	181	20,4	20,4	13,3

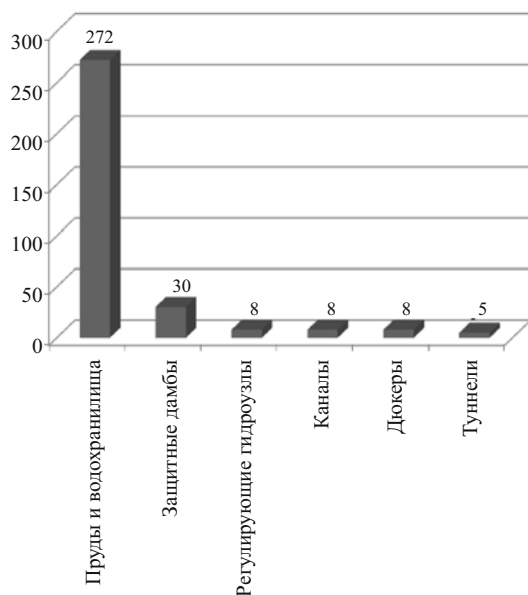


Рис. 2. Распределение ГТС мелиоративного назначения по типам, подлежащих декларированию

век, находятся многочисленные объекты экономической и социальной сфер. Средний процент физического износа напорных ГТС составляет более 50 %, а аварийность превысила среднемировую показатель в 2,5 раза.

В соответствии с классификацией МПР в Российском регистре гидротехнических сооружений уровень безопасности характеризуется следующими качественными показателями: нормальный, пониженный, неудовлетворительный, опасный (критический). В таблице приведены данные по ГТС с пониженным, неудовлетворительным и опасным уровнями безопасности по субъектам РФ. Наиболее высокий процент ГТС с неудовлетворительным и опасным уровнями безопасности (более 30 %) характерен для шести субъектов РФ: Воронежской, Орловской, Ростовской и Челябинской областей, Приморского края, Республики Дагестан.

Ухудшение технического состояния основных производственных фондов водного хозяйства, и в первую очередь водоподпорных гидротехнических сооружений, происходит в результате снижения инвестиционной активности и недостаточного финансирования ремонтно-эксплуатационных работ. Непрерывные реорганизации структур государственного управления, разгосударствление региональных проектных и научных организаций и вследствие этого потеря значительной части информации о водных объектах негативно сказываются на организации работ по обеспечению безопасности ГТС.

Обеспечение нормального уровня безопасности и технического состояния водоподпорных гидротехнических сооружений позволит выполнить основную функцию по защите населения и объектов

экономики от затопления и свести к минимуму ущербы от негативного воздействия вод.

Основные средства для предупреждения и уменьшения риска аварий и ущербов должны быть следующие:

принятие соответствующих нормативных правовых актов, определяющих задачи и ответственность различных уровней государственной власти, создание системы финансового обеспечения;

инженерные мероприятия по снижению риска затоплений (регулирование стока, увеличение пропускной способности русел рек путём их расчистки, строительство защитных дамб, строительство берегоукрепительных сооружений и др.);

уменьшение уязвимости территорий (регламентирование хозяйственной деятельности, запрет строительства на периодически затопляемых территориях, картографирование рисков ущербов на подверженных затоплению землях);

улучшение системы прогнозирования и оповещения.

Необходимость реконструкции ряда крупных гидротехнических объектов мелиоративного назначения обусловлена неудовлетворительным уровнем их технического состояния. Неудовлетворительное техническое состояние и низкий уровень безопасности ГТС являются следствием следующих основных причин:

недостаточное (в течение многолетнего периода) выделение капитальных затрат на проведение ремонтных мероприятий;

неукомплектованность штатов эксплуатационных организаций специалистами рабочих профессий, которая по экспертной оценке составляет 52 %;

недостаточная энерговооруженность эксплуатационных организаций, которая составляет около 50 % от потребности при 60–70 %-ном износе парка механизмов;

отсутствие деклараций безопасности — документов, включающих результаты обследований технического состояния ГТС и содержащих перечень мероприятий по повышению их безопасности.

В целом общие затраты на реконструкцию и планово-предупредительные мероприятия по ГТС мелиоративного назначения оцениваются в 27,2 млрд. руб. В настоящее время в соответствии с ФЦП «Плодородие» уже проводятся работы по реконструкции ряда объектов, в том числе Большого Ставропольского, Донского магистрального, Невинномысского каналов, противопаводковой системы обвалования р. Кубань и др.

Вызывает беспокойство проблема использования и ликвидации бесхозных гидротехнических сооружений [5], которые ранее использовались в основном для нужд сельского хозяйства. Большин-

ство этих сооружений относится к прудам и малым водохранилищам объемом от 0,1 до 10,0 млн. м<sup>3</sup>. По данным бассейновых водных управлений (БВУ), общая численность бесхозных ГТС в России в 2007 г. составила 3600, а в 2010 г. — 5400 сооружений (данные МПР).

Из-за несовершенства действующего законодательства и отсутствия финансовых средств работы по определению собственников и передаче бесхозных ГТС на баланс муниципальных образований проводятся слабо, численность таких сооружений продолжает расти. Очевидно, это связано с продолжающейся реорганизацией водохозяйственных и сельскохозяйственных организаций, с их банкротством и перепрофилированием. Основная часть этих гидроузлов расположена на суходольных балках или малых реках, в ряде районов характеризуется каскадным расположением и представляет высокую потенциальную опасность для ниже расположенных населенных пунктов, хозяйственных объектов и сельскохозяйственных угодий. Возможные аварии на этих сооружениях во время весенних половодий и дождевых паводков могут нанести существенный материальный ущерб этим объектам. По нашим предварительным оценкам количество потенциально опасных бесхозных ГТС достигает 18 % от их общей численности.

Из-за отсутствия собственников и эксплуатирующих организаций на этих объектах не проводятся ремонтные работы, нет элементарного ухода за основными сооружениями. Администрации районов не выполняют предписания органов надзора по установлению собственников и регистрации этих объектов. Результаты проведенных ФГНУ «РосНИИПМ» в 2007 – 2008 гг. обследований бесхозных ГТС в Ростовской области и Краснодарском крае показали:

90 % прудов и малых водохранилищ заилены на 50 – 70 % от объема их чаши;

грунтовые плотины на отдельных участках имеют значительные просадки гребня;

на низовых откосах плотин имеют место такие опасные явления, как выход фильтрационных вод на откос в виде ключей, грифонов и мокрых пятен;

в среднем площадь зарастания чаши прудов водной растительностью составляет около 40 %;

техническое состояние более 70 % ГТС оценивается как неудовлетворительное, уровень безопасности сооружений — неудовлетворительный и опасный (критический);

большинство водосбросов не имеют сопрягающих сооружений, что приводит к значительным размывам русла сбросных каналов, вплоть до образования глубоких оврагов;

практически на всех грунтовых плотинах наблюдается недостаточное превышение минималь-

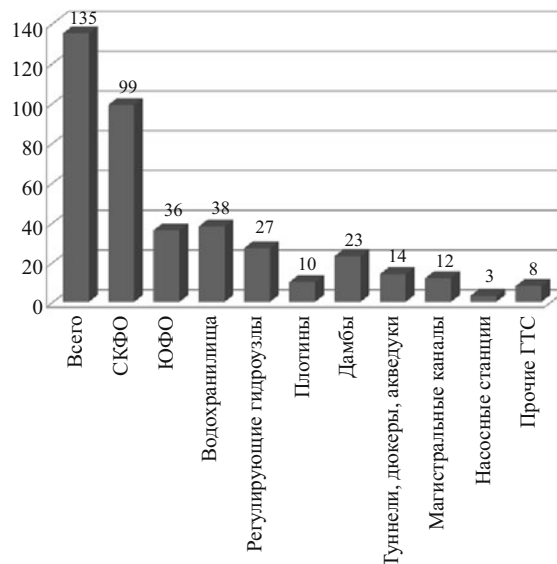


Рис. 3. Количество потенциально опасных ГТС мелиоративного назначения в ЮФО и СКФО, находящихся в ведении Минсельхоза России

ной отметки гребня над уровнем воды, что в период паводков может привести к переливу воды через гребень и образованию гидродинамической аварии с опасными последствиями;

большинство обследованных объектов не используются по своему прямому назначению — для орошения и сельхозводоснабжения;

низкое санитарно-гигиеническое состояние прудов и прилегающих к ним территорий.

Таким образом, отмеченные обстоятельства требуют принятия неотложных мер для решения проблем дальнейшего использования и ликвидации бесхозных ГТС. В случае их использования первоочередной задачей является выполнение работ по обеспечению нормального технического состояния, нормального уровня безопасности и по улучшению санитарно-гигиенического состояния (очистка чаши пруда от ила и водной растительности, укрепление берегов, ремонтно-восстановительные работы по плотине и гидротехническим сооружениям). После выполнения этих мероприятий, на наш взгляд, представляется целесообразным использование прудов для локального орошения небольших участков площадью до 100 – 200 га вблизи водоемов с использованием мобильного переносного оборудования.

Для выполнения работ по обеспечению безопасности находящихся в ведении Минсельхоза РФ гидротехнических сооружений (доведение их до нормального уровня безопасности, проведение декларирования и страхования ГТС) затраты на период до 2020 г. в среднем должны составить: с 2010 по 2015 г. — 17 млрд. руб., с 2016 по 2020 г. — 15 млрд. руб.

Комплексом мероприятий по развитию мелиорации и повышению эксплуатационной надежности ГТС на 2010 – 2011 гг. предусматривается выполнить капитальный ремонт магистральных каналов на длине 1620 км с затратами 320,2 млн. руб.; гидротехнических сооружений 135 шт. с затратами 259,2 млн. руб.; насосных станций 335 шт. с затратами 335 млн. руб.

## Выводы

1. В настоящее время на мелиоративных системах Российской Федерации находится 1912 тыс. гидротехнических сооружений, что значительно превышает количество ГТС других отраслей — энергетики, промышленности, водного транспорта. Из общего количества ГТС на государственных мелиоративных системах располагается 282 тыс. сооружений, в том числе в федеральной собственности — 58 тыс., в собственности субъектов РФ — 224 тыс.

2. Большинство ГТС мелиоративного назначения III – IV класса не имеет проектной документации, технических паспортов сооружений, отсутствует или недостаточна численность службы их эксплуатации. Собственники объектов практически не вкладывают средств в ремонтные работы, в предпаводочный период не проводят ежегодные мероприятия для безопасного пропуска паводка. Отмеченные обстоятельства существенно влияют на безопасность эксплуатации ГТС и требуют принятия неотложных мер во избежание аварийных ситуаций.

3. Одной из основных проблем при организации безопасности ГТС является усложненная форма составления декларации безопасности, требующая анализа и оценки критериев безопасности ГТС, определения значения риска аварии ГТС, расчета параметров волны прорыва при гидродинамической аварии, а также значительные затраты по ее составлению. Собственники или эксплуатирующие организации не способны составить декларацию безопасности своими силами и вынуждены привлекать сторонние организации. Большинство собственников не имеют необходимых средств для составления декларации и ее экспертизы, в результате чего они эксплуатируют ГТС без утвержденной декларации их безопасности.

4. Из-за отсутствия четких критериев неясен вопрос отнесения гидротехнических сооружений к сооружениям, подлежащим декларированию. Особенно это касается мелиоративных ГТС IV класса ответственности. Большинство прудов и водоемов имеют небольшие напоры до 3 – 5 м и часто значительно заилены, но они не представляют потенциальной опасности для населения и хозяйственных

субъектов. Однако органы надзора без должного обоснования включают их в перечень объектов, подлежащих декларированию.

5. Для менее ответственных сооружений IV класса (которых подавляющее большинство в Минсельхозе РФ) следует упростить структуру деклараций безопасности ГТС и отказаться от оценки усложненных критериев состояния ГТС К1 и К2, применяемых для более крупных энергетических сооружений. Для сооружений мелиоративного назначения целесообразно использование более простых экспертных методов оценки риска аварий ГТС.

6. Необходима разработка единой методики декларирования безопасности прудов и водохранилищ, предназначенных для орошения и сельхозводоснабжения, согласованных с Ростехнадзором, которая регламентировала бы порядок и содержание декларирования безопасности ГТС II – IV класса ответственности, а также методики выполнения необходимых поверочных расчетов.

## Список литературы

1. *О мелиорации земель*: Федеральный закон от 10.01.1996 № 4-ФЗ.
2. *О безопасности гидротехнических сооружений*: Федеральный закон от 21.07.1997 № 117-ФЗ.
3. *О техническом регулировании*: Федеральный закон от 27.12.2002 № 264-ФЗ.
4. *Технический регламент о безопасности зданий и сооружений*: Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ.
5. *Василевский А. Г., Серков В. С.* О некоторых результатах применения Федерального закона “О безопасности гидротехнических сооружений” // Гидротехническое строительство. 2009. № 9.
6. *Волков В. И., Каганов Г. М.* О терминологии нормативно-правовых документов, связанных с обеспечением безопасности гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2010. № 3.
7. *Щедрин В. Н., Косиченко Ю. М., Сенчуков Г. А.* Вопросы контроля технического состояния и безопасности гидротехнических сооружений // Сб. тр. ФГНУ “РосНИИПМ”. Новочеркасск, 2003. Ч. 1.
8. *Косиченко Ю. М.* Вопросы безопасности и эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений мелиоративного назначения // Природообустройство. 2008. № 3.
9. *Каганов Г. М., Волков В. И.* Техническое состояние гидротехнических сооружений мелиоративных гидроузлов Московской области // Мелиорация и водное хозяйство. 2007. № 3.
10. *Колганов А. В.* Водохозяйственный комплекс Южного Федерального округа // Мелиорация и водное хозяйство. 2006. № 5.
11. *Волосухин В. А., Вольнов М. А.* Использование водных ресурсов и безопасность гидротехнических сооружений в бассейне р. Кубань // Мелиорация и водное хозяйство. 2007. № 4.
12. *Нагорный В. И., Фомин Г. И., Чуносков Д. В.* Декларирование безопасности гидротехнических сооружений аккумуляющих водохранилищ Саратовской области // Мелиорация и водное хозяйство. 2006. № 4.

## Поздравление Герману Яковлевичу Гевирцу

14 мая 2011 г. исполняется 90 лет Герману Яковлевичу Гевирцу – крупному специалисту в области подземного гидротехнического строительства, заслуженному строителю РФ, заслуженному строителю Дагестана, почетному члену Тоннельной ассоциации России.

Герман Яковлевич родился в г. Ленинграде. С 22 июня 1941 г. по 1945 г. находился в действующей армии, воевал на передовой, неоднократно рисковал жизнью и получил серьезные ранения. Он прошел славный путь война – победителя от Ростова и Кавказа через Кенигсберг до Берлина. За боевые заслуги Герман Яковлевич имеет многочисленные награды, в том числе медаль “За отвагу”.

После войны Герман Яковлевич окончил Ленинградский горный институт и посвятил свою трудовую жизнь строительству подземных сооружений – сначала оборонного комплекса, а после поступления в 1961 г. в институт “Ленгидропроект” гидроэлектростанций. Неоценим его вклад в возведение подземных объектов Верхнетуломской и Борисоглебской ГЭС на Северо-Западе, Усть-Хантайской, Вилуйской и Колымской ГЭС на Севере, Саяно-Шушенской ГЭС в Сибири и Бурейской ГЭС на Дальнем Востоке. В Дагестане под его руководством проектировались многочисленные туннели на Чиркейской, Миатлинской, Ирганайской ГЭС, а также самый протяженный (4,3 км) в России Гим-



ринский автодорожный тоннель, который он проектировал в качестве главного инженера проекта.

Стремление Германа Яковлевича к новым научным и техническим решениям позволило ему на стыке наук о тоннелестроении и геокриологии внести большой вклад в развитие подземного строительства в условиях многолетней мерзлоты и защитить ученую степень кандидата технических наук. Данные научных исследований были использованы при составлении нормативных и методических материалов. Внедрение новых прогрессивных ре-

шений в осуществленных проектах в области гидроэнергетики неоднократно отмечались медалями ВДНХ СССР, среди которых есть золотые и серебряные. Многие внедренные технические решения актуальны и в настоящее время.

Большой вклад внес Герман Яковлевич в воспитание технических кадров для подземного строительства, читая лекции и работая с дипломниками, а также в качестве члена ГЭКа при Санкт-Петербургском государственном горном университете.

В настоящее время Герман Яковлевич трудится в ОАО “Ленгидропроект” в отделе экспертиз.

Коллектив ОАО “Ленгидропроект” поздравляет Германа Яковлевича со знаменательной датой и желает ему крепкого здоровья, бодрого настроения и успехов в области тоннелестроения.

## К вопросу об оценке вибрационного состояния гидроагрегатов ГЭС

Клюкач А. А., ведущий инженер (Саяно-Шушенская ГЭС им П. С. Непорожного)

Для оценки вибрационного состояния машины (механизма) необходим системный подход. К сожалению, автор статьи [1] оценивает состояние гидроагрегата только по одному датчику, не указывая дефектоскопических признаков дефекта. К примеру, при эксплуатационных замерах передвижным комплексом вибрационное состояние оценивается по 20 параметрам, а стационарным виброкомплексом — по 12.

Система параметров включает:

*массив данных.* Осциллограммы, записанные по информационным точкам с учетом направления измерения. Определение по амплитудно-частотным спектрам обработанных осциллограмм информационной полосы частот и помех. Определение сил, вызывающих вибрации по амплитудно-частотным спектрам. Информационные точки определяются конструктивными особенностями гидроагрегата;

*режим.* Наличие стационарного режима. Главными условиями оценки является стабильность на-

грузки, напора в момент измерения. Переходные процессы не учитываются;

*идентичность режима.* После капитального ремонта с июня по август изменился напор со 188 до 212 м. При повышении напора растет мощность агрегата.

При оценке вибрационного состояния и корректного сравнения необходимо брать величину мощности агрегата, с которой он работает в течение исследуемого времени. В нашем примере это 580 МВт;

*достоверность.* Для анализа необходима достоверность показания. Сигнал виброперемещения не сохранился. А база данных АСУ ТП сохранила сведения только о максимальном размахе виброперемещения, зафиксированного через 2 с. Сигнала нет. Мы не можем получить амплитудно-частотный спектр, выделить шумы и полезный сигнал.

**Режим.** Стационарная система была закуплена у фирмы “VibroSystM” (Канада) и состояла из датчика и усилителя, с которого через 2 с (т.е. через

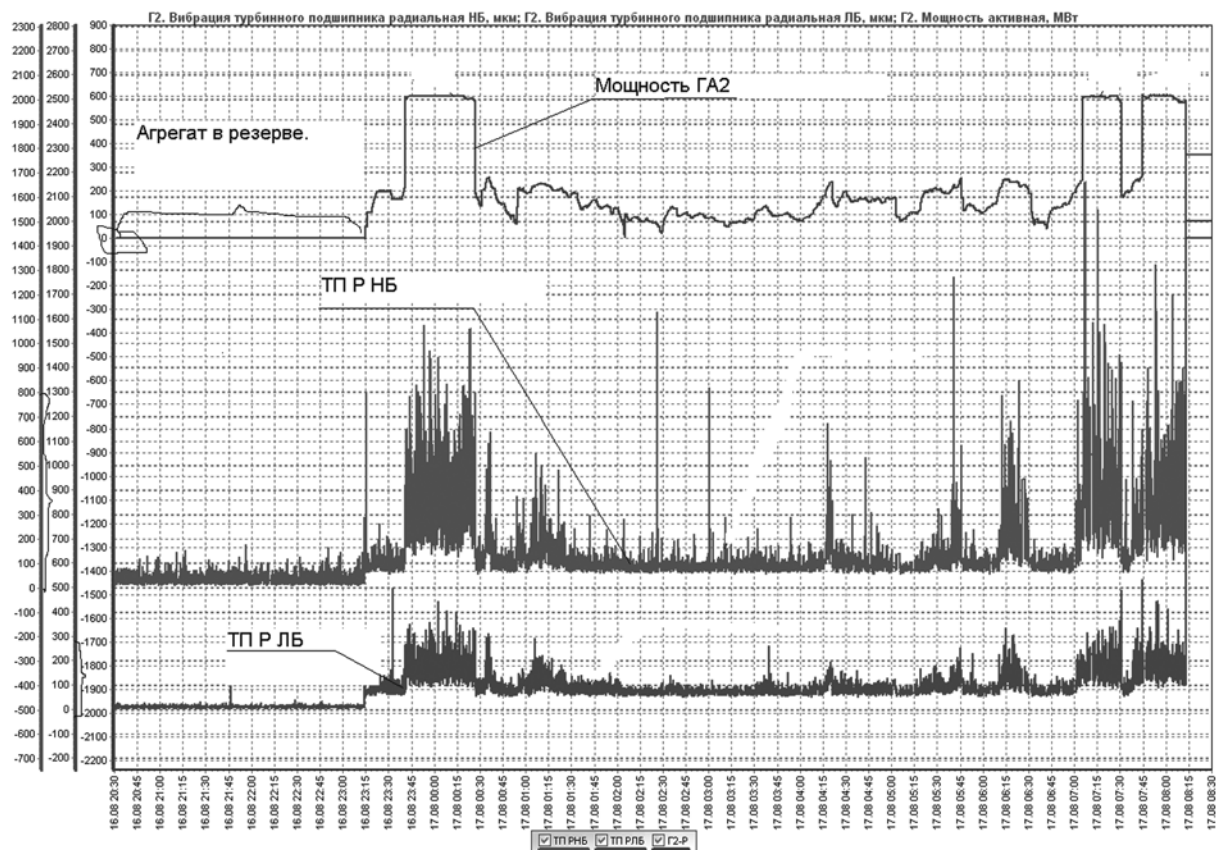


Рис. 1. Тренды радиальной вибрации турбинного подшипника ГА-2 перед аварией в направлении нижнего бьефа и левого берега



пять оборотов ротора) записывался размах вибрации в архив АСУ ТП (рис. 1). Записываются не только установившиеся режимы, но и пуски, остановы гидроагрегата, переходы через nereкомендованную зону, гидравлические толчки, переходы от одной нагрузки к другой, сбросы, набор нагрузок, форсировки системы возбуждения. Все переходные процессы сопровождаются повышением вибрации узлов гидроагрегата. В большинстве своем это импульсы и удары.

Для сравнения с нормированными значениями необходимо из тренда сделать выборки “режимных точек” [2] установившихся режимов, т.е. найти отрезок времени, когда на агрегате не меняются мощность и напор. Так это делается при плановых измерениях как персоналом эксплуатации, так и заводом-изготовителем турбины, передвижными устройствами виброконтроля. Если во время замера зафиксировался толчок, то результат аннулируется, измерения повторяются [2]. Полученный результат сопоставляется с нормативными значениями вибросигнала [3].

Тренды, записанные стационарной системой виброконтроля, могут быть представлены за промежуток времени, измеряющийся секундами, минутами, часами, сутками. При представлении тренда за сутки (рис. 1) зону, где вибросигнал можно сравнить с нормами вибраций, при обилии возмущений увидеть трудно. Мы видим частокол, который в акте [4] (рис. 2) называется “максимальными значениями вибрации”. Для сравнения с нормами вибраций эти “максимальные значения” не применяются. По-видимому, относительно “максимальных значений” определены и “средние значения”.

**Массив данных.** Ростехнадзор на рис. 2 показал только фрагмент картины вибрации агрегата — это вибрации одного датчика, установленного в зоне турбинного подшипника со стороны нижнего бьефа (ТПРНБ).

В состав вибросистемы входили:

- датчики, измеряющие биение вала, диска подпятника;

- датчики вибрации;

- датчики, измеряющие пульсации давления в проточной части агрегата;

на ГА-8 в спиральную камеру был установлен датчик, измеряющий интенсивность кавитационного шума лопастей рабочего колеса (разработка ЦКТИ).

На рис. 3 и в таблице представлены показания вибросистемы ГА-2 в начале июня и за несколько минут до аварии при нагрузке 580 МВт и напорах 187 и 212 м соответственно.

Перечень датчиков:

- турбинный подшипник, нижний бьеф, биение вала (ТПНБ);

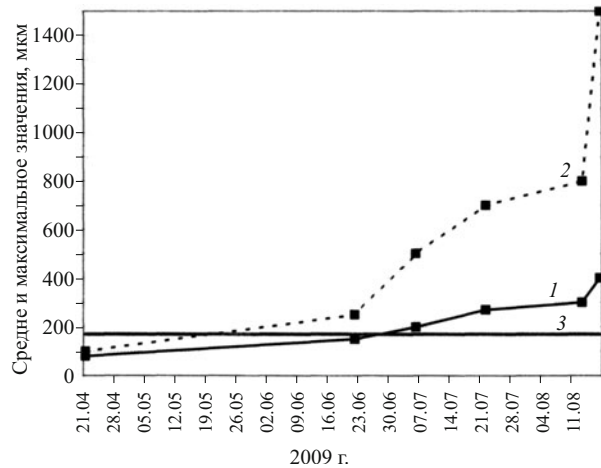


Рис. 2. Радиальные вибрации датчика ТПРНБ [4]:

1 — среднее значение; 2 — максимальное значение; 3 — максимальное значение по СТО 1733028227.140.001-2006 Приложение И

- генераторный подшипник, нижний бьеф, биение вала (ТПНБ);

- генераторный подшипник, левый берег, биение вала (ТПЛБ);

- подпятник, нижний бьеф, вертикальные биения диска подпятника;

- подпятник, левый берег, вертикальные биения диска подпятника;

- турбинный подшипник, радиальное направление, левый берег вибрации (ТПРЛБ);

- опора пяты, нижний бьеф, вертикальное направление измерений вибрации (ОНБ);

- турбинный подшипник, радиальное направление, нижний бьеф вибрации (ТПРНБ);

- генераторный подшипник, нижний бьеф, радиальное измерение вибрации (ГПРНБ);

- генераторный подшипник, левый берег, радиальное измерение вибрации (ГПРЛБ).

Направление измерения нижний бьеф — верхний бьеф обозначается НБ, левый берег — правый берег ЛБ.

**Идентичность режима.** До момента вхождения в аварию в течение четырех месяцев непрерывной работы агрегата значения по биениям вала, вибрации генераторного подшипника, вибрации опоры пяты по суммарному сигналу не изменились, т.е. нет тенденции на ухудшение механического состояния. Это, кстати, по вибрационным диагностическим признакам, указывает на то, что ремонт вращающихся частей агрегата, подшипников был выполнен качественно.

**Достоверность.** Показания датчика ТПРНБ при работе в III эксплуатационной зоне растут с июля. Аналогично ведут себя и датчики, установленные в зоне турбинного подшипника и на других агрегатах ГЭС. К примеру, на ГА-4 значения даже превышали вибрации на ГА-2. На ГА-4 не найдено ни одной

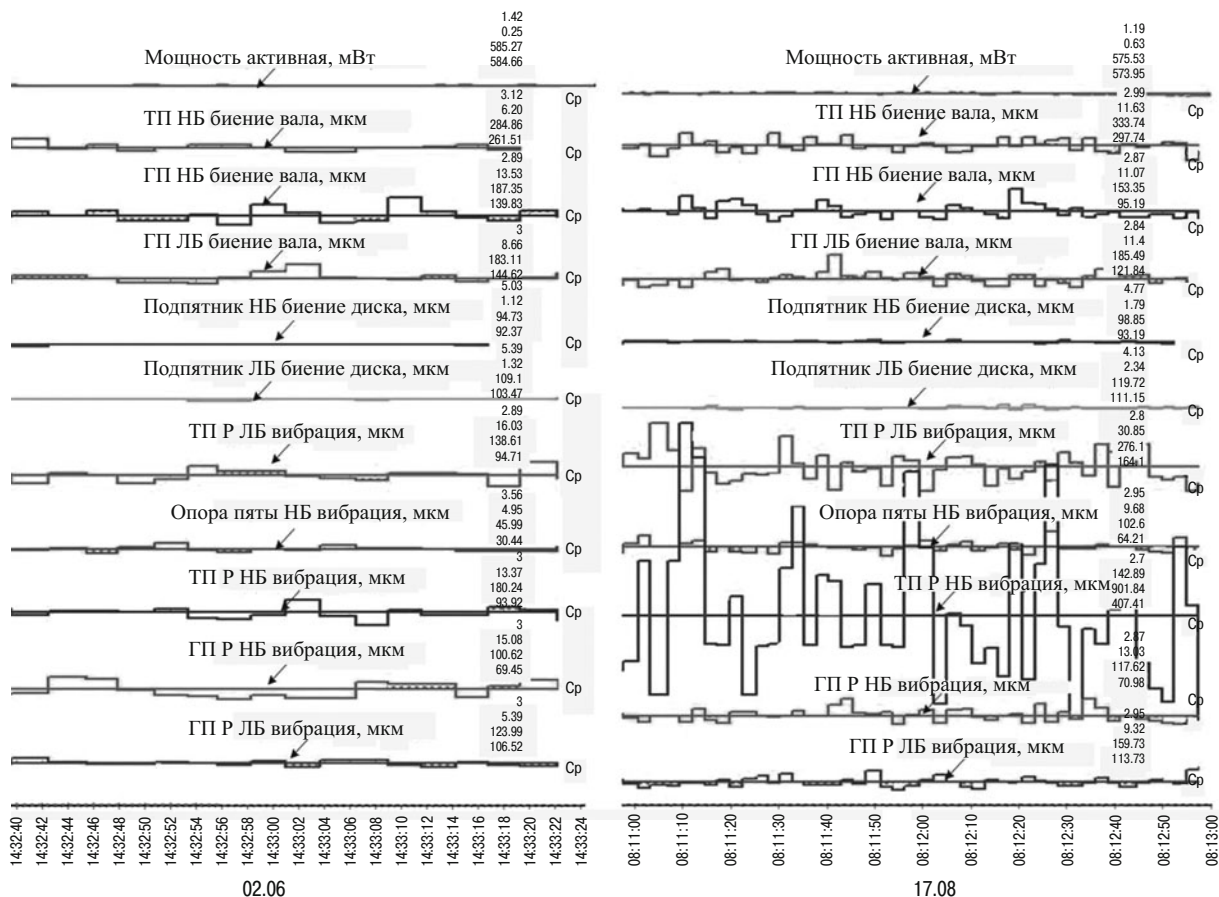


Рис. 3. Сравнительные тренды вибрации системы виброконтроля

шпильки с трещинами. Все это не согласуется с выводами автора статьи [1].

На ГА-4 по архивам АСУ ТП произведен анализ изменения вибрации датчиков, установленных в районе турбинного подшипника, в течение цикла:

Гидроагрегат № 2	02.06.09. Напор 187,9 м. Рис. 3	17.08.09. Напор 212,1 м. Рис. 3
Вибрации, 2Аср мкм		
ГПРНБ	69	70
ГПРЛБ	106	114
Опора пяты	30	64
ТПРЛБ	95	164
ТПРНБ	94	407
Биение вала, 2Аср мкм (допуск 400 мкм)		
ТПНБ	261	297
ГПНБ	139	95
ГПЛБ	145	121
Подп НБ	92	93
Подп ЛБ	103	111

наполнение — сработка — наполнение водохранилища до момента аварии. При максимальном наполнении наблюдаются высокие уровни суммарного сигнала датчиков. Водоохранилище сработано — вибрации вернулись к 160 мкм. При наполнении опять высокие значения (рис. 4).

Учитывая, что эта картина общая для всех агрегатов ГЭС, из рассуждений автора [1] следует простой вывод, что завод в эксплуатационной характеристике неправильно указал зоны работы. Получается, что с нагрузками, близкими к номинальной, по показаниям датчиков ТПРНБ, ТПРЛБ при напоре более 200 м нельзя работать на всех гидроагрегатах.

Было выполнено сравнение показаний датчика ТПРНБ ГА-2 с показаниями переносного измерительного комплекса, в состав которого входят датчики, усилитель фирмы “Брюль и Кьер” (полоса частот 1 – 200 Гц), анализатор гармоник суммарного сигнала. Анализатор выполнен на базе МПС-200. Производитель прибора — фирма “Мера” (г. Королев). Стационарная вибросистема работала в полосе частот 0,7 – 200 Гц, как это требуется по стандарту [3].

При напоре, близком к 180 м, уровни сигналов совпадали. Совпадали и составляющие спектра вибросигнала: “оборотный” (2,38 Гц), “лопастной”,

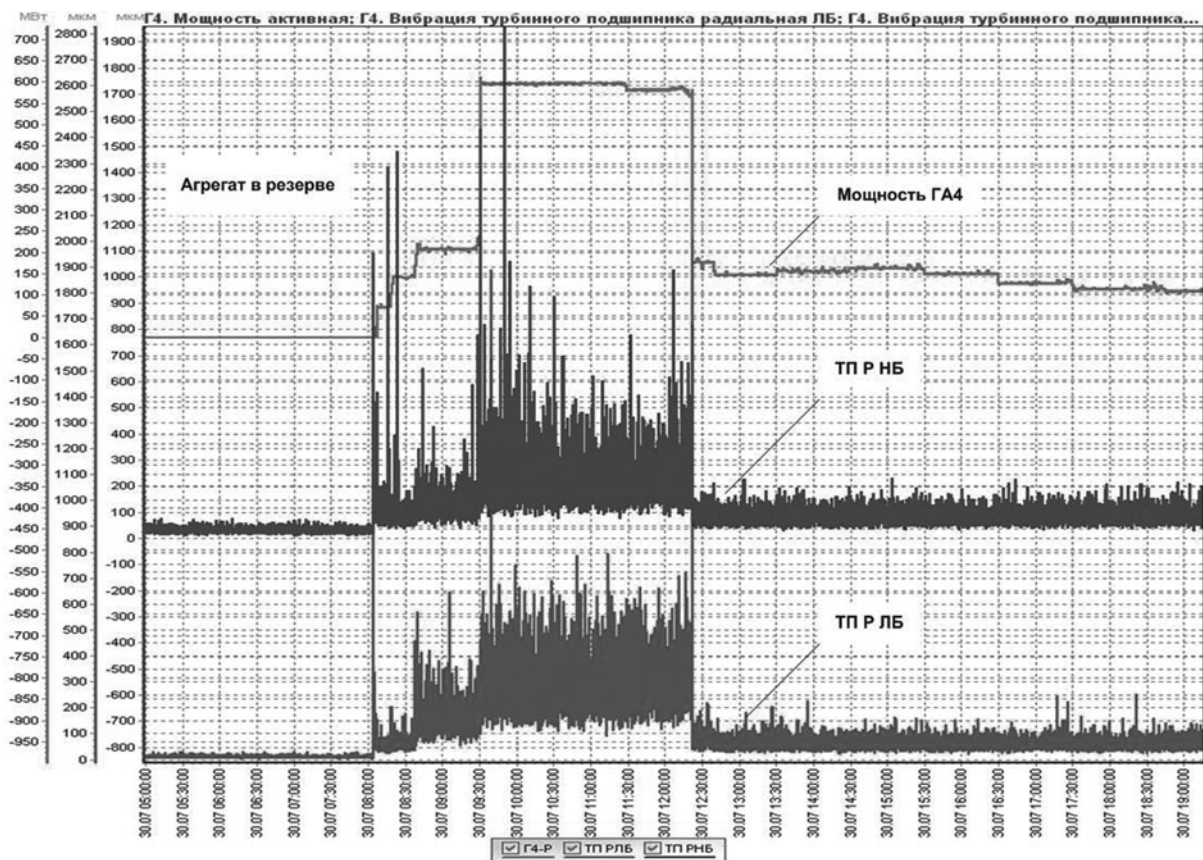


Рис. 4. Тренды вибрации турбинного подшипника ГА-4 при высоких напорах

“колонн статора” и т.д. Показания при высоких напорах вибросистема завывшала в несколько раз. Отличие было в размахах гармоник в полосе 0,7 – 2 Гц. Выявлено, что с ростом напора растут и составляющие этой полосы. Интересна эта полоса тем, что по ней определяется режим работы агрегата, определяется степень воздействия гидравлических возмущающих сил при различных открытиях направляющего аппарата и уровнях напора на опорные узлы и в первую очередь на крышу турбины агрегата. По наблюдениям за полосой можно определить, когда формируется “жгут”, в каком режиме его проявление максимальное. Расскажем об этом немного подробнее.

Низкочастотные вибрации с частотой 0,4 – 1,8 Гц вызываются гидродинамическими силами, образование которых связано с лопастной системой. Это характерно для всех радиально-осевых гидротурбин. Непрерывно сходящие с выходных кромок лопастей вихри объединяются за рабочим колесом в один концентрированный “жгут”, который имеет форму винтовой спирали и обязательно замыкается по стенкам отсасывающей трубы. В результате взаимодействия вихря со стенками отсасывающей трубы происходит вращение вихря с некоторой угловой скоростью, определяющей частоту пульсации давления воды в проточном тракте турбины. Следствием близкого расположе-

ния места замыкания вихря к рабочему колесу являются большая нестационарность потока в зоне лопастной системы и высокий уровень вибрации корпуса турбинного подшипника. Отдельные всплески (толчки) превышают 400 мкм. По анализу спектра вибрации в этой полосе в основном определяется эксплуатационная характеристика рабочего колеса.

Вырезав полосу 0,7 – 2 Гц из вибросигнала, можно гарантированно получать размах суммарного сигнала не выше 160 мкм. Выставив полосу рабочих частот вибросистемы, например, 30 – 200 Гц, можно получить максимальный суммарный сигнал 20 мкм во всех режимах, даже если агрегат будет разваливаться. Поэтому выставив полосу 0,7 – 200 Гц, чтобы понять, что происходит с агрегатами на высоких напорах, мы вынуждены были выставить уставку на сигнал 1000 мкм с задержкой времени 15 с для датчиков, установленных в зоне турбинного подшипника на всех вибросистемах. Мы изучали поведение сигнала в разных режимах работы агрегата, напорах. Аппаратуры с диапазоном частот 0,7 – 200 Гц у нас еще не было.

Имея большой опыт работы с измерениями низкочастотного сигнала в зоне турбинного подшипника, учитывая проблемы этого измерения:

характеристика канала датчик — усилитель с 1,5 Гц и ниже имеет рост коэффициента усиления от 1,2 и выше;

в сигнале присутствует полоса частот 0,2 – 0,7 Гц, не входящих в рабочую полосу фильтра, и амплитуды составляющих частот достигают 40 – 80 мкм;

ошибки двойного интегрирования низкочастотного сигнала;

ошибки от воздействия толчков, —

никто не верил в существование огромных вибраций (300 – 700 мкм). Переносная система МС-200 их не регистрировала.

Следует отметить, что до 23:15:16 августа 2009 г. ГА-2 находился в резерве. Агрегат был остановлен. Направляющий аппарат закрыт. На агрегат воздействуют только вибрации, передающиеся через фундаменты блоков от работающих агрегатов. Показания датчиков ТПРНБ, ТПРЛБ должны находиться в пределах 20 – 40 мкм (из опыта измерения вибрации фундамента при работающих агрегатах). Уровень вибрации на остановленном агрегате у датчика ТПРНБ достигает 170 мкм, у находящегося рядом датчика ТПРЛБ — 20 мкм. Показания датчика ТПРНБ, по которому автор статьи [1] определяет причины аварии, не вернулись в ноль на остановленной машине и вызывают определенное сомнение.

В течение длительного времени, после аварии неоднократно просматривая тренды вибрации датчиков, я не нахожу ключевого дефекта “момента разрыва шпилек”, толчков. Рушилось крепление к фундаменту. Силы, вызывающие вибрацию опорных конструкций и биение вала, воздействуют на узлы агрегата одновременно, но в разной степени. Это воздействие должно отражаться на всех датчиках, но в разной степени. По суммарному вибросигналу одного датчика нельзя дать достоверного заключения о механическом состоянии гидроагрегата. При разрыве шпилек появились бы протечки воды.

Создать колебания крышки турбины в радиальном (горизонтальном) направлении с размахом до 900 мкм может только вал агрегата через воздействие на турбинный подшипник. Это возможно при возникновении небалансов на роторе, на рабочем колесе, при нарушении линии вала, при обрыве лопасти и т.д. При возникновении этих условий наблюдается и рост биения вала. В предаварийном режиме работы ГА-2 биение вала не превышало допустимых значений (0,3 мм в районе турбинного подшипника, 0,15 мм в районе генераторного подшипника при допустимой величине 0,4 мм) и сохранялось в течение длительного времени (табли-

ца). Система виброконтроля выполнена так, что датчики биения вала дублированы датчиками вибрации, и они находятся на одной линии измерения. Датчик вибрации ТПРНБ и датчик, измеряющий биение, ТПНБ стояли рядом и измерения проводили в одном направлении.

В статье [1] большое внимание уделено проявлению “жгута” в различных зонах работы агрегата, и это, действительно, важно. По-видимому, произошло следующее. Спусковым крючком (триггером) начала аварии послужил “жгут”. Согласно натурным исследованиям завода-изготовителя в зоне II под рабочим колесом имеет место центральный “жгут” с частотой вращения 0,4 – 0,8 Гц. ГРАМ отключился от управления агрегатом в зоне II, где работа не рекомендуется и уровень динамических характеристик не допустим. Мощный “жгут” успел сформироваться и замкнуться на отсасывающую камеру 8:13:20 до 8:13:25. При этом происходит мощный удар вращающихся частей агрегата по подшипникам. Сила удара превзошла оставшийся запас прочности шпилек. Эксперимент, проведенный на гидроагрегате № 6 после аварии, показал, что при быстром прохождении зоны II жгут не успевает формироваться и его воздействие почти не заметно. При задержке в зоне II удар сотрясает бетонный блок агрегата.

## Выводы

Готовой системы виброконтроля, реально описывающей все режимы работы агрегата, еще нет. Ее надо создавать. Купить и собрать, по-видимому, не получится, слишком наукоемкая проблема. Предлагаю авторам подобных статей углубиться в проблемы измерения низкочастотных вибраций высоконапорных ГЭС, тогда станет понятно, почему даже за рубежом, где мы покупаем эти вибрационные системы они несут только информационную роль и вы не будете так категоричны в суждениях, оперируя только термином “вибрация”.

## Список литературы

1. *Белаш И. Г.* Причины аварии гидроагрегата № 2 на Саяно-Шушенской ГЭС: актуальность повышения надежности гидроэнергетического оборудования // Гидротехническое строительство. 2010. № 3. С. 25 – 30.
2. *Измерение* вибрации и оценка вибрационного состояния вертикальных гидравлических турбин: РД24.023117 – 88 / НПО ЦКТИ (Ленинград).
3. *Стандарт* организации ОАО РАО “ЕЭС России”: СТО 173300282.27.140.001 – 2006.
4. *Акт* технического расследования аварии, произошедшей 17 августа 2009 года в филиале “РусГидро” — “Саяно-Шушенская ГЭС имени П. С. Непорожного” / Федеральная служба по экономическому, технологическому и атомному надзору. 2009.

# Численные гидродинамические модели на высотных растрах географических информационных систем

Сидоров Н. П., старший преподаватель  
(кафедра гидротехнических сооружений ННГАСУ)

Неотъемлемой частью обеспечения надёжности и безопасности гидротехнических сооружений становится их исследование на численных гидродинамических моделях. Эти модели как инструмент обоснованного принятия управленческих решений могут использовать государственные учреждения, работающие в области водного хозяйства. Такие учреждения в последнее время переходят на географическую информационную основу с применением цифровых топографических карт, и, соответственно, гидродинамические модели должны быть максимально интегрированы с интерфейсами географических информационных систем (ГИС). Той же ГИС-основой пользуются и организации, проектирующие гидротехнические сооружения.

Непосредственно на численных гидродинамических моделях путем имитационного моделирования речных водотоков рассчитываются и прогнозируются скорости и уровни воды, зоны затопления, русловые процессы и размывы, распространение загрязнений и др.

Гидродинамические модели в области водного хозяйства и гидротехнического строительства используются для решения широкого круга задач, таких, например, как:

- обоснование проектных решений и улучшение эксплуатационных условий;
- обеспечение условий судоходства;
- выработка природоохранных мероприятий;
- обеспечение рационального использования водных ресурсов;
- моделирование чрезвычайных ситуаций;
- научные исследования.

Численное моделирование гидродинамики водотоков в условиях речных систем основывается на общих уравнениях гидродинамики Навье-Стокса, которые на практике могут приводиться к двум основным случаям: либо к одномерным условиям, когда скорости и уровни воды усреднены по поперечному сечению, случай описывается уравнениями Сен-Венана; либо к двумерным условиям плановых течений, когда скорости усреднены по вертикали, случай описывается уравнениями мелкой воды. Такие исходные уравнения известны в частных производных [1, 2], для практического же применения их необходимо дифференцировать на расчётных сетках с учётом изучаемых процессов и масштаба водных систем. Также необходимо учитывать технические возможности современной вы-

числительной техники и программных интерфейсов ввода/вывода данных, базирующихся, как правило, на ГИС.

Двумерная постановка задачи моделирования гидродинамики течений в реке, рассматриваемая в данной статье, позволяет достаточно точно описывать движение водного потока и по извилистой речной системе, обладающей обширными пойменными участками, и по водохранилищам с мелководьями и русловыми частями. Двумерная постановка задачи качественно воспроизводит структуру течений, что позволяет оценивать условия работы гидротехнических сооружений, а также, в отличие от одномерных моделей, в полной мере воспроизводит морфометрические характеристики водоёмов и водотоков, касающиеся аккумуляции объёмов воды, что имеет большое значение для водохозяйственных расчётов.

К настоящему времени накоплен большой опыт при решении двумерных плановых задач. Существуют известные программные продукты [3], выполняющие расчёты гидродинамики рек. Это, например, "Mike 21" (Дания), "SMS" (США), "Flumen" (Швейцария) и отечественные "RIVER" и "BOR", разработанные в ОАО «НИИЭС». Эти программные продукты используют развитые численные физические модели процессов [4].

**Расчётные сетки.** Важной частью решения задач методами численного моделирования является выбор расчётных сеток для последующего дифференцирования на них исходных уравнений. Могут использоваться простейшие регулярные прямоугольные сетки, структурой соответствующие высотным растрам ГИС, или более сложные неравномерные, сгущающиеся, криволинейные и треугольные сетки, а для более точного описания границы, в случае необходимости, вводятся специальные координатные системы, хорошо согласуемые с границей, или строятся специальные адаптивные сетки, которые подстраиваются под область и иногда в процессе расчетов и под решение [5], что позволяет разрешать сложные ситуаций в случае их возникновения.

Криволинейные сетки хорошо адаптируются к границам гидротехнических сооружений, но это не всегда помогает. Так, например, если на рассматриваемом участке находится шлюз шириной 18 м и глубиной на короле 5 м, то, поскольку уравнения мелкой воды имеют ограничение пространствен-

ной дискретизации две-три глубины потока, минимальный шаг сетки составит 10 м, при котором ни криволинейными ни прямоугольными сетками шлюз достоверно не описать. В этом случае требуется переходить уже на трёхмерную модель или использовать для описания работы шлюза какие-либо функции и аналитические зависимости. При рассмотрении же речных водотоков адаптация сеток под береговую линию особых достоинств не имеет, так как при изменениях уровня воды линия уреза сильно изменяется.

Необходимость использования сложных сеток вызвана в основном тем, что вычислительная техника [5] обладает ограниченным объемом хранимой информации и скоростью вычислений. В свою очередь, создание сложных сеток требует дополнительного времени на их проектирование и высокой квалификации научных работников. Поэтому для практического применения более перспективным автору представляется применение прямоугольных сеток. В пользу такого выбора говорят следующие положения.

1. При работе с картографической основой, базирующейся на ГИС, более предпочтительным является применение регулярных прямоугольных сеток, поскольку они, по сути, являются регулярными высотными растрами, широко используемыми как основной способ в ГИС представления цифровых моделей рельефа, и, соответственно, регулярные сетки не требуют дополнительных затрат на конвертацию и обработку рельефа, используют уже готовые развитые инструменты и интерфейсы. Высотный растр в настоящее время зачастую является исходной информацией. Растровые модели рельефа разрабатываются, например, бассейновыми водными управлениями, подведомственными Федеральному агентству водных ресурсов, при уточнении морфометрических характеристик водохранилищ. В таких случаях использование исходных растров в качестве расчётной сетки позволяет экономить значительную часть времени, которое при традиционном подходе тратится на построение расчётной сетки.

2. Регулярные сетки за счёт полного однородного покрытия расчётных областей более полно представляют итоговую информацию о полях течений, более полно воспроизводят структуру течений (застойные зоны, водовороты, течения на перекатах, заторы и т.п.). В итоге полученные результаты расчётов имеют единое пространственное разрешение с исходной информацией (расчёты выполняются непосредственно на исследуемом рельефе, а не на его упрощенной модели), что также имеет свои преимущества при анализе и интерпретации результатов моделирования гидродинамики водотока.

3. Связи между узлами в регулярных прямоугольных сетках нормальны друг другу и прираще-

ния равны в обоих направлениях, поэтому дифференцирование исходных уравнений разностными методами является более точным и простым по исполнению, потребляет меньше вычислительных ресурсов из-за отсутствия необходимости реализации вычислительно затратных алгоритмов с тригонометрическими функциями.

4. Недостаток регулярных сеток в их зачастую малом коэффициенте полезного покрытия, когда при описании русел сложной геометрии значительная часть узлов оказывается лежащей вне содержательной области (на суше), решается за счёт удаления из памяти компьютера пустых узлов блоками, путём сегментации общей расчётной области (блочный метод). В результате такие сегментированные сетки обладают преимуществами — простой унифицированной структурой и малым объемом потребляемых ресурсов.

5. На прямоугольных равномерных сетках также возможно сгущение сетки в дополнительно исследуемых локальных местах за счёт наложения на эти места более подробных сеток или сгущения их в отдельных блоках.

6. С 2005 г. производительность персональных компьютеров растёт практически только за счёт многопроцессорности, реализующей параллельные вычисления на многоядерных процессорах. Также появились интерфейсы программирования (CUDA, OpenCL) для массивно параллельных (поточковых) вычислений на базе физических/графических ускорителей, приближающиеся по производительности на персональном компьютере к суперкомпьютерам. В свою очередь, регулярные сетки достаточно легко приспособиваются для параллельных вычислений, а поточковые вычисления возможно эффективно выполнять в основном на регулярных сетках. Поэтому при соответствующей оптимизации расчётных алгоритмов расчёты на прямоугольных сетках при одинаковом количестве расчётных узлов превосходят по скорости расчётов нерегулярные сетки. Преимущество в скорости может быть многократным.

**Численный метод.** В свете представленных положений и достоинств прямоугольных сеток разработана методика и компьютерная программа “Stream2D”, в которой внимание акцентировано на производительности вычислений, так как программа предназначена для исследований условий работы разнообразных гидротехнических объектов, требующих высокой детализации расчётов, и в то же время имеется необходимость рассмотрения достаточно протяжённых расчётных участков. Разработанная программа позволяет получать прогнозные результаты расчётов в кратчайшие сроки, во многом за счет отсутствия необходимости дополнительных построений нерегулярных сеток.

Нестационарная гидродинамическая задача планового двумерного течения описывается уравнениями приближения мелкой воды [3]. Для практического использования выделены основные составляющие этих уравнений, представленные в дифференциальной форме следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_x^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q_x Q_y}{h} \right) + gh \frac{\partial H}{\partial x} = \\ = vh \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( \frac{Q_x}{h} \right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left( \frac{Q_x}{h} \right) \right) + \frac{\tau_{bx}}{\rho_w}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q_y^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_x Q_y}{h} \right) + gh \frac{\partial H}{\partial y} = \\ = vh \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( \frac{Q_y}{h} \right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left( \frac{Q_y}{h} \right) \right) + \frac{\tau_{by}}{\rho_w}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = q, \quad (3)$$

где  $Q_x = hV_x$ ,  $Q_y = hV_y$  — проекции удельного расхода на оси  $x$ ,  $y$ ,  $m^2/c$ ;  $V_x$ ,  $V_y$  — проекции скорости течения на оси  $x$ ,  $y$ ,  $m/c$ ;  $h = H - Z$  — глубина воды,  $m$ ;  $H$  — уровень воды,  $m$ ;  $Z$  — отметка дна,  $m$ ;  $g$  — ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $\rho_w$  — плотность воды,  $кг/м^3$ ;  $\nu$  — коэффициент вязкости, включая турбулентную,  $m^2/c$ ;  $\nu_T = \chi V_* L$  — турбулентная вязкость по формуле Л. Прандтля;  $\chi \approx 0,4$ ;  $V_* = \sqrt{\tau_b / \rho_w}$  — динамическая скорость,  $m/c$ ;  $L$  — масштаб турбулентности,  $m$ ;  $t$  — время,  $c$ ;  $\tau_{bx} = \rho_w C_{cur} Q_x$ ,  $\tau_{by} = \rho_w C_{cur} Q_y$  — проекции силы трения о дно;  $C_{cur}$  — коэффициент донного трения,  $C_{cur} = gn^2 \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} / (h^2 C^2)$ ;  $C$  — коэффициент Шези,  $C = h^{1/6} / n$ ;  $n$  — коэффициент шероховатости дна;  $q$  — интенсивность источника массы в точке,  $m/c$ .

Численное решение системы уравнений выполнено методом конечных разностей. Аппроксимация выполнена по разнесённой сетке (рис. 1), где уравнения неразрывности (3) записываются в узлах сетки, а динамические уравнения (1), (2) — в центрах связей.

При выполнении стационарных расчётов методом установления использовалась схема с неявной записью уравнений неразрывности и явной динамических уравнений, что уменьшает количество совместно решаемых уравнений. Схема характеризуется первым порядком точности по времени и

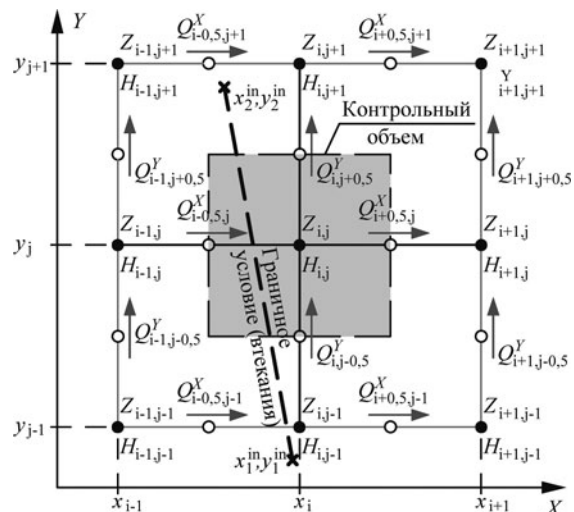


Рис. 1. Разнесённая разностная сетка

вторым по пространству. Для повышения точности расчётов применён двухшаговый итерационный алгоритм, в котором коэффициенты разностного уравнения на первой итерации определяются по значениям переменных предыдущего временного слоя, а на второй — как среднее между полученными и предыдущего временного слоя. Дискретные аналоги для уравнений (1), (2) и (3) сводятся к записи общего вида:

$$\begin{aligned} k1_{i+0,5,j} \cdot \tilde{H}_{i,j}^k + k2_{i+0,5,j} \cdot \tilde{Q}_{i+0,5,j}^k + \\ + k3_{i+0,5,j} \tilde{H}_{i+1,j}^k = f''_{i+0,5,j}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a'_{i,j} \tilde{Q}_{i,j-0,5}^k + c'_{i,j} \tilde{Q}_{i,j+0,5}^k + b'_{i,j} \tilde{H}_{i,j}^k + \\ + d'_{i,j} \tilde{Q}_{i-0,5,j}^k + e'_{i,j} \tilde{Q}_{i+0,5,j}^k = f'_{i,j}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\tilde{H}_{i,j}$  — искомый на итерации уровень воды в узле  $\{i, j\}$ ;  $\tilde{Q}_{i+0,5,j}$  — искомый удельный расход в узле  $\{i+0,5, j\}$ ;  $a_{i,j}$ ,  $c_{i,j}$ ,  $b_{i,j}$ ,  $d_{i,j}$ ,  $e_{i,j}$ ,  $f_{i,j}$ ,  $f_{i+0,5,j}$ ,  $k1_{i+0,5,j}$ ,  $k2_{i+0,5,j}$ ,  $k3_{i+0,5,j}$  — коэффициенты разностных уравнений.

И далее, разнесённая сетка позволяет свести исходную систему, состоящую из трех уравнений (1), (2), (3) для каждого узла расчётной сетки, к одному пятиточечному разностному уравнению:

$$\begin{aligned} a_{i,j} \tilde{H}_{i,j-1}^k + c_{i,j} \tilde{H}_{i,j+1}^k + b_{i,j} \tilde{H}_{i,j}^k + \\ + d_{i,j} \tilde{H}_{i-1,j}^k + e_{i,j} \tilde{H}_{i+1,j}^k = f_{i,j}. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнения (6) составляют систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Она решается итерационным методом релаксаций, в котором для ускорения сходимости последовательно выполня-

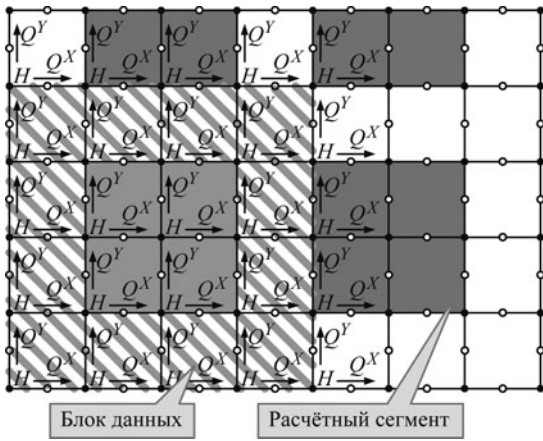


Рис. 2. Сегментация расчётной сетки на блоки

ются прямые и обратные ходы прогонки. Также для уменьшения количества итераций в расчётных уравнениях за неизвестную принято изменение уровня воды в узле, что позволило снизить на несколько порядков требуемую точность решения СЛАУ по количеству значимых знаков.

Для решения нестационарных задач программно реализована неявная схема Кранка — Николсона второго порядка точности, использующая центральные разности по времени и пространству, с аппроксимацией на той же самой разностной сетке, но отличающаяся уже одношаговым алгоритмом и решением совместно системы с тремя уравнениями в каждом узле.

**Информационные технологии.** Сегментированием общей расчётной области на блоки (рис. 2) осуществляется кардинальная оптимизация использования вычислительных ресурсов и объёма хранимых данных. Если сегмент находится вне содержательной области (на суше), информация в сегменте и расчётные параметры не используются: он остаётся пустым и, соответственно, не задействует ни оперативной памяти компьютера, ни вычислительных ресурсов (обработка/прогонка большого количества пустых ячеек, по несколько раз за один временной шаг, также потребляет много ресурсов).

Для обеспечения автономной обработки параллельными вычислительными потоками (Threads) сегментов без обращения к адресам памяти соседних сегментов информация по сегментам хранится блоками данных, причём в блок данных также включаются соседние по контуру сегмента узлы (рис. 2). Данные соседних узлов необходимы аппарату метода конечных разностей.

В основу предлагаемого нового подхода эффективного использования высотных растров, альтернативного криволинейным сеткам, легла технология использования четырёхмерных динамических массивов для хранения данных блоками. Динами-

ческие массивы характеризуются тем, что они не имеют фиксированных размеров и при смене своих размеров используют перераспределяемую память, так как динамический массив является массивом указателей на адреса памяти, а значит, его применение позволяет произвольно изменять в любой момент размер любого блока либо указывать адрес блока для обработки одному из вычислительных потоков, упуская операции копирования.

Алгоритм счёта на одной итерации временного шага состоит из следующего порядка действий:

- 1) вычисление коэффициентов уравнения (4);
- 2) вычисление коэффициентов (6);
- 3) копирование коэффициентов по периметру сегментов;
- 4) вычисление  $H$  решением СЛАУ (6);
- 5) копирование  $H$  по периметру сегментов;
- 6) вычисление  $Q$  (4).

При этом действия вычислений выполняются в параллельном режиме, а копирования данных по контурам — в последовательном режиме, так как для последних применение распараллеливания оказалось неэффективным. Кроме того, на действие 4 для обеспечения функционирования метода релаксаций выборка блоков для параллельных вычислений происходит по диагоналям так, чтобы обрабатываемый блок опирался на данные двух соседних уже обчисленных блоков.

Использование четырех вычислительных потоков на четырёхядерном процессоре “Intel Core 2 Quad” позволяет в 3 раза увеличить производительность вычислений по представленному алгоритму. То есть коэффициент эффективности применения процессора составил 0,75, в отличие от 0,25 при использовании одного вычислительного потока. До 1,0 эффективность не доходит по причине наличия в архитектуре персонального компьютера “узких мест”, проявляющихся при параллельной передаче больших объёмов данных между его подсистемами.

Оптимальный размер сегмента определён в ходе тестов по скорости расчётов в пределах  $20 \times 20 \dots 30 \times 30$  узлов. Общий прирост производительности за счёт сегментации, параллельных вычислений и других оптимизаций для сетки размером  $1300 \times 550$  и 87 тыс. активных узлов составил порядка 15 раз, для сеток большого размера (45,5 млн. узлов) сравнение без сегментации невозможно из-за ограничений по объёму оперативной памяти.

При использовании неявной схемы Кранка — Николсона эффективность алгоритма по временным затратам на один расчётный шаг снижается в 2 раза; также требуется незначительное уменьшение шага по времени, доводя снижение эффективности до 2 – 2,5 раз.

Решение вопроса производительности вычислений на детализированных моделях проблематично,



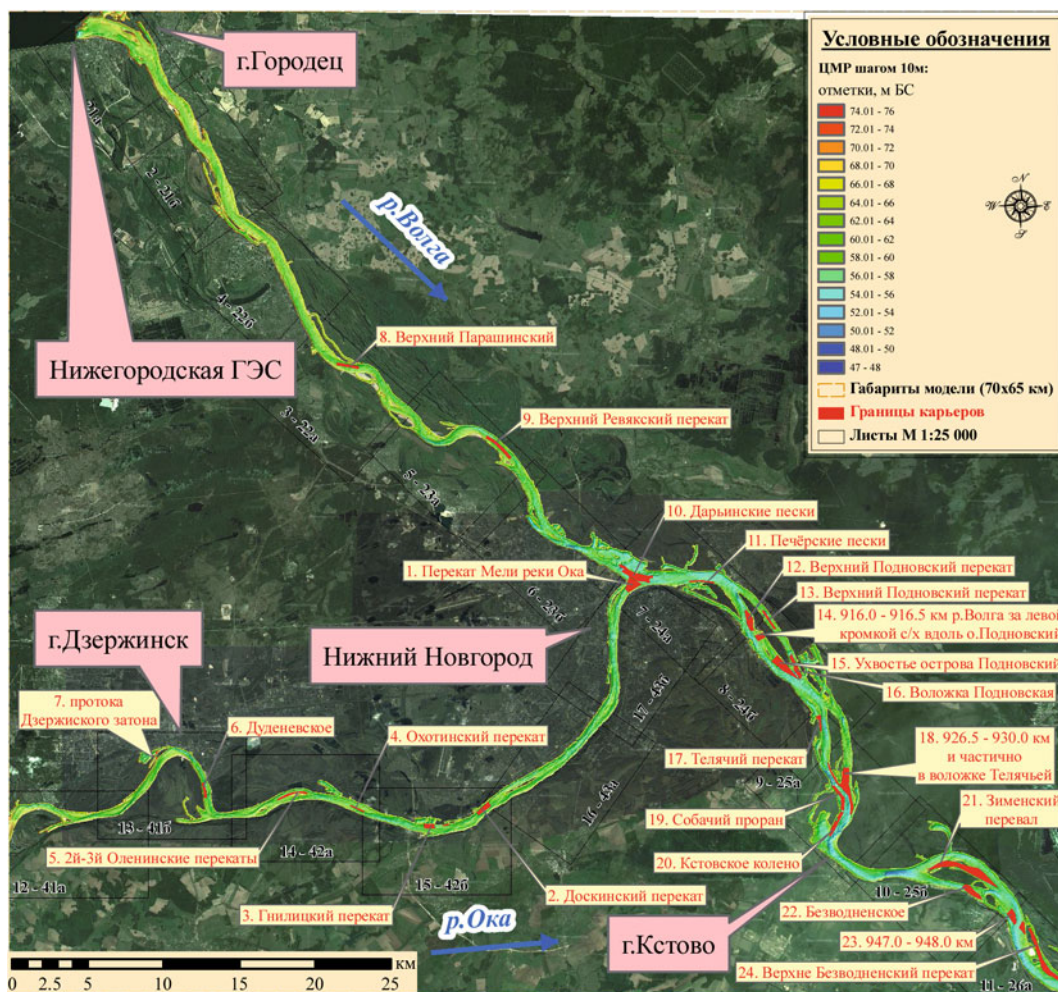


Рис. 3. Модель участка рек Волги и Оки

потому что при уменьшении шага сетки в 2 раза происходит экспоненциальное восьмикратное увеличение количества вычислений (в 4 раза увеличивается количество узлов и в 2 раза количество расчётных шагов по времени).

**Практическое применение.** На кафедре гидротехнических сооружений ННГАСУ выполнено около 20 договорных работ с моделированием гидродинамических условий и с применением программы “Stream2D” [6].

Примером, демонстрирующим эффективность представленной методики, служит выполненная по заказу Волжского ГБУ работа по исследованию влияния комплексной разработки карьеров нерудных строительных материалов, расположенных в районе Нижнего Новгорода [7] (рис. 3). Исследования выполнялись по р. Волге от 852 до 954 км судового хода и по р. Оке от устья до 58 км. Общая протяжённость изученных участков рек составила 160 км, из них по р. Волге — 102 км; по р. Оке — 58 км. В местах расположения карьеров и выше река находится в свободном состоянии, не подпёртом Чебоксарским водохранилищем, поэтому исследованные карьеры оказывают большое влияние

на вышерасположенный проблемный для судоходства участок р. Волги.

Построена цифровая модель рельефа (ЦМР) русла реки (рис. 3; 4, а), наиболее точная из известных для данного участка. Построение ЦМР выполнено на основе промеров глубин (с шагом между галсами от 25 до 150 м), выполненных Волжским ГБУ и другими организациями. Промеры выполнялись с применением промерных комплексов, в основе которых эхолот и GPS приёмник. В местах отсутствия таких промеров рельеф дополнялся либо по лоцийным картам (рис. 4, а), либо на основе анализа подводных форм рельефа видимых на космических снимках.

Выполнение научно-исследовательской работы на должном уровне потребовало достижения уникальных результатов по масштабам и детализации расчётов. Моделирование гидродинамики выполнялось на ЦМР, представляющих собой высотный растр в виде грида с шагом ячейки (сетки), принятым для площади  $70 \times 65$  км равным  $dx = dy = 10$  м, с размером сетки  $7000 \times 6500$  узлов, с общим количеством узлов 45,5 млн., в русловой части 1,5 млн.

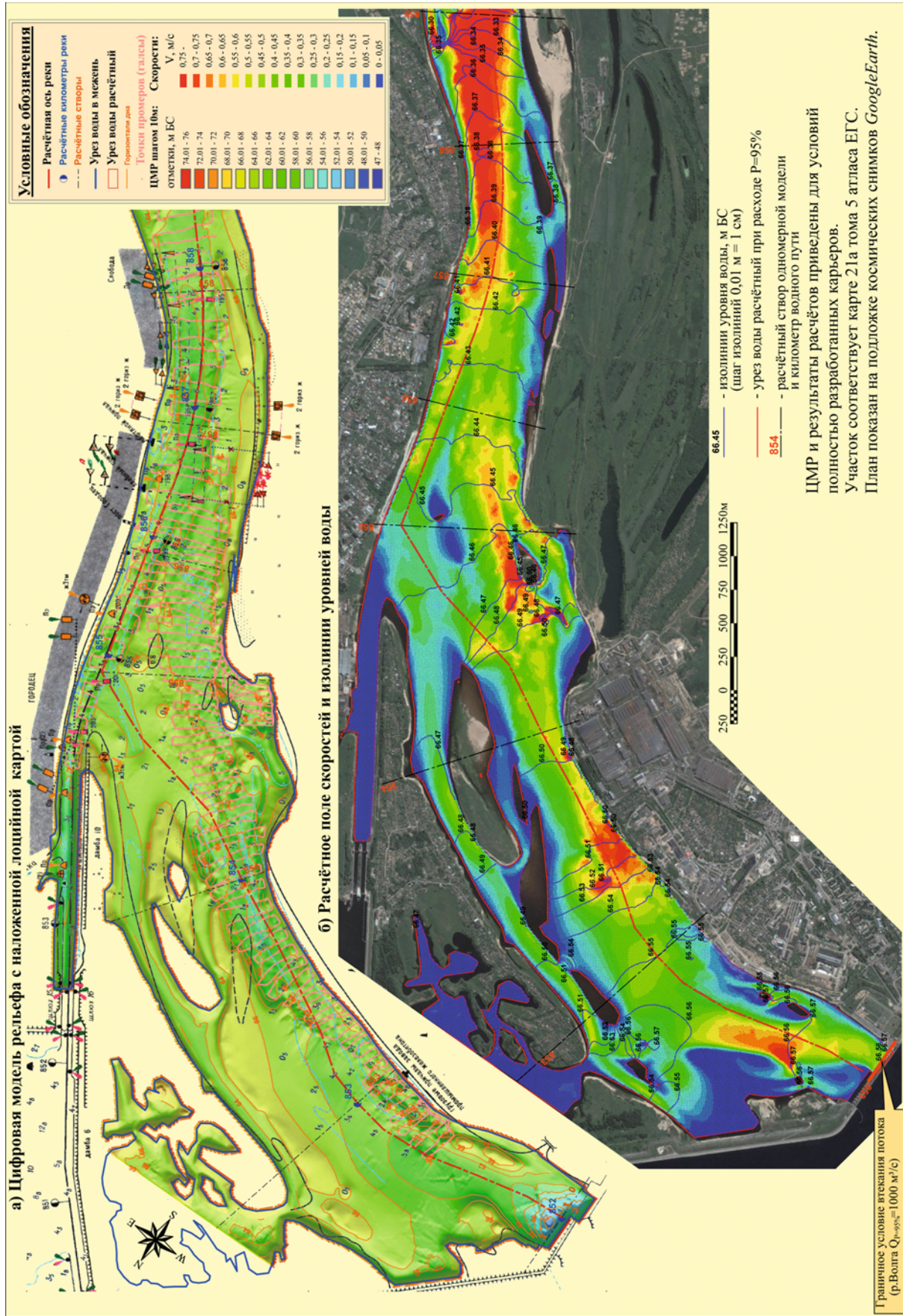


Рис. 4. Двумерный расчёт, участок км 852 – 858 судового хода р. Волга у Нижегородской ГЭС

Следует отметить, что применён расчётный шаг сетки 10 м, гораздо меньший среднего шага 80 м между промерными поперечниками. Это возможно, так как предъявляются разные требования к пространственной дискретизации для описания гидродинамики потока и для исходных данных по рельефу. Имея шаг между промерными точками вдоль галса порядка 5 м и между галсами 80 м, в промежутках рельеф интерполируется использованием развитых стандартных ГИС средств. В частности применён геостатистический метод интерполяции — кригинга, использующий статистические параметры для более точного построения поверхностей, позволяющий исследовать пространственные автокорреляции между данными, который в итоге даёт плавно изменяющуюся (не линейно) модель рельефа с экстремумами там, где они должны быть. Для обеспечения же топологической корректности экстремумов на плёсах или перекатах они могут обозначаться при интерполяции отрисованными структурными линиями. Таким образом, по опорным точкам промеров строится более подробная модель рельефа (как это обычно делается в картографии). В свою очередь, при моделировании гидродинамики в том месте где, должен быть водоворот, независимо от того, каким образом был получен рельеф, требуется расчётная сетка для математического описания физических параметров этого водоворота.

По данным калибровки коэффициент шероховатости принят  $n = 0,02$  (калибровка по продольному профилю воды), масштаб турбулентности  $L = 100$  м (калибровка по размерам области возвратного течения при внезапном расширении потока).

Моделирование выполнялось методом установления на период двух суток для вариантов существующего состояния русла и с разработкой карьеров НСМ. Расчётом получены в узлах сеток уровни воды и плановые векторы скоростей, представленные на рис. 4, б полем скоростей и изолиниями уровня воды.

По уровням воды, имеющимся в узлах расчётных сеток, построены продольные профили уровня воды (рис. 5). На рис. 5 приведены также результаты предварительных расчётов, выполненных на сетках с шагом  $dx = 20$  м; при этом разница между результатами при  $dx = 10$  м и  $dx = 20$  м практически не заметна, что указывает на достаточную детализацию разрешения —  $dx = 20$  м. Кроме того, на рис. 5 представлены уровни воды, рассчитанные на одномерной модели (створы на рис. 4) программой “hWater” [8, 9] и использованные в качестве начальных условий по уровням. Сама же одномерная модель не подходит для решения данной задачи, потому что не может дать достоверного результата на всем протяжении рассматриваемой реки. Она

пригодна только для исследования практически прямолинейного свободного участка реки выше Нижнего Новгорода, где, как видно из графиков, решения по одномерной и двумерной моделям совпадают. Ниже по течению, где распространяется подпор от Чебоксарской ГЭС и течение становится извилистым и многоорукавным, отклонения на одномерной модели достигают 25 см.

На основе анализа результатов проведенных гидродинамических расчетов выделены и охарактеризованы изменения режимов реки в случае разработки карьеров и даны рекомендации по снижению негативного влияния добычи из месторождений НСМ с точки зрения минимизации возможной посадки уровней судоходной межени на судовых ходах рек Волги и Оки, а также обеспечения гарантированных габаритов судовых ходов. В частности, размещение дополнительных карьеров на участке Нижний Новгород — Балахна было запрещено, поскольку на этом участке очень сильна “откликаемость” на вмешательство в естественные русловые процессы.

## Выводы

Экспертами международной научно-практической конференции “Современные проблемы водохранилищ и их водосборов”, секции “Гидро- и гидродинамические процессы”, проведенной в мае 2009 г. в г. Перми, выдвигалось мнение, что “8 млн. конечно-разностных узлов” по общей прямоугольной площади модели “является не посильным для персональных компьютеров” [5]. Представленная же разработка позволяет на порядок превысить этот показатель, а значит, обеспечить аппаратными вычислительными ресурсами как более высокую детализацию расчётов, так и покрытие больших расчётных площадей с тем пространственным разрешением сеток, которое требуется в задаче, или же данная разработка просто ускорит процесс вычисления и выполнение работы.

По имеющимся в печати данным, для моделирования гидродинамики в водном хозяйстве и в гидротехническом строительстве обычно применяются сетки общим количеством узлов порядка 50 тыс., а при необходимости рассмотрения протяжённых участков шаг сеток доходит до 100 – 500 м [3, 5]. То есть оптимизация по производительности вычислений осуществляется занижением детализации при увеличении шага сеток до такой степени, что размер сеток на порядки может не соответствовать масштабу изучаемых процессов — как самой структуры водного потока, так и размеров изменений морфометрии русла реки, происходящих при размещении каких-либо гидротехнических сооружений или при проведении работ, затрагивающих

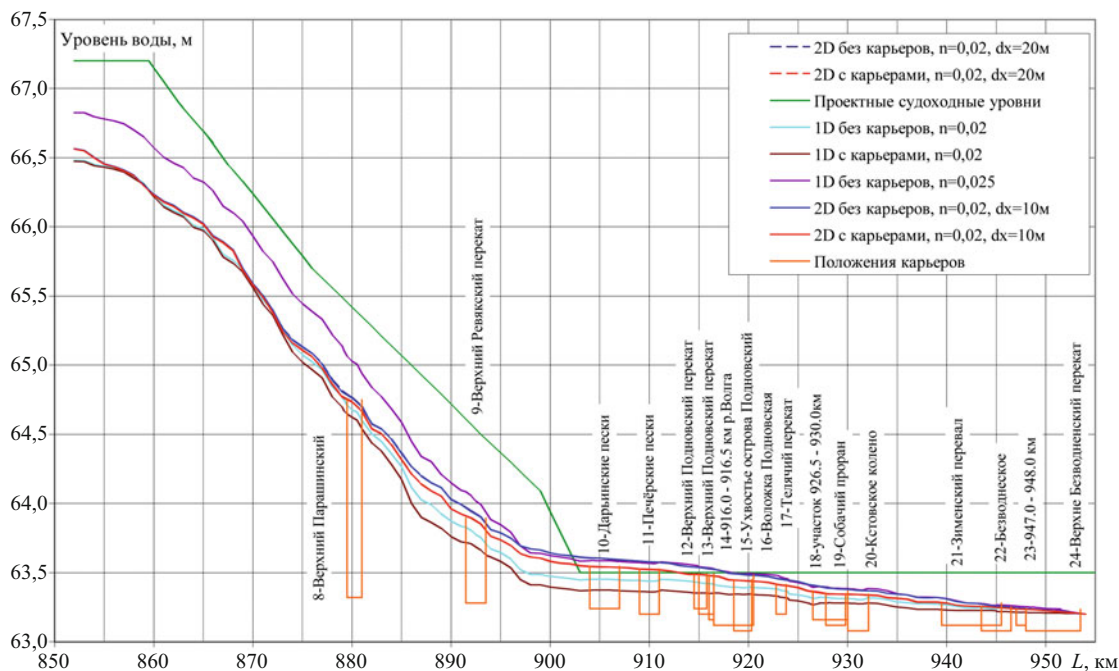


Рис. 5. Исследование комплексного влияния разработки карьеров НСМ — продольные профили воды по расчётному участку р. Волги

это русло. Такое несоответствие в размерах сеток, при всей развитости теоретической части численной модели физики процессов может делать результаты расчётов фиктивными. Модели с большим шагом сеток, судя по всему, уместно применять только для водохозяйственных и водобалансовых расчётов.

Используемые в настоящее время во многих программах различного рода нерегулярные и треугольные расчётные сетки своей структурой могут значительно исказить результаты расчётов, затрудняя их анализ, так как они не соответствуют структуре ГИС, и требуют дополнительного времени (недели) на подготовку и проектирование таких сеток. Для уменьшения вычислительных затрат в них часто используется сгущение сетки в областях, которые определяют решение задачи и(или) в которых находится исследуемый объект, а на удалении от него сетка существенно укрупняется. Выбор же расчётных сеток в первую очередь должен определяться требованиями решаемых задач и целями расчётов, но при этом неизбежно накладываются ограничения по имеющимся в распоряжении техническим вычислительным возможностям.

Моделирование гидродинамики, решая широкий круг задач используется для исследования взаимодействия гидротехнического сооружения (ГТС) с природной средой водотоков. В одних задачах требуется рассмотрение условий работы ГТС в окружающей среде и её откликаемости — изменения уровней при определённых пусках; в других — требуется изучение влияния ГТС на окружающую

среду. В первых задачах может быть достаточно получить графики колебания уровней около ГТС, и здесь увеличение на всей акватории детализации сеток не сделает результат существенно точнее. Во вторых задачах детализация существенно улучшит точность расчетов, нежели самое совершенное описание теории физики процессов и точности численного метода. Например, при рассмотрении движения загрязнений подробная сетка позволит в полной мере описать застойные зоны в местах возвратных течений, а при изучении русловых процессов воспроизведёт процессы на перекатах или границы размывов. Для криволинейных сеток их ручной процесс сгущения в нужных местах и разрежения в остальных местах может вносить в результаты моделирования некоторую вариативность или неточность, базирующуюся на умозаключениях специалиста, а это не всегда приветствуется, так как в таком случае решение может меняться от специалиста к специалисту.

В целом можно отметить, что следует повышать эффективность расчётов гидродинамики рек по соответствию масштабу изучаемых процессов и по трудоёмкости расчетов, что сделает такие расчёты более доступными для использования в повседневной деятельности организаций, работающих в областях водного хозяйства и гидротехнического строительства. Наряду с этим для моделирования деформаций речного дна, развития проранов в грунтовых плотинных и т.п. необходимо развивать и совершенствовать специальные математические

модели, рассматриваемые совместно с уравнениями мелкой воды [10].

Также можно констатировать, что размер сеток плановых задач зачастую на порядки не соответствует масштабу изучаемых процессов, поэтому решение задач в трёхмерной постановке для протяженных участков рек затруднительно. Встречаются только многослойные варианты таких задач, которые в полной мере не являются трёхмерными (они не способны используемым шагом сетки воспроизвести тот же гидравлический прыжок).

Данная статья призвана показать, что доминирующий массовый подход с использованием нерегулярных сеток при моделировании гидродинамики рек не единственный, а у подхода с применением прямоугольных сеток в виде высотных растров ГИС, в свете представленной блочной технологии, в современных условиях и на перспективу имеется ряд весомых преимуществ. Применение прямоугольных сеток по трудозатратам и экономически более эффективно.

Применяя инновационные высокотехнологичные подходы на уровне информационных технологий, можно достичь существенного повышения производительности расчётов гидродинамики рек, а также выполнения долгосрочных прогнозов. В настоящее время на высокодетализированных моделях выполняются исследования только краткосрочных временных интервалов — несколько расчётных суток, а имеется потребность в годичных и многолетних прогнозах, которые нужны в тех же водохозяйственных расчётах или в недостаточно развитых многолетних расчётных прогнозах русловых процессов и расчётах меандрирования русел.

### Список литературы

1. Роуч П. Вычислительная гидромеханика: пер. с англ. — М.: Мир, 1980.
2. Векслер А. Б., Ивашинов Д. А., Стефанишин Д. В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. — СПб: ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”, 2002.
3. Лепихин А. П., Титунов А. А. Особенности построения гидродинамических моделей для наиболее техногенных участков камских водохранилищ // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. I: Гидро- и геодинимические процессы. Химический состав и качество воды: Тр. Междунар. науч.-практ. конф. (26 мая — 28 мая 2009 г., Пермь) / Пермский гос. ун-т. 2009. С. 71 — 77.
4. Беликов В. В., Ковалев С. В. Численные исследования при решении гидравлических задач // Гидротехническое строительство. 2009. № 8. С. 61 — 67.
5. Шлычков В. А. Численное моделирование течений в Камском водохранилище // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. I: Гидро- и геодинимические процессы. Химический состав и качество воды: Тр. Междунар. науч.-практ. конф. (26 мая — 28 мая 2009 г., Пермь) / Пермский гос. ун-т. 2009. С. 164 — 169.
6. Сидоров Н. П., Соболев И. С., Горохов Е. Н. Моделирование гидродинамики участков рек и водохранилищ при антропогенном вмешательстве // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. I: Гидро- и геодинимические процессы. Химический состав и качество воды: Тр. Междунар. науч.-практ. конф. (26 мая — 28 мая 2009 г., Пермь) / Пермский гос. ун-т. 2009. С. 131 — 136.
7. Исследование влияния комплексной разработки карьеров НСМ, расположенных на участке р. Волги от 878,0 до 954,0 км и на участке р. Оки от устья до 58,0 км, на гидрологический режим и судоходные условия рек Волги и Оки: Отчет о НИР (рук. Горохов Е. Н.) / Нижегород. архитектур.-строит. ун-т. 2009.
8. Сидоров Н. П. Математическое моделирование гидродинамической аварии в каскаде грунтовых плотин // Приволжский науч. журн. / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. 2008. № 4(8). С. 87 — 93.
9. Сидоров Н. П. Расчёт на одномерной модели речной сети зон затопления по максимальным уровням водпостов из опыта СКИОВО р. Сура // Водное хозяйство России. 2010. № 3. С. 42 — 55.
10. Беликов В. В. Совершенствование методов и технологий прикладного численного моделирования в гидравлике открытых потоков: Дис. ... доктора техн. наук. М., 2005.

## Рецензия на статью

### “Численные гидродинамические модели на высотных растрах ГИС”

Работа посвящена актуальному направлению совершенствования методов численного моделирования речных течений на основе двумерных уравнений Сен-Венана (уравнений мелкой воды). Эти уравнения в различных модификациях и в сочетании с дополнительными уравнениями и замыкающими соотношениями в настоящее время широко применяются для расчетов наводнений, волн прорыва, дериваций, отстойников и других гидротехнических сооружений, заиления водохранилищ, течений в реках с деформируемым дном и т.д.

В статье предлагается производить расчеты на квадратных сетках с мелким по пространству шагом, используя при этом растровую модель рельефа земной поверхности на той же сетке. Такой подход не нов и хорошо известен в мировой практике, однако до последнего времени не нашел широкого распространения. По утверждению автора, разработан эффективный алгоритм решения, основанный на разбиении области на блоки и распараллеливании вычислительной процедуры для многопроцессорных ЭВМ. Это позволяет производить расчеты на сетках в миллионы ячеек, что в некоторых случаях (но далеко не всегда) позволяет повысить точность расчетов и сэкономить часть времени на построении расчетных сеток.

Однако весьма односторонний анализ полученных результатов не позволил автору объективно и взвешенно сопоставить различные расчетные методики, показать преимущества своего подхода по точности расчетов на тестовых задачах, в том числе нестационарных. В работе содержится ряд спорных, а иногда и неверных утверждений, замалчивается ряд проблем, присущих расчетам на квадратных сетках и применяемому в работе численному алгоритму. Представленные результаты расчета реального объекта не очень хорошо читаемы и не очень убедительны. Ниже формулируется ряд замечаний, которые необходимо учесть при переработке статьи.

1. Базовой основой всех высотных растров является трехмерная цифровая модель рельефа (ЦМР), заданная на нерегулярном наборе точек. Ее построение для конкретного объекта с использованием разнообразной исходной информации (топографические карты различных масштабов, космические снимки, лоцманские карты, промеры русла эхолотом, чертежи гидротехнических сооружений и т.д.) занимает обычно значительную часть общего времени выполнения работы. После этого интерполяция на любую расчетную сетку (квадратную, криволинейную, треугольную) производится стандартной программой, и в этом плане совмещение

расчетной сетки с растром никаких преимуществ не имеет.

2. Прямоугольная сетка плохо адаптируется к границам гидротехнических сооружений. Даже на сетке  $10 \times 10$  м задать шлюз шириной 18 м, если стены камеры расположены под углом к осям расчетной сетки, весьма затруднительно. В то же время криволинейная сетка может быть адаптирована к любому числу сооружений любых размеров и формы.

3. Утверждение о том, что использование мелкой равномерной сетки всегда повышает точность расчетов, не обосновано. Многочисленные примеры моделирования реальных объектов показывают, что сгущение сетки достаточно производить в областях, которые определяют решение задачи и/или в которых находится исследуемый объект. Например, если рассматривается прорыв напорного фронта гидроузла, то сетка сгущается до необходимых размеров в районе сооружения и в прилегающих к нему участках бьефов, а на удалении от гидроузла в водохранилище сетка может существенно укрупняться без ущерба для точности расчетов.

Из текста статьи, а также из рис. 4, а следует, что средний шаг между промерными поперечниками в русле р. Волги составлял около 80 м, так что совершенно очевидно, что шаг сетки 10 м на подавляющей части площади акватории избыточный и повышение точности является фиктивным. Кроме того, при таком шаге необходимо уже учитывать грядовой рельеф дна, поваленные в русла деревья и т.п.

5. Утверждение автора о том, что сгущение сетки является альтернативой развитию и уточнению математических моделей и численных алгоритмов, неверно. Хорошо известно, что уравнения мелкой воды имеют ограничения снизу на шаг пространственной дискретизации (две-три глубины потока), что определяется допущениями при их выводе, невозможностью разрешать структуру гидравлического прыжка и т.п. Поэтому мельчение сетки сверх этих значений не приводит к фактическому повышению точности. Кроме того, можно привести ряд примеров, когда сгущение сетки в рамках уравнений мелкой воды в принципе не приводит к уточнению расчетов и даже может их ухудшать (течения с гидравлическими прыжками, течения в узких глубоких руслах с широкими поймами). Более того, для моделирования деформаций речного дна, развития проранов в грунтовых плотинах и т.п. необходимо развивать и совершенствовать специальные математические модели, рассматриваемые совместно с уравнениями мелкой воды.

6. С утверждением автора статьи о том, что построение криволинейных сеток требует определенных затрат времени и высокой квалификации персонала, можно согласиться. Однако в процессе построения сетки и ее детализации в отдельных частях расчетной области производится ее согласование с рельефом и очертаниями гидросооружений, и в результате обычно происходит существенное уточнение численной модели. А что касается квалификации, то людям без оной лучше и не браться за выполнение сложных работ по численному моделированию.

7. В используемом автором расчетном алгоритме существует параметр турбулентной вязкости, который в приводимом примере расчета принимается постоянным во времени и пространстве. В то же время известно, что турбулентная вязкость зависит от решения, от формы границ и батиметрии области и т.д. (например, она имеет повышенное значение в зонах отрывных течений, на участках резких изменений глубин, в частности в русловых карьерах). Погрешность в задании коэффициента

турбулентной вязкости может привести к значительно большим погрешностям в расчетах, чем, например, увеличение размеров ячеек расчетной сетки (в разумных пределах).

8. Можно предположить, что эффективность и точность предлагаемого автором блочного алгоритма для неявной по времени схемы существенно снизится при расчетах нестационарных задач. Хотелось бы получить пояснения автора по этому вопросу. Хорошо бы также привести результаты расчета хорошо известного тестового примера по внезапному расширению потока в плане с образованием возвратного течения, для которого имеются надежные экспериментальные данные.

9. В приведенном примере расчета ничего не сказано об отличии в расчетах кривых свободной поверхности по одномерной и двумерной моделям, о влиянии на уровни русловых карьеров, о сопоставлении с данными натурных измерений (если они имеются), о прогнозе русловых деформаций и т.п. Таким образом, следовало бы более подробно осветить практические результаты работы.

Беликов В. В.,  
начальник отдела численных гидравлических исследований ОАО "НИИЭС", доктор техн. наук

### *Ответ на рецензию*

По указанным рецензентом замечаниям имеются следующие уточнения и пояснения, внесённые в текст статьи, перечисленные далее в последовательности замечаний рецензента.

1. Высотный растр в настоящее время зачастую является исходной информацией, поскольку высотные растры являются стандартным и даже основным в ГИС способом представления рельефа. Растровые модели рельефа разрабатываются, например, бассейновыми водными управлениями подведомственными Федеральному агентству водных ресурсов при уточнении морфометрических характеристик водохранилищ. В таких случаях использование исходных растров в качестве расчётной сетки позволяет экономить значительную часть общего времени выполнения работы, которое при традиционном подходе тратится на построение расчётной сетки. А также в итоге полученные результаты расчётов имеют единое пространственное разрешение с исходной информацией (расчёты выполняются непосредственно на исследуемом рельефе, а не на его упрощенной модели), что также имеет свои преимущества при анализе и интерпретации результатов моделирования гидродинамики водотока.

2. Основное внимание в статье, безусловно, уделено именно прямоугольным сеткам — по существу темы статьи. А также в статью внесены дополнительные пояснения о границах применимости и преимуществах подходов на основе криволинейных сеток и предлагаемого подхода. Указано что криволинейные

сетки хорошо адаптируются к границам гидротехнических сооружений, но, в свою очередь, польза от этого может быть сомнительна. Так, например, если задан шлюз шириной 18 м и глубиной на короле 5 м, то, поскольку уравнения мелкой воды имеют ограничение пространственной дискретизации две-три глубины потока, минимальный шаг сетки составляет 10 м, при котором ни криволинейными, ни прямоугольными сетками шлюз не описать. В этом случае требуется переходить уже на трёхмерную модель или использовать для его общего описания какие-либо функции и аналитические зависимости. В свою очередь, при рассмотрении водотоков адаптация сеток под береговую линию особых достоинств не имеет, так как при изменениях уровня воды линия уреза воды сильно изменяется.

3. Внесены уточнения, из которых ясно, что использование мелкой сетки вовсе не всегда повышает точность расчётов. Пояснение дано в контексте вопроса о целях расчётов. Так, моделирование гидродинамики позволяет в общем исследовать взаимодействие гидротехнического сооружения с природной средой водотоков, т.е. в определённых задачах требуется рассмотрение условий работы ГС в окружающей среде (её откликаемость, как то изменение уровней при определённых попусках), в других же задачах требуется изучение влияния ГС на окружающую среду. В первых задачах может быть достаточным получить графики колебания уровней и здесь действительно

увеличение на всей акватории детализации сеток не делает результат существенно точнее. Во вторых же задачах увеличение детализации существенно улучшает точность расчётов. К примеру, при рассмотрении движения загрязнений подробная сетка позволит в полной мере описать застойные зоны в местах возвратных течений, а при изучении русловых процессов воспроизведёт процессы на перекатах или границы размывов. При рассмотрении последствий прорывов плотины с точки зрения второй группы задач может даже быть достаточным (с точки зрения исследуемых последствий) задавать динамику размыва плотны гидрографом разлива, на основе эмпирических зависимостей, не рассматривая полного физического её описания, а процессы, происходящие на протяжении водотоков всего нижнего бьефа, рассмотреть в полном объёме (но все же проран определяет всю динамику). Ручной же процесс сгущения сетки в нужных местах и разрежения её в остальных местах может вносить в моделирование некоторую неточность, базирующуюся на умозаключениях специалиста, а это не всегда приветствуется, так как в таком случае решение может меняться от специалиста к специалисту.

4. Применение расчётного шага сетки 1 м при среднем шаге между промерными поперечниками 80 м всё-таки уместно, потому что предъявляются разные требования к пространственной дискретизации для описания гидродинамики потока и для исходного описания рельефа. При шаге между промерными точками вдоль галса порядка 10 м и между галсами 80 м в промежутках рельеф интерполируется использованием развитых стандартных ГИС средств, в частности применён метод кригинга (геостатистический метод интерполяции, использующий статистические параметры для более точного построения поверхностей, позволяет исследовать пространственные автокорреляции между данными), который в итоге даёт плавно изменяющуюся (не линейно) модель рельефа, с экстремумами там, где они должны быть. Для обеспечения же топологической корректности экстремумов на плёсах или перекатах они могут обозначаться при интерполяции отрисованными структурными линиями. Таким образом, по опорным точкам промеров строится более подробная модель рельефа. В свою очередь, при моделировании гидродинамики в том месте, где должен быть водоворот, независимо от того, каким образом был получен рельеф, требуется расчётная сетка для математического описания физических параметров этого водоворота. Данные пояснения внесены в статью.

5. Под словами “к настоящему времени накоплен достаточно большой опыт при решении двумерных плановых задач” имелось в виду, что имеется большой опыт, которым уже можно эффективно пользоваться, а развивать и совершенствовать математические модели, безусловно, как отметил рецензент, надо, о чём, в частности, в конце статьи дополнительно сказано и в текст статьи внесены необходимые исправляющие уточнения формулировок. Развитие методик, действительно, выполняется, и в статью добав-

лена ссылка с одной из таких методик, опубликованной автором в журнале “Водное хозяйство России”, № 3, 2010. Касательно мельчения сеток, цель статьи и методики не мельчить, а, скорее, обеспечить аппаратными вычислительными ресурсами покрытие больших расчётных площадей с тем пространственным разрешением сеток, которое требуется в задаче, а также повысить скорость и вычислений, и самого выполнения работы, что в конечном итоге может сделать выполнение таких расчётов более доступным и широко используемым в повседневной деятельности.

6. При построении криволинейной сетки в процессе её согласования с рельефом хотя и происходит уточнение модели, но всё-таки криволинейными сетками упрощают исходный рельеф. В частности, в статье приведены ссылки на известные примеры таких моделей с шагом до 500 м, при котором с большой натяжкой можно говорить о том, что выполнено моделирование гидродинамики течений, а не просто некий вариант водобалансовых расчётов, хотя и, согласно численному методу, выполнено параметрическое описание объекта, лежащее в пределах ограничения исходных уравнений.

Относительно того, что людям без квалификации не следует браться за выполнение сложных работ по численному моделированию, то экономия ресурсов даже таковым не помешает. К тому же представление о моделировании гидродинамики и его видах должны иметь и заказчики, и эксперты работ во многих областях, где возможно применение моделирования. Однако подобные работы, как отмечено в статье рецензента в журнале “Гидротехническое строительство”, № 8, 2009, “недостаточно полно освещены в открытой печати”, что приводит к тому, что либо не уделяется достаточного внимания возможностям предоставляемым моделированием, либо встречаются такие работы, выполненные при проектировании крупных гидроузлов, где, как видел автор, в отчёт вставлена двумерная математическая модель на основе криволинейных сеток, похожая на представленную в журнале, а расчёты выполнены по одомерной схеме, экспертиза же пройдена успешно, по-видимому, потому, что “всё равно никто ничего в этом не понимает”. В цели же статьи входит в научно-популярном виде показать на конкретном примере составные части моделирования, одновременно представив специалистам и предложению инновационного вычислительного подхода о том, что этот подход тоже имеет место.

7. В статье в первом варианте были излишне упущены пояснения относительно коэффициента турбулентной вязкости. Это было сделано для экономии места, так как автор считал его для данной статьи второстепенным. В статье в первую очередь представлен универсальный способ организации вычислительного процесса, который можно применять в рамках разных моделей турбулентности. В статью добавлено, что коэффициент турбулентной вязкости определен по дополнительно представленной в статье зависимости на основе формулы Прандтля.



8. Эффективность предложенного алгоритма по временным затратам на один расчётный шаг по времени программной реализации автора снижается в 2 раза при использовании и для уравнений неразрывности, и для динамических уравнений неявной схемы Кранка — Николсона, в отличие от представленного в статье применения для динамических уравнений явной схемы. Но такой подход дополнительно требует незначительного уменьшения шага по времени. Общее замедление расчётов составляет 2 – 2,5 раза. Применение полностью неявной схемы Эйлера первого порядка точности по времени с весовым коэффициентом 1, в отличие от 0,5 схемы Кранка — Николсона второго порядка точности, не отличается по количеству решаемых совместно уравнений и в принципе не должно отличаться по вычислительным затратам. Увеличение затрат достаточно экономично (не в 3 раза), так как отпадает необходимость двухшагового алгоритма. Касательно точности вычислений, то для выполненных стационарных расчётов достаточно использования изначально представленной схемы.

Выполнены расчёты для хорошо известного и с надёжными экспериментальными данными тестового примера по внезапному расширению потока в плане с образованием возвратного течения. Исходные данные для расчёта взяты из [2], получены аналогичные результаты (рис. 1), но перегружать статью этими материалами автор не хотел бы из-за её небольшого размера по количеству страниц и перечню рассматриваемых вопросов.

9. В статью добавлены пояснения по практической значимости и по анализу отличий расчётов на одномерной и двумерной моделях. Касательно выводов из конкретной практической работы, хотя это и важнейшая часть работы, но полностью дать их с цифрами автор не может, так как они являются собственностью заказчика. Полученные в проекте выводы в статье в основном только охарактеризованы. Сами же параметры расчетов — размер сеток достаточно убедительно показывают эффективность представленной методики. Статья доработана по рекомендациям рецензента.

Сидоров Н. П.

### *Рецензия на статью “Численные гидродинамические модели на высотных растрах ГИС”, опубликованную в журнале*

Автором статьи представлены подробные ответы на все пункты замечаний, приведенных в рецензии. Это позволило прояснить и уточнить некоторые положения статьи и позиции автора по ряду вопросов. Не всегда эти позиции совпадают со взглядами рецензента, некоторые утверждения по-прежнему являются неточными и спорными, в частности по п. 1, 2 ответа. Например, следует четко понимать, что высотный растр также является моделью, а не “непосредственно исследуемым рельефом”, так как он получен посредством интерполяции (т.е. неоднозначно в зависимости от выбранной интерполяционной процедуры) с набора точек, полученных промерами в заданном масштабе, который обычно для водохранилищ и рек существенно мельче, чем М 1:1000. Шлюз, по сути, при расчете волн прорыва и ряда других задач можно рассматривать как одномерный объект, так как он прямоугольный в плане, у него большое отношение длины к ширине и прямоугольные поперечные сечения. Поэтому течение в шлюзе хорошо описывается на прямоугольной сетке из 1 – 3 ячеек поперек и 20 – 30 ячеек вдоль шлюза, которая обязательно

должна быть ориентирована по направлению стенок шлюза. Очевидно, что на стандартном растре это в общем случае сделать невозможно. Сказанное в полной мере относится и к другим гидротехническим сооружениям (водосбросам, отдельным стенкам, причалам, струенаправляющим дамбам и т.д.)

В новом тексте статьи учтен ряд замечаний рецензента, что в целом улучшило изложение материала. Однако некоторые спорные утверждения все же остались в тексте статьи (в частности, упомянутые выше). Складывается общее впечатление, что автор не видит (или не хочет видеть) ряда недостатков и ограничений, присущих и пропагандируемому им методу расчета на квадратных сетках (к сожалению или к счастью, универсальной и идеальной расчетной методики до сих пор не придумано). Вместе с тем предлагаемый в статье блочный численный алгоритм решения уравнений мелкой воды на многопроцессорных ЭВМ, безусловно, является высокоэффективным и может с успехом применяться для решения широкого круга задач гидравлики открытых потоков.

Беликов В. В.

### Гидроэнергокомплекс Тери на р. Бхагирати в Индии

Финк А. К., главный инженер проекта (ОАО “Институт Гидропроект”)

Дано описание конструктивных решений, примененных при проектировании гидроэнергокомплекса Тери на р. Бхагирати в Индии. Приведены основные исследования, проведенные для обоснования этих решений.

**Ключевые слова:** гидроэнергокомплекс Тери, каменнонабросная плотина, водосбросные сооружения, строительство гидроузла Тери.

Гидроэнергетический комплекс Тери возводится на р. Бхагирати в штате Уттарханд в Индии и имеет многоцелевое назначение — это аккумуляция части муссонного стока, позволяющая обеспечить гарантированные потребности ирригации на площади 600 тыс. га и дополнительно оросить еще 270 тыс. га; среднегодовая выработка электроэнергии в объеме 6320 млн. кВт·ч при полном развитии комплекса установленной мощностью 2400 МВт; срезка паводков и предотвращение наводнений; подача питьевой воды в г. Дели и ряд городов штата Уттарханд; развитие инфраструктуры региона и увеличение занятости населения; проведение лесонасаждений в зоне водохранилища; укрепление грунтов от эрозии; развитие туризма.

В состав гидроэнергокомплекса (ГЭК) входят ГЭС Тери мощностью 1 тыс. МВт, ГЭС Котешвар (контррегулятор ГЭС Тери) мощностью 400 МВт и ГАЭС Тери мощностью 1 тыс. МВт. ГЭК Тери планируется построить в три очереди:

первая очередь — гидроузел Тери, включающий каменнонабросную плотину с суглинистым ядром высотой 260,5 м, комплекс водосбросных сооружений и подземную ГЭС установленной мощностью 1 тыс. МВт. Гидроузел Тери пущен в коммерческую эксплуатацию в 2007 г. ОАО “Институт Гидропроект” осуществлял функции консультанта заказчика по сопровождению строительства, включая выполнение рабочих чертежей, участие в выборе поставщиков оборудования (кроме основного), согласование и координацию чертежей поставщиков оборудования, надзор за строительством и участие в испытаниях и пуско-наладочных работах;

вторая очередь — гидроузел Котешвар, регулирующий неравномерные попуски ГЭС Тери и создающий необходимый объем воды в водохранилище для работы ГАЭС Тери. В состав сооружений входит 96-метровая бетонная водосливная плотина и ГЭС установленной мощностью 400 МВт. ОАО “Институт Гидропроект” выполнил технический проект в 1995 г. В настоящее время ведется строительство гидроузла;

третья очередь — подземная гидроаккумулирующая электростанция установленной мощностью 1 тыс. МВт, использующая в качестве бассей-

нов водохранилища гидроузлов Тери и Котешвар. ОАО “Институт Гидропроект” является консультантом заказчика. Начало строительства планируется в текущем году.

В результате строительства плотины Тери создается водохранилище сезонного регулирования с объемом воды 3,54 км<sup>3</sup> и полезным объемом 2,62 км<sup>3</sup>.

Энергетические сооружения ГЭС и ГАЭС Тери запроектированы в едином комплексе, позволяющем функционально объединить ряд элементов сооружений с целью снижения капложений в строительстве и облегчения условий эксплуатации (рис. 2): единая площадка на отметке 745 м с мехоборудованием для обслуживания водоприемников ГЭС и ГАЭС; единая платформа на отметке 840 м с мехоборудованием для обслуживания шахт ремонтных затворов подводящих туннелей ГЭС и ГАЭС; подземные камеры дисковых затворов и монтажа облицовок турбинных водоводов с едиными подъездными туннелями; общий трансформаторный зал, в котором размещаются трехфазные силовые трансформаторы ГЭС и ГАЭС, а также единое элегазовое распределительное устройство 400 кВ; общий туннель, в котором проложены элегазовые токопроводы 400 кВ выдачи мощности ГЭС и ГАЭС к пункту перехода на ЛЭП 400 кВ; единая компьютеризованная система управления ГЭК Тери, размещаемая в секции вспомогательных помещений машзала ГЭС Тери; вентиляционный туннель для вентиляции помещений ГЭС и ГАЭС; ряд подъездных туннелей, общих для ГЭС и ГАЭС.

*Каменнонабросная плотина.* Исключительно высокая сейсмичность площадки возведения высотной плотины (9 баллов по шкале MSK-64), сложные инженерно-геологические условия и наличие в зоне строительства в необходимом количестве песчано-гравийных грунтов и суглинков определили тип плотины — каменнонабросная с суглинистым ядром (рис. 3). Для обоснования конструкции плотины и обеспечения ее сейсмостойкости были выполнены: статические и динамические лабораторные исследования образцов грунтов (ПГС из карьера Dobata и суглинков из карьера Koti) с целью определения прочностных и деформативных



Рис. 1. Схема компоновки сооружений ГЭК Тери

свойств грунтов, укладываемых в тело плотины; специальные исследования суффозионной устойчивости грунтов (в том числе и фильтров), укладываемых в тело плотины; опытные укладки ПГС и суглинков с целью оптимизации технологии укатки для достижения принятой в проекте плотности грунтов; фильтрационные исследования грунтов основания плотины; опытные работы по оценке эффективности выполнения укрепительной цементации в основании и глубокой инъекционной завесы; микросейсмораионирование площадки плотины; исследования напряженно-деформированного состояния и сейсмостойкости плотины с учетом поэтапности ее возведения и заполнения водохранилища.

В результате комплексного решения вышеуказанных задач ОАО «Институт Гидропроект» рекомендовал к возведению конструкцию плотины с суглинистым ядром, обогащенным скелетным гравийным грунтом (рис. 3). Плотность укладки в тело плотины ПГС должна быть  $2,38 \text{ т/м}^3$  и суглинка  $2,08 \text{ т/м}^3$ . Для предотвращения фильтрации воды как по контакту плотина-основание, так и сквозь толщу основания в проекте плотины предусматривается укрепительная цементация основания по ширине ядра плотины, а также глубокая инъекционная цемзавеса и система галерей в основании плотины с дренажными скважинами для снижения противодавления.

Выполненные исследования сейсмостойкости плотины в соответствии с российскими и индийскими нормами показали, что принятый проектный профиль плотины обладает необходимыми коэффициентами запаса. Сейсмостойкость плотины (по требованию индийского заказчика) была проверена также на воздействие землетрясения акселерограммой землетрясения Газли с пиковыми ускорениями  $0,72g$  (горизонтальная компонента) и  $1,3g$  (вертикальная компонента).

*Водосбросные сооружения.* В результате анализа многолетних гидрологических данных стока р. Бхагирати в створе плотины за период 1963 – 1992 гг. был определен максимально возможный паводок, составляющий  $15\,540 \text{ м}^3/\text{с}$ . При проектировании водосбросных сооружений гидроузла Тери использованы следующие концепции: наличие четырех построенных строительных туннелей диаметром 11 м (в свету), из которых два расположены на правом берегу р. Бхагирати и два на левом берегу р. Бхилангана; обеспечение поэтапного заполнения водохранилища (в течение не менее трех лет) и аварийной сработки полезной емкости водохранилища гидроузла Тери.

В результате технико-экономического анализа возможных проектных решений рекомендована следующая компоновка водосбросных сооружений (рис. 2): два шахтных водосброса с отметкой гребня  $830,2 \text{ м}$ , использующих участки правобережных строительных туннелей суммарной пропускной

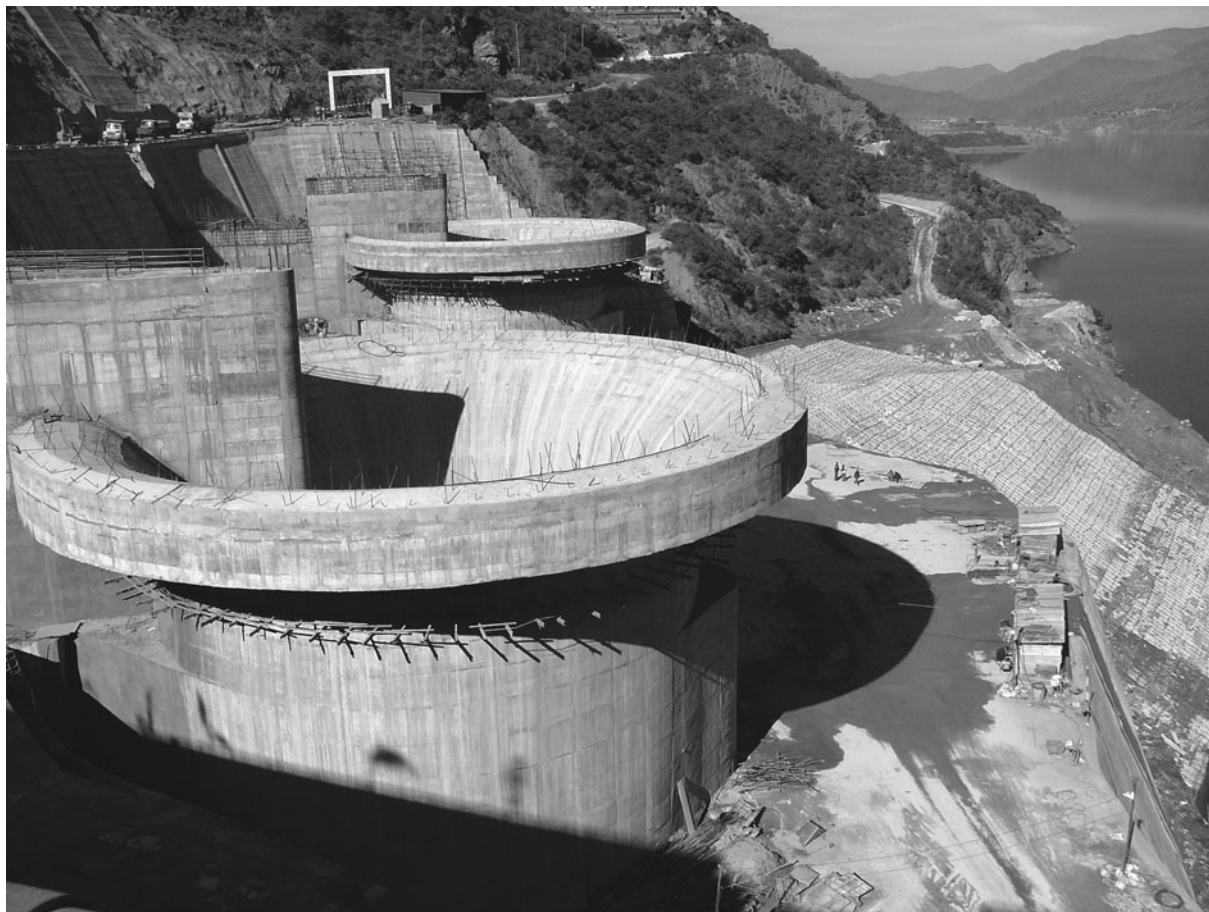


Рис. 2. Компонировка основных сооружений ГЭС-ГАЭС Тери

способностью  $3880 \text{ м}^3/\text{с}$  при ФУ  $835,0 \text{ м}$ , автоматически включающихся в работу при подъеме уровня воды выше НПУ; два шахтных водосброса с водоприемниками, оборудованными затворами, использующие левобережные строительные туннели суммарной пропускной способностью  $3680 \text{ м}^3/\text{с}$  при ФУ  $835,0 \text{ м}$ ; береговой водосброс на правом берегу (трехпролетный) с оголовками, оборудованными затворами с отметкой порога  $815,0 \text{ м}$  пропускной способностью при ФУ  $5490 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Для обеспечения начального поэтапного заполнения водохранилища, а также для его аварийной сработки на одном из правобережных шахтных водосбросов предусмотрен водозабор на промежуточной отметке  $700,0 \text{ м}$  с шахтой управления, оборудованной затворами и краном. В проекте компоновки водосбросных сооружений правого берега оригинально решен вопрос совмещения конструкции ограждающих стен водобойного колодца берегового водосброса с отводящими порталами правобережных шахтных водосбросов.

Для обоснования конструкций водосбросных сооружений в гидравлической лаборатории была создана крупномасштабная модель сооружений, а также ряд фрагментных моделей для исследований условий работы каждого элемента, в том числе водозабора на промежуточной отметке, лотка-быст-

ротока и др. Для исключения кавитационного воздействия потока на внутреннюю поверхность обделки туннелей шахтных водосбросов и для частичного гашения энергии потока рекомендована закрутка потока, формируемая специальной спиральной камерой. При этом воздух, вовлекаемый в туннель при работе водосбросов, формируется в виде воздушного жгута центральной части сечения потока и сохраняет свое положение практически на всей длине отводящих туннелей. При работе шахтных водосбросов, как показали модельные исследования, внутри туннелей происходит гашение около  $70 \%$  энергии потока за счет трения о стенки и энергетически ослабленный поток отводится в русло реки.

В ходе исследований берегового водосброса было обнаружено возникновение кавитации, действующей на бетонную поверхность лотка и на ограждающий лоток стенки. Для исключения этого негативного воздействия были рекомендованы аэрирующие устройства в трех створах по длине лотка с целью создания воздушной подушки, по которой будет скользить водный поток.

*Подземная ГЭС Тери* (рис. 2). По топографическим условиям площадки конструкция ГЭС принята подземного типа, размещается в скальном массиве левого берега на глубине около  $300 \text{ м}$  от по-



Рис. 3. Каменнонабросная плотина

верхности. В компоновке сооружений ГЭС учтены технологические требования электромеханического оборудования с целью создания благоприятных условий эксплуатации, а также специфические инженерно-геологические условия массива, вмещающего подземные выработки. Ориентация осей машинного и трансформаторного залов выбрана вкрест напластованию скальных пород, что позволило пройти эти выработки без крупных вывалов. Единый трансформаторный зал для ГЭС и ГАЭС, а также подземный машзал будущей ГАЭС приняты параллельно машзалу ГЭС.

В качестве крепления сводов и стен машинного и трансформаторного залов, камер щитового отде-

ления нижнего бьефа, камер дисковых затворов и монтажа облицовок турбинных водоводов принята податливая конструкция крепления, состоящая из нескольких слоев набрызгбетона, наносимого на металлическую сетку, и анкера диаметром 25 – 32 мм. Однако на некоторых участках подземных выработок, где прочность скальных грунтов оказалась очень низкой или произошла сильная разгрузка породы и выявлены неустойчивые блоки, были установлены тросовые ПНА, металлическая арочная крепь или железобетонная обделка. В первую очередь, это относится к скальному целику между машинным и трансформаторным залами, где установлены тросовые ПНА с расчетным усилием

#### Основные параметры и энергетические характеристики ГЭК Тери

Показатель	ГЭС Тери	ГЭС Котешвар	ГАЭС Тери
Установленная мощность, МВт	1000 (4 × 250)	400 (4 × 100)	1000 (4 × 250)
Среднегодовая выработка электроэнергии, млн кВт · ч	3470	1420	1430/2010*
Годовая выработка в маловодный год (90 % обеспеченности), млн кВт · ч	2540	1150	760/1080*
Годовая выработка в многоводный год, млн кВт · ч	4700	1870	990/1400*
Располагаемая мощность в году средней обеспеченности, МВт:			
январь	1000	400	1000/1200*
май	472	400	475/790*
Располагаемая мощность в многоводный год, МВт			
январь	1000	400	1000/1200*
май	584	400	580/740*
Располагаемая мощность в маловодный год (90 % обеспеченности), МВт:			
январь	732	400	700/760*
май	472	400	450/790*

\* В числителе — турбинный режим, в знаменателе — насосный режим.

110 т и предварительным натяжением до 70 т. В стенах камеры дисковых затворов из-за неблагоприятных геологических условий установлены металлическая крепь и тросовые ПНА. Подводящие напорные и отводящие туннели выполнены с бетонной или железобетонной обделкой.

*Строительство гидроузла.* Строительство основных сооружений гидроузла Тери начато в 1997 г, хотя четыре строительных туннеля построены в 1980-х гг.

В 1994 – 1996 гг. в Индии противники строительства гидроузла провели большую популистскую кампанию, утверждая, что конструкция плотины Тери ненадежная и при ее разрушении в результате большого землетрясения будут уничтожены крупнейшие религиозные святыни страны — города Харидвар и Ришикеш — с громадными человеческими жертвами. Правительство Индии было вынуждено создать комиссию под председательством крупнейшего специалиста по каменнонабросным плотинам Barry Cook (США). Институту “Гидропроект” было поручено выполнить комплекс исследований по обоснованию сейсмостойкости плотины. Эти исследования позволили господину В. Cook заявить о том, что конструкция высотной каменнонабросной плотины Тери безопасна.

В ходе строительства плотины, подземных сооружений и водосбросов было выявлено много геологических “сюрпризов”, однако своевременно разработанные мероприятия позволили завершить возведение гидроузла в установленные сроки. Гидроузел был принят Правительственной комиссией в коммерческую эксплуатацию в 2007 г.

В ходе строительства сформирована служба мониторинга за поведением сооружений гидроузла с участием специалистов ОАО “Институт Гидропроект”. Результаты мониторинга за поведением сооружений гидроузла свидетельствуют о их соответствии проектным критериям.

Опыт пробной эксплуатации водосбросных сооружений гидроузла Тери.

1. Правобережный шахтный водосброс с водозабором на промежуточной отметке 700,0 м.

Работа этого сооружения была опробована в ходе начального наполнения водохранилища гидроузла Тери. В октябре 2005 г. был перекрыт остававшийся в работе строительный туннель на левом берегу и началось заполнение водохранилища до пусковой отметки 724,0 м. Испытания проводились 1 декабря 2008 г. при уровне воды в водохранилище 818,0 м (НПУ 830,0 м) в течение 1,5 часов. По ирригационным требованиям в середине декабря

2005 г. был поднят затвор на оголовке водозабора, и попуски воды из водохранилища производились через него до августа 2006 г. При этом сбросные расходы изменялись в диапазоне 40 – 650 м<sup>3</sup>/с в течение почти 8 месяцев. По завершении работы водосброса, когда попуски начали осуществляться через работающие агрегаты ГЭС, в результате обследования конструкции было выявлено:

существенные повреждения в узле закрутки потока отсутствовали, хотя некоторые следы местной эрозии бетонной поверхности были обнаружены. Также на отдельных участках была выявлена эрозия защитного слоя бетона до арматуры;

непосредственно за узлом закрутки на обделке отводящего туннеля была обнаружена эрозия в виде полосы длиной 3 м, шириной до 0,5 м, небольшой глубины. Возможно, этот дефект связан с некачественной укладкой бетона в ходе строительства;

других разрушений по длине отводящего туннеля не обнаружено. Исключение составляет выходной участок туннеля, где выявлена незначительная эрозия поверхности;

в период работы водосброса отмечалось выделение водовоздушной смеси (пара) из туннеля, сопровождаемое громкими хлопками;

в камере затворов были выявлены локальные повреждения защитного слоя бетона, возможно, связанные с некачественным бетонированием.

2. Правобережный береговой водосброс.

Испытания проводились 1 декабря 2008 г. при уровне воды в водохранилище 818,0 м (НПУ 830,0 м) в течение 1,5 часов. Максимальный сбросной расход через три пролета составил 96,0 м<sup>3</sup>/с. По завершении испытаний в результате обследования водосброса было выявлено:

аэрационные устройства лотка (три ряда) работали в проектном режиме, были обнаружены незначительные локальные следы эрозии;

механическое оборудование работало в проектном режиме и замечаний нет.

3. Левобережный шахтный водосброс.

Испытания проводились 1 декабря 2008 г. при уровне воды в водохранилище 818,0 м (НПУ 830,0 м) в течение 34 мин. Максимальный сбросной расход через каждый водосброс — 36 м<sup>3</sup>/с. После завершения испытания было выявлено:

сооружения водосброса и его механическое оборудование работали в проектном режиме;

выделение водовоздушной смеси (пара) с большой скоростью из дэаэрационного туннеля, расположенного в районе низовых участков водосброса, свидетельствует о целесообразности его применения.

## Новые словари по водному хозяйству

*О русско-немецком и немецко-русском словарях по водному хозяйству, изданных Технологическим институтом в Карлсруэ в Германии в 2008 и 2010 гг.*

*Автор-составитель — доктор-инженер, профессор Р. Кромер*

Выход в свет нового технического словаря — явление довольно редкое. Так, последний немецко-русский словарь по гидротехнике (под ред. проф. М. М. Гришина) издан почти сорок лет назад. Русско-немецкий словарь по гидротехнике вообще никогда не издавался. Рассматриваемые два словаря составлены известным немецким ученым-гидротехником, доктором-инженером, профессором Рольфом Кромером при участии доктора техн. наук, профессора И. С. Румянцева и доктора-инженера, профессора Ф. Нестманна.

Оба словаря задуманы составителем в первую очередь для облегчения развития научно-технических связей в различных областях водного хозяйства между Россией и странами СНГ, с одной стороны, и немецкоговорящими странами Европы (Германия, Австрия, Швейцария, Люксембург и Лихтенштейн) — с другой. Немецко-русский словарь вышел в свет в 2008 г., а русско-немецкий — в 2010 г. Каждый словарь содержит около 40 тыс. терминов, т.е. в два раза больше, чем содержалось ранее

в отечественных таких словарях. В словари включены термины по гидротехнике, гидродинамике, гидрологии, гидравлике, по различным отраслям водного хозяйства, по экологии водных объектов, по охране и мониторингу окружающей среды, по водному менеджменту, по смежным областям, играющим важную роль при переводе и понимании научно-технической литературы по водному хозяйству.

Словари адресованы в первую очередь ученым и специалистам различных отраслей водного хозяйства, аспирантам и студентам, преподавателям немецкого языка и переводчикам научно-технической литературы. Оба словаря Р. Кромера, несомненно, будут способствовать ускорению научно-технического обмена, успешному выполнению совместных проектов, проведению научных симпозиумов и конференций и пр.

Словари отлично изданы, имеют твердые переплеты с единым дизайном.

Вызывает большое сожаление тот факт, отечественные издательства, в которые обращался автор-составитель и его коллеги, предполагая издать оба словаря в России, не сочли возможным и целесообразным это сделать. В итоге такие полезные для специалистов словари изданы в Германии.

*Каганов Г. М., доктор техн. наук (МГУП)*

---

Сдано в набор 22.03.2011. Подписано в печать 10.05.2011. 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](mailto:info@folium.ru)

Отпечатано в типографии издательства “Фолиум”

***Сердечно поздравляем  
гидроэнергетиков и гидротехников  
с Днем Победы!***

*В народной памяти живет беспримерный подвиг  
советских воинов, партизан, подпольщиков  
и тружеников тыла,  
одержавших всемирно-историческую Победу  
в Великой Отечественной войне.*

*Вечная слава павшим в борьбе за свободу  
и независимость нашей Родины!  
Бесконечная благодарность всем ветеранам  
Великой Отечественной войны!*

**Редакционная коллегия:**

Лапин Г. Г. (гл. редактор), Абубакиров Ш. И., Александров А. Е., Альхименко А. И.,  
Аргал Э. С., Баранов А. Е., Беликов В. В., Беллендир Е. Н., Бронштейн В. И.,  
Воскресенский С. М., Золотов Л. А., Каганов Г. М., Кириллов В. М., Липский И. В.,  
Ляпин В. Ю., Марчук А. Н., Машина Л. Ф., Новоженин В. Д., Осипов А. Д.,  
Парабучев И. А., Радченко В. Г., Семенов В. М., Семенов И. В., Серков В. С.,  
Стафиевский В. А., Хазиахметов Р. М., Шайтанов В. Я., Шангин В. С., Юркевич Б. Н.

**Адрес редакции:**

**Москва, Волоколамское шоссе, д. 2, к. 73**

**Почтовый адрес редакции:**

**109044, г. Москва, Воронцовский переулок, дом 2, стр. 1.**

**ЗАО НТФ «Энергопрогресс»**

**Тел./факс: (495) 741-49-81**

**E-mail: gts1930@yandex.ru**

**Internet: <http://www.energy-journals.ru>**