



# 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.

№ 6

ИЮНЬ

2013

## Содержание

### Проектирование, строительство, эксплуатация

**Великин С. А., Соболев И. С., Соболев С. В., Хохлов Д. Н.** Результаты инструментальных наблюдений и адаптивного прогноза термоабразии берегов Вилюйского водохранилища. . . . . 2

**Александровский А. Ю., Силаев Б. И., Пугачев Р. В., Якушов А. Н.** Программный комплекс «Каскад» для выполнения водохозяйственных и водноэнергетических расчетов каскадов ГЭС. . . . . 9

**Кузьмин С. А., Дерюгин Г. К.** О выборе типа сопряжения бьефов за высокой плотинной. . . . . 12

**Дурчева В. Н., Беллендир Л. Э.** Сопоставление работы внутреннего и наружного водоводов по данным натурных наблюдений. . . . . 17

**Бальзаников М. И., Зубков В. А., Кондратьева Н. В., Хуртин В. А.** Комплексное обследование технического состояния строительных конструкций сооружений Жигулёвской ГЭС. . . . . 21

**Несынова Э. Ю.** Феномены Загорской ГАЭС-2 28

### Расчеты, исследования, эксперименты

**Арефьев Н. Н.** Исследование трубопроводного транспорта пульпы при разработке сапропеля земснарядными с центробежными насосами. . . . . 33

**Соколов А. С.** Исследование гидротермического режима проточного неглубокого водохранилища-охладителя с использованием численной модели 37

### За рубежом

**Агаманова О. В., Круглова В. В.** Теоретическое обоснование конструктивных параметров усовершенствованного гидравлического стабилизатора расхода воды. . . . . 45

### Хроника

Новости гидроэнергетики и гидротехники. . . . . 54

На обложке – Светлинская ГЭС на р. Вилюй

## Результаты инструментальных наблюдений и адаптивного прогноза термоабразии берегов Вилюйского водохранилища

Великин С. А., кандидат техн. наук (Вилюйская научно-исследовательская мерзлотная станция Института мерзлотоведения Сибирского отделения РАН),

Соболь И. С., кандидат техн. наук, Соболь С. В., доктор техн. наук,

Хохлов Д. Н., инженер (Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет)

Приводятся количественные данные наблюдений переформирования термоабразионных берегов Вилюйского водохранилища в Якутии за период эксплуатации с 1972 по 2011 г. и результаты расчетного прогноза берегоформирования на предстоящее двадцатилетие для целей мониторинга экологической безопасности этого водного объекта.

**Ключевые слова:** криолитозона, водохранилище, берега, термоабразия, наблюдения, прогноз.

Территория Вилюйского водохранилища приурочена к восточной окраине Вилюйского траппового структурно-денудационного плато и представляет собой расчлененную, слабо холмистую поверхность с абсолютными отметками 350 – 400 м.

Средняя многолетняя температура воздуха в районе изменяется от  $-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Туой-Хая) до  $-10,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Сюльдюкар), самая низкая наблюдается в январе ( $-30,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), самая высокая — в июле ( $+17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Вечномерзлые породы имеют мощность 300 – 500 м, а по некоторым прогнозам — до 800 м. При этом данные по оценке геокриологической обстановки базируются на исследованиях, проведенных на участке в районе створа Вилюйской ГЭС, и характеристики мерзлой толщи могут меняться по длине водохранилища в зависимости от литолого-влажностного состава отложений, рельефа, растительности, экспозиции склонов. Среднегодовые температуры пород в нижних частях склонов равны  $-6 \dots -7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , повышаясь к водоразделам до  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Мощность снежного покрова не превышает 0,5 – 0,7 м. На залесенных участках, где плотность снега невелика, горные породы характеризуются несколько более высокими температурами.

Водоохранилище имеет сложное очертание в плане и представляет собой чередование озеровидных расширений и каньонообразных участков. Площадь водной поверхности составляет 2170 км<sup>2</sup> при НПУ = 244,0 м БС; площадь затопления земель — 1112 км<sup>2</sup>, из которых на зону периодического затопления приходится около 700 км<sup>2</sup> при величине сработки уровня 8 м (по проекту). Водоохранилище заполнено к 1973 г. и с тех пор эксплуатируется в нормальном режиме.

Ветровые условия прибрежной зоны водохранилища изучались на стационаре Вилюйской

НИМС, где на высоте 40 м над уровнем НПУ располагался флюгер дистанционной метеостанции. Данные наблюдений за три безледных сезона (1972 – 1974 гг.) показали, что при средней продолжительности наблюдений 120 суток в сезон количество дней с ветрами составляло 99,7 (83 %). Преобладали слабые ветры 1 – 2 м/с (50,8 %), 3 – 5 м/с (33,5 %). Доля более сильных ветров следующая: 6 – 8 м/с — 11,7 %, 9 – 11 м/с — 3,2 %, 12 м/с и более — 0,8 %. Больше всего дней с ветрами приходится на сентябрь и октябрь. Штормовые ветры наблюдаются в среднем 1 – 2 раза за сезон, главным образом осенью и в начале лета. В 1972 г. отмечалось два шторма при скоростях ветра 15 – 17 м/с, в 1973 г. аналогичный шторм был один раз, а в 1974 г. наблюдался шторм при ветре 12 – 14 м/с. При штормах происходили наиболее заметные разрушения берегов водохранилища.

Наибольшая толщина льда зафиксирована Вилюйской НИМС 14 мая 1974 г. в центральной части водохранилища, она составила 107 см. Средняя толщина льда — 92 см.

С созданием водохранилища уровень воды в приплотинном районе поднят на 70 м, в результате чего затоплены все надпойменные террасы на расстоянии 300 – 350 км выше створа гидроузла. Берега водохранилища имеют различную крутизну, экспликацию, литологический состав пород.

Особенностью геологического строения территории, занятой водохранилищем, является наличие многочисленных трапповых интрузий, залегающих среди осадочных толщ кембрия, ордовика, перми и триаса. С этим связано сравнительно широкое развитие на водохранилище обрывистых скальных берегов. Так, сужение, соединяющее Дуранинское и Кусаганское расширения, как и большинство сужений по всему водохранилищу, представляет каньон



**Рис. 1.** Обрывистые скальные берега Вилюйского водохранилища в районе Кусаганской "трубы"

шириной 300 – 500 м, врезанный в трапповое плато. Берега в большинстве крутые с крупноглыбовыми осыпями, часто отвесные. Коренные породы (долериты) с поверхности выветрелые, трещиноватые, слабоустойчивые к механическому воздействию (рис. 1).

На большей части длины береговые склоны водохранилища в зоне колебания уровня воды имеют



**Рис. 2.** Скальные склоны левого берега в Дуранинском расширении Вилюйского водохранилища, прикрытые слоем четвертичных отложений

маломощные четвертичные отложения элювиально-делювиального происхождения, подстилаемые коренными породами (рис. 2).

Пологие берега ( $1 - 6^\circ$ ) распространены на всех расширениях водохранилища и приурочены к участкам выхода пермских песков и слабосцементированных песчаников. Несмотря на малую крутизну,

Т а б л и ц а 1

Показатели берегов Вилюйского водохранилища после десятилетия его нормальной эксплуатации по данным ВНИМС [4]

Породы берега	Четвертичные аллювиальные отложения	Песчаные отложения юры	Триасовые отложения		Пермские песчаные отложения	Песчаные отложения каменно-угольного возраста	Карбонатные отложения ордовика	Всего
			туфы	долериты				
Протяженность береговой линии, км	814	22	400	455	583	45	57	До 2500
Характерный уклон берега, град	< 5 и до 10	5 – 10	15 – 20 и более		5 – 10	5 – 10	10 – 20	–
Протяженность размываемых берегов, км	50,3	3	12,5	86	55	3,5	2	320 (13 %)

Т а б л и ц а 2

Характеристики переформирования берега Вилюйского водохранилища на участке № 2 в створе № 1

Участок	Створ	Годы наблюдений	Величина отступления бровки берега		Объем размываемой породы	
			м	м/год	м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup> /год
2	1	1972 – 1978	15,24	2,54	2525,4	420,9
		1978 – 1982	6,14	1,54	1694,7	423,6
		1982 – 1985	2,7	0,9	607,9	202,6
		1985 – 2011	11,7	0,45	4655,3	179,0
		1972 – 2011	35,78	0,91	9483,3	243,1

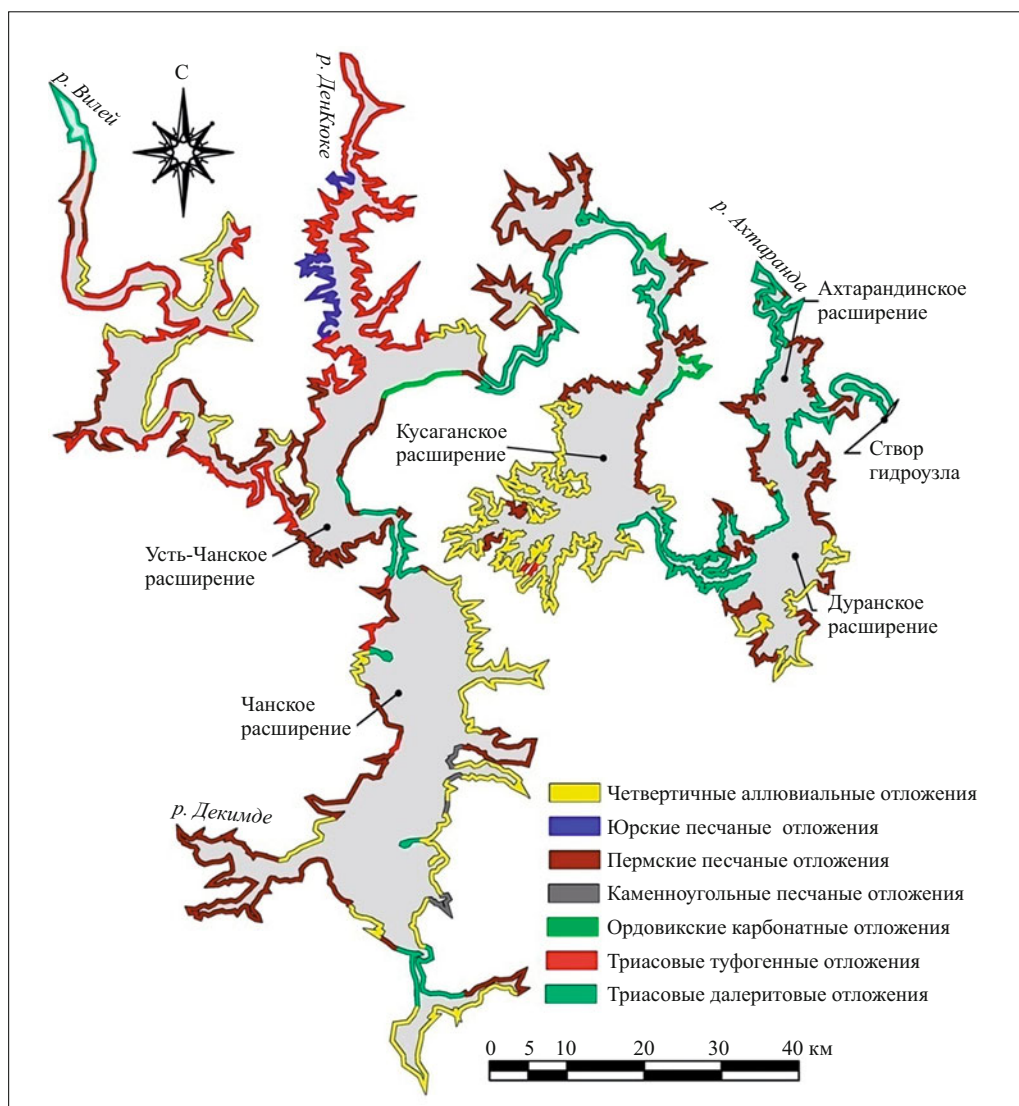


Рис. 3. Схема геологического строения берегов Вилуйского водохранилища

хорошо дренированы. Покрываются лиственнично-сосновым лесом.

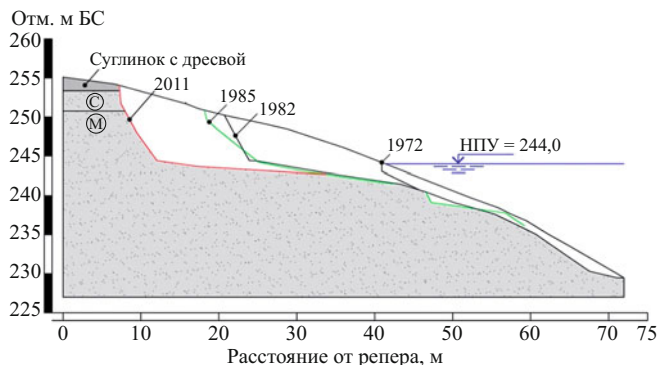
Первые исследования берегов Вилуйского водохранилища были проведены в период его заполнения летом 1968 г. В. М. Широковым [1]. В Ахтарандинском, Дуранинском, Кусаганском, Усть-Чонском и Чонском расширениях ВНИМС оборудовала

17 наблюдательных участков, где по профилям измерялась берегопереработка в 1972, 1978, 1982, 1983, 1984, 1985 гг. На базе топографической карты масштаба 1:100000, полевых исследований, теоретических разработок Д. П. Финарова [2] и А. И. Ермолаева [3] берега были систематизированы по геологическому строению (рис. 3), сделана их типиза-

Таблица 3

Характеристики переформирования берега Вилуйского водохранилища на участке № 5 в створе № 1

Участок	Створ	Годы наблюдений	Величина отступления бровки берега		Объем размыва породы	
			м	м/год	м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup> /год
5	1	1972 – 1982	9,03	0,9	2169,6	216,9
		1982 – 1985	0,56	0,28	338,1	112,7
		1985 – 2011	4,94	0,19	1235,0	47,5
		1972 – 2011	14,53	0,37	3742,7	95,9



**Рис. 4.** Наблюдаемые профили берега на участке № 2 в створе № 1 в Дуранинском расширении Вилюйского водохранилища

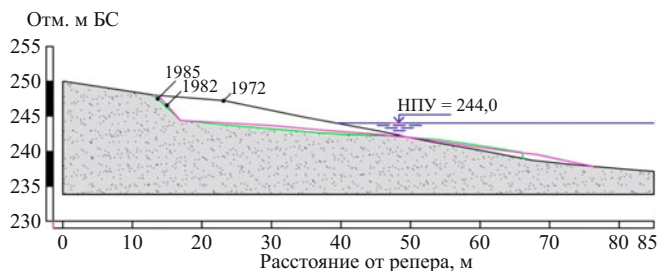
ция по группам (нейтральные, аккумулятивные, термоденудационные, термоабразионные, термокарстовые) и зафиксировано состояние после десятилетия нормальной эксплуатации водохранилища (табл. 1).

Термоабразионная группа берегов наблюдается в озеровидных расширениях водохранилища и представлена следующими видами:

обвально-осыпной термоденудационно-термоабразионный берег. Сложен выветрелыми и трещиноватыми долеритами и туфами. Горные породы разрушаются термоденудацией и удаляются под воздействием волнения;

обвально-глыбовый термоабразионный берег. Сложен известняками, доломитами, мергелями. Ветровое волнение осуществляет размыв оттаивших пород непосредственно в зоне воздействия;

обвально-осыпной термоабразионный берег. Сложен печаниками юры, перми, карбона и аллювием высоких террас. Отложения в мерзлом состоя-



**Рис. 5.** Наблюдаемые профили берега на участке № 5 в створе № 1 в Дуранинском расширении Вилюйского водохранилища

нии имеют высокую механическую прочность. Под действием тепловой энергии воды происходит оттаивание отложений, затем их механическое разрушение волнами [4].

В августе-сентябре 2011 г. ННГАСУ при содействии ВНИМС экспедиционным порядком проведены инструментальные измерения береговых профилей на участках № 1 – 7, позволившие продлить ряды наблюдаемых прежде параметров берегоперформирования. Ниже помещены характерные примеры развития термоабразионных берегов водохранилища на этих участках.

Участок № 2 бывшего стационара ВНИМС в Дуранинском расширении. Экспозиция склона изменяется от южной до юго-западной, крутизна от 26 до 16°. Обвально-осыпной термоабразионный берег сложен песчаниками и песками пермского возраста. Среднегодовая энергия волнения 240 000 кДж/год на пог. м берега. На участке обозначено шесть наблюдательных створов. На рис. 4 и в табл. 2 представлены данные по створу № 1, восстановленному в 2011 г.



**Рис. 6.** Термоабразионный правый берег Вилюйского водохранилища на участке № 6 в Кусаганском расширении, сложенный мелкими песками

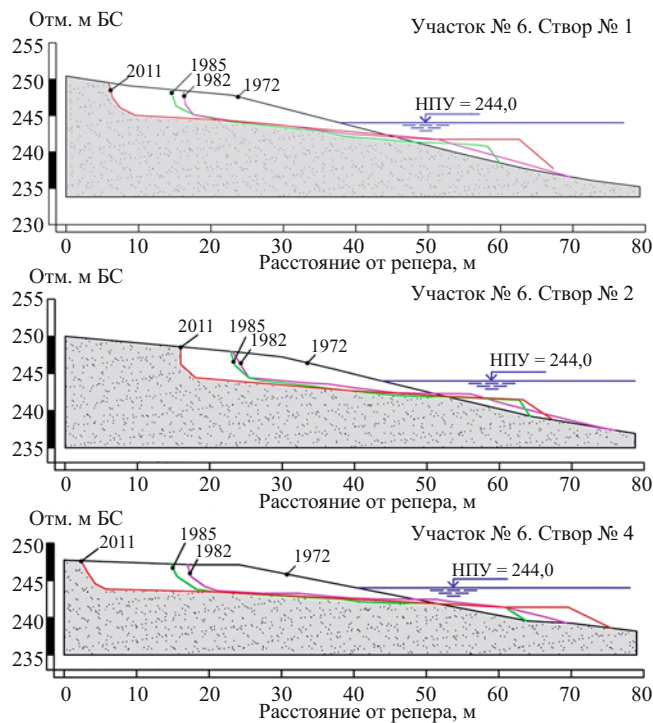


Рис. 7. Наблюдаемые профили берега на участке № 6 в створках № 1, 2, 4 в Кусаганском расширении Вилуйского водохранилища

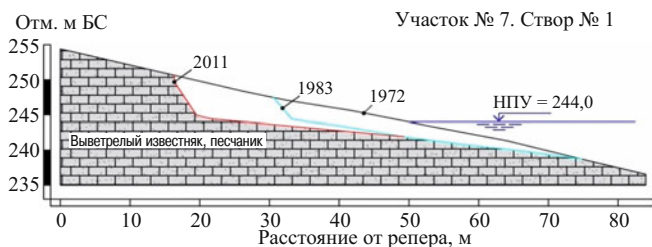


Рис. 9. Наблюдаемые профили берега на участке № 7 в створе № 1 вблизи устья Усть-Чонской “трубы” Вилуйского водохранилища

**Участок № 5.** Находится на правом берегу Дуранинского расширения. Склон юго-западной экспозиции, крутизна  $7^\circ$ . Берег сложен песками, желтовато-серыми, мелкозернистыми, хорошо сортированными: обвальнo-осыпной термоабразионный. Среднегодовая энергия волнения 631 040 кДж/год на пог. м берега. На участке — один наблюдательный створ, данные измерений в нем представлены на рис. 5 и в табл. 3.

**Участок № 6.** Расположен на правом берегу Кусаганского расширения вблизи гидропоста “Кусаган” (рис. 6). Берег со склоном северной экспозиции крутизной  $1-6^\circ$  сложен аллювиальным мелким песком, обвальнo-осыпной термоабразионный. Энергия волнения 247 960 кДж/год на пог. м. Измерения профилей берега проводились по пяти поперечникам. Результаты представлены на рис. 7 и в табл. 4.



Рис. 8. Термоабразионный правый берег Вилуйского водохранилища на участке № 7 вблизи устья Усть-Чонской “трубы”, сложен выветрелыми известняками и песчаниками

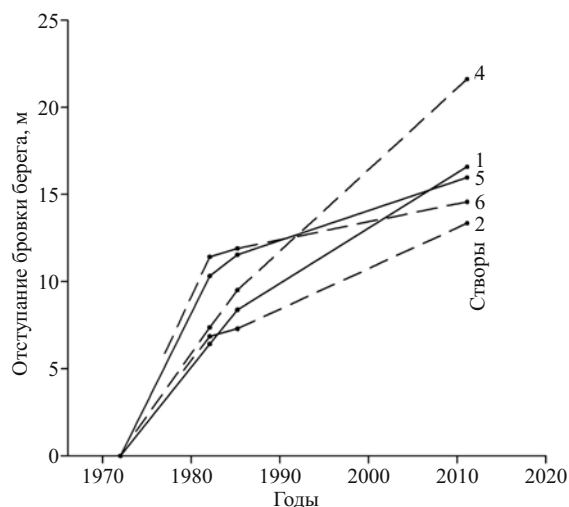


Рис. 10. Графики наблюдаемого отступления бровки термоабразионного берега Вилуйского водохранилища на участке № 6 в створках № 1 – 6

**Участок № 7.** Находится на правом берегу водохранилища вблизи устья Усть-Чонской “трубы” (рис. 8). Склон юго-западной экспозиции, крутизна его возрастает с юга на север от  $5$  до  $11^\circ$ . Берег сложен сильноветрелыми известняками и песчаниками (карбонатные породы ордовика), обвальнo-глыбовый термoабразионный. На участке — один наблюдательный створ, данные по которому приведены на рис. 9 и в табл. 5.

Из приведенных данных (см. табл. 2 – 5) следует, что средние скорости разрушения термоабразионных берегов водохранилища за многолетний период эксплуатации (1972 – 2011 гг.) составили  $0,35 - 1,41$  м/год.

Термоабразионный процесс на участке № 6 с типичной для Вилуйского водохранилища наблюдаемой картиной скоростей отступления бровки берега (рис. 10) подвергнут анализу и прогнозу. На

Характеристики переформирования берега Вилюйского водохранилища на участке № 6 в створах № 1 – 6

Участок	Створ	Годы наблюдений	Величина отступления бровки берега		Объем размытой породы	
			м	м/год	м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup> /год
6	1	1972 – 1982	6,55	0,65	2083,1	208,3
		1982 – 1985	1,72	0,57	406,4	135,5
		1985 – 2011	8,3	0,32	1211,8	46,1
		1972 – 2011	16,57	0,42	3701,3	94,9
	2	1972 – 1982	6,81	0,68	1931,5	193,1
		1982 – 1985	0,23	0,07	404,8	134,9
		1985 – 2011	6,85	0,26	976,2	37,5
		1972 – 2011	13,89	0,35	3312,5	84,9
	4	1972 – 1982	7,1	0,72	2367,1	236,7
		1982 – 1985	2,3	0,76	614,6	204,8
		1985 – 2011	12,3	0,47	1747,8	67,2
		1972 – 2011	21,7	0,55	4729,5	121,2
	5	1972 – 1982	10,13	1,02	3376,9	337,7
		1982 – 1985	1,21	0,4	421,5	140,5
		1985 – 2011	4,66	0,18	1770,6	68,1
		1972 – 2011	16,2	0,41	5569,0	142,7
	6	1972 – 1982	11,22	1,12	2931,3	293,1
		1982 – 1985	0,55	0,18	419,6	139,8
		1985 – 2011	2,83	0,11	1541,8	59,3
		1972 – 2011	14,6	0,37	4892,7	125,4

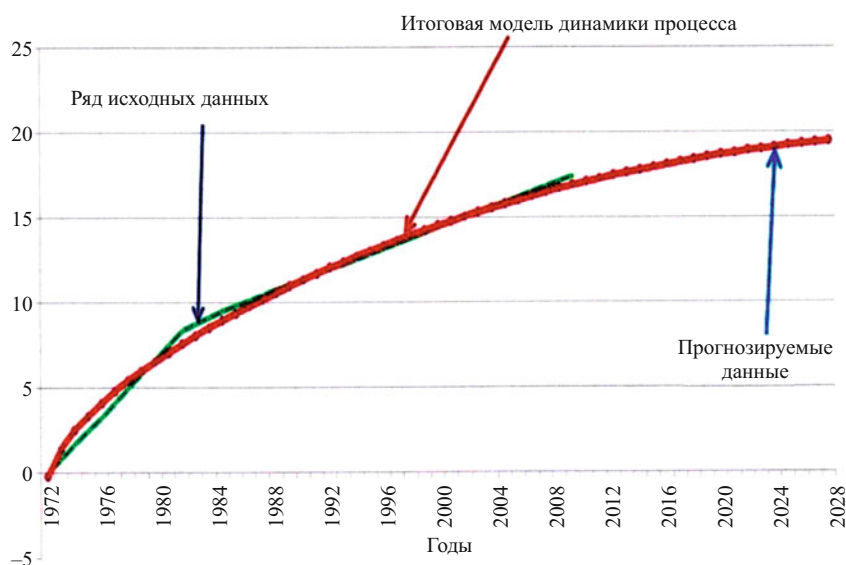


Рис. 11. Адаптивная модель динамики процесса отступления бровки термоабразионного берега Вилюйского водохранилища на участке № 6

Характеристики переформирования берега Вилюйского водохранилища на участке № 7 в створе № 1

Участок	Створ	Годы наблюдений	Величина отступления бровки берега		Объем размывтой породы	
			м	м/год	м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup> /год
7	1	1972 – 1983	41,6	3,78	2479,7	225,4
		1983 – 2011	13,72	0,49	2036,5	72,7
		1972 – 2011	55,32	1,41	4516,2	115,8

базе натуральных данных по этому участку проведена верификация разработанных в ННГАСУ численно-аналитического [5] и адаптивного [6] методов расчета переформирования термоабразионных берегов водохранилищ. На рис. 11 представлен результат адаптивного моделирования берегопереформирования на участке № 6. Адаптивная модель динамики процесса на участке составлена на базе линейного, полиномиального и логарифмического трендов с набором весовых коэффициентов качества приближения 0,307; 0,368; 0,325. Результат прогноза определенно указывает на продолжение замедления скорости термоабразии по мере увеличения длины береговой отмели (в стационарных климатических условиях). Если в течение последних 25 лет (1985 – 2011 гг.) средняя скорость отступления бровки берега на участке была 0,32 м/год, то в следующие 20 лет она ожидается 0,24 м/год.

### Выводы

При незначительной протяженности размываемых берегов в 13 % длины береговой линии (табл. 1) берегопереформирование на Вилюйском водохранилище не приводит к практически значимому изменению со временем площади его водного

зеркала. Но изучение термоабразии берегов Вилюйского водохранилища — первого из крупных водохранилищ криолитозоны — имеет научное и практическое значение для обеспечения экологической безопасности искусственных водоемов при продвижении гидроэнергетического и водохозяйственного строительства на северо-восток России.

### Список литературы

1. Широков В. М. Формирование берегов при создании Вилюйского водохранилища. — Новосибирск: Западно-Сибирское кн. изд-во, 1979.
2. Финаров Д. Н. Динамика берегов и котловин водохранилищ гидроэлектростанций СССР. — Л.: Энергия, 1974.
3. Ермолаев А. И. Классификация термоабразионных берегов водохранилищ и прогнозирование их переработки // Береговые процессы в криолитозоне. — Новосибирск: Наука, 1984.
4. Иванов М. С., Бурлаков В. М. Криогенное строение многолетнемерзлых пород бассейна среднего течения р. Вилюя: Научно-технический отчет / ВНИМС ИМ СО РАН, 1986.
5. Соболев И. С., Хохлов Д. Н. Автоматизация инженерных расчетов берегопереформирований на водохранилищах криолитозоны // Проблемы инженерного мерзлотоведения: Материалы IX международного симпозиума (3–7 сентября 2011 г.). — Якутск: ИМ СО РАН, 2011.
6. Громов Ю. А., Соболев И. С., Соболев С. В. Адаптивный метод экстраполяции данных наблюдений и прогнозирования характеристик абразии берегов эксплуатируемых водохранилищ // Водное хозяйство России. 2013. № 1.



# Программный комплекс “Каскад” для выполнения водохозяйственных и водноэнергетических расчетов каскадов ГЭС

Александровский А. Ю., доктор техн. наук,

Силаев Б. И., Пугачев Р. В., кандидаты техн. наук,

Якушов А. Н., инженер (Национальный исследовательский университет “МЭИ”)

Изложены алгоритм и технические возможности программного комплекса “Каскад”, а также база данных, необходимая для его использования.

**Ключевые слова:** ГЭС, водохозяйственные расчеты, водноэнергетические расчеты, программный комплекс “Каскад”.

Водохозяйственные и водноэнергетические расчеты в составе проекта гидроэлектростанции являются основополагающей частью обоснования параметров и показателей работы водохранилища ГЭС. Степень детализации их проведения, точность учета всех факторов, влияющих на условия функционирования ГЭС, в значительной степени определяют технико-экономические показатели всего проекта.

В МЭИ разработан программный комплекс “Каскад” для проведения широкого круга водохозяйственных и водноэнергетических расчетов как изолированных ГЭС, так и каскадов ГЭС. В основу проведения расчетов положены следующие положения:

расчеты регулирования стока водохранилищем ГЭС используют натурные ряды наблюдений за стоком;

режим регулирования стока ГЭС базируется на действующем водном законодательстве (правила использования водохранилищ, постановления Законодательной и исполнительной власти).

Имитационная модель базируется на двух видах исходной информации: условно постоянной, не требующей систематического обновления, и условно переменной, требующей систематического обновления.

Условно постоянная информация включает:

наименование и количество расчетных створов; гидрологию в заданном створе водохранилища в виде наблюденного гидрологического ряда среднеинтервальных расходов воды для каждого года. При этом для самого верхнего водохранилища это естественный приток воды в него, а для нижележащих водохранилищ это естественный расход бокового притока воды;

потери воды из водохранилища;

потери расхода воды на фильтрацию в виде среднеинтервальных расходов в нижний бьеф ГЭС;

потери на испарение в виде дополнительного слоя испарения с поверхности зеркала водохранилища ГЭС;

потери на льдообразование в виде средней толщины льда в водохранилище данной ГЭС;

потери на шлюзование в виде потерь расхода воды из водохранилища данной ГЭС в период навигации;

статические и динамические характеристики зависимости объема воды от уровня у плотины и суммарного притока воды в водохранилище;

характеристику зависимости площади зеркала водохранилища от уровня воды у плотины ГЭС;

характеристику зависимости уровня воды от расхода в нижнем бьефе ГЭС для периода открытого русла и для зимних условий при наличии подпора или его отсутствии от нижележащей ГЭС;

диспетчерские графики управления режимами работы водохранилища ГЭС в виде зависимостей среднего расхода воды в нижний бьеф или средней мощности ГЭС от уровня воды в водохранилище в каждый расчетный интервал. Требуемый расход воды в нижний бьеф данной ГЭС может учитывать не только требования этой станции, но и требования нижнего бьефа любой из нижележащих ГЭС в случае, если указанные требования не могут быть удовлетворены собственным водохранилищем. Такой режим соответствует компенсированному регулированию по расходу воды. Аналогичные требования по управлению режимами использования водных ресурсов водохранилищ могут быть не только по расходу воды, но и по суммарной мощности нескольких ГЭС:

требования участников водохозяйственного комплекса (водный транспорт, рыбное хозяйство, сельское хозяйство и др.) по уровням воды в водохранилище и расходам или уровням воды в нижнем бьефе ГЭС;

безвозвратные отборы воды из водохранилища; зависимость КПД гидроагрегата от подведенного напора ГЭС на линии ограничения по мощности генератора и пропускной способности гидротурбины;

потери напора в водоподводящих сооружениях;

требуемую точность расчета уровней  $\Delta z$ , расходов  $\Delta Q$  и мощности  $\Delta N$ ;

диспетчерские графики компенсированного электрического регулирования мощности.

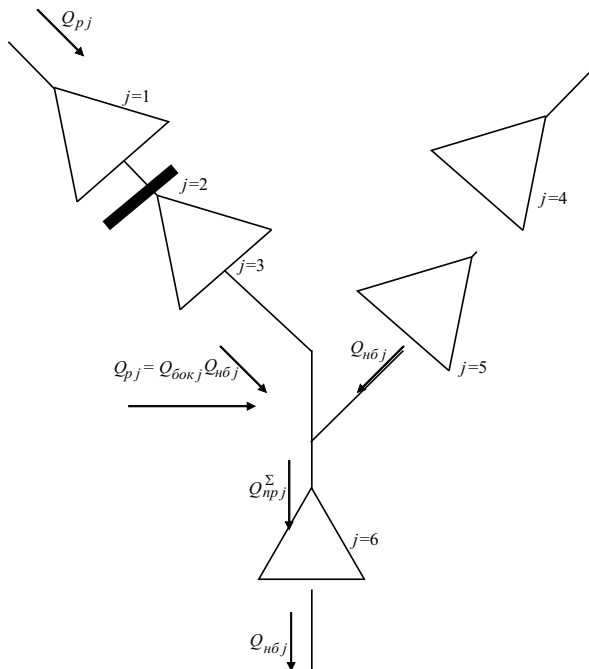


Рис. 1. Схема каскада водохранилищ в бассейне реки:

$j = 1$  — створ ГЭС с водохранилищем;  $j = 2$  — створ без водохранилища;  $Q_{nbj}$  — расход в нижний бьеф в  $j$ -м створе;  $Q_{pj} = Q_{бокj}$  — расчетный приток воды, равный боковому притоку на участке между створами;  $Q_{pj}$  — расчетный приток в верхний створ;  $Q_{прj}^{\Sigma}$  — суммарный приток воды к  $j$ -му створу.

Расчетный интервал времени принят равным декаде.

Условно переменная информация включает: расчетный период времени, который может включать весь период наблюдений за стоком или его часть;

отметку уровня воды у плотины водохранилища на начало расчетного периода соответствующего месяца.

Расчетный период разбивается на расчетные интервалы. Началом расчетного периода является первое число данного месяца.

Основным уравнением математической модели каскада ГЭС (рис. 1) является уравнение водного баланса, которое отражает закон сохранения массы и записывается в виде

$$\bar{Q}_{nbij} = \bar{Q}_{rij} + \bar{Q}_{нбi(j-1)} \pm \bar{Q}_{vij} - \bar{Q}_{испij} - \bar{Q}_{отbij} - \bar{Q}_{лиj}, \quad (1)$$

где  $\bar{Q}_{nbij}$ ,  $\bar{Q}_{нбi(j-1)}$  — среднеинтервальный расход воды в нижний бьеф в  $i$ -м расчетном интервале в  $j$ -м и  $(j-1)$ -м створе;  $\bar{Q}_{rij}$  — среднеинтервальный расход расчетного гидрографа;  $\bar{Q}_{vij}$  — среднеинтервальный расход воды водохранилища;  $\bar{Q}_{испij}$  — среднеинтервальные потери расхода воды на испарение из водохранилища;  $\bar{Q}_{отbij}$  — среднеинтервальные безвозвратные отборы воды из водохранилища в  $i$ -м расчетном интервале в  $j$ -м створе ГЭС;  $\bar{Q}_{лиj}$  —

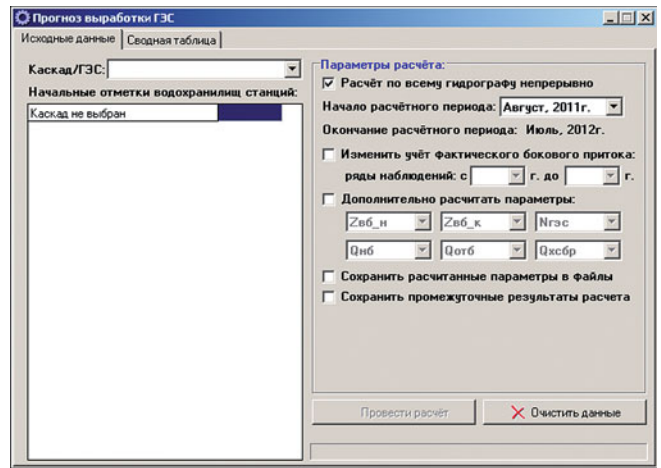


Рис. 2

Каскад/ГЭС: Волжско-Камский каскад

Рис. 3

Начальные отметки водохранилищ станций:

Станция	Z <sub>бб</sub> , м
Иваньковская ГЭС	123.90
Угличская ГЭС	112.80
Рыбинская ГЭС	
Нижегородская ГЭС	

Рис. 4

среднемесячные потери расхода воды из водохранилища на льдообразование.

Программный комплекс включает в себя базу данных (в формате "Microsoft Access"), содержащую ряды наблюдений, параметры станций каскадов и исполняемый файл программы (ProVGES.exe).

Интерфейс программы представлен на рис. 2.

После запуска программа загружает список доступных каскадов и ГЭС из базы данных, после чего пользователь должен выбрать каскад (или ГЭС) из списка, для которого будет проводиться расчёт (рис. 3).

После выбора каскада программа автоматически загрузит список входящих в него гидроэлектростанций, для которых пользователь должен задать начальные отметки водохранилищ (рис. 4).

Если пользователь не задаст начальную отметку для какой-либо станции, то программа перед началом расчёта примет значение этой отметки равной НПУ или загрузит из предварительно созданного файла.

В правой части расчёта пользователь может указать параметры расчёта, такие, как "Начало расчетного периода" (рис. 2).

При загрузке данных по каскаду из базы данных программа автоматически определяет период наблюдений для данного каскада, однако пользова-

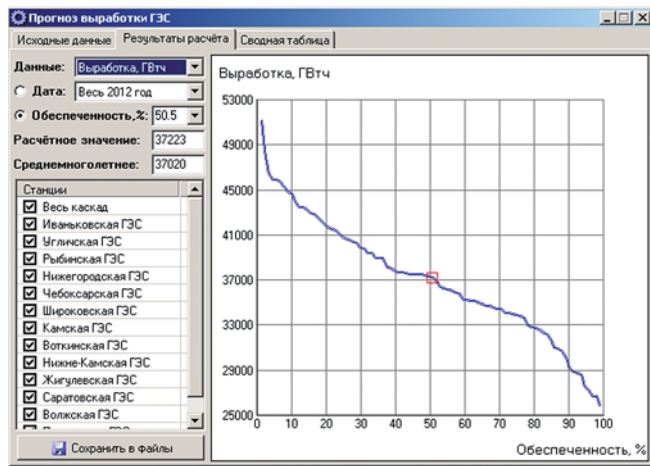


Рис. 5

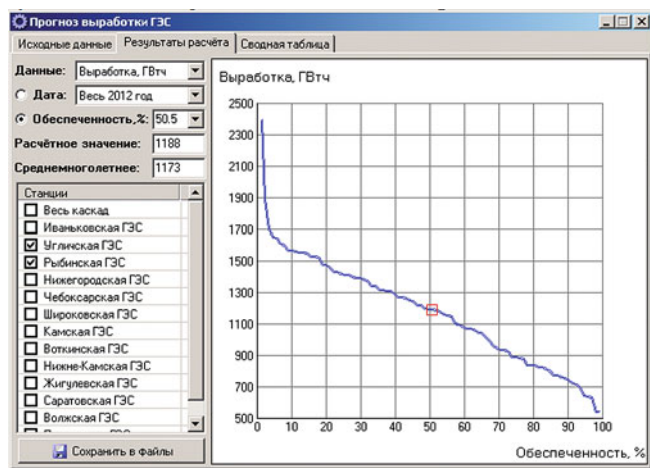


Рис. 6

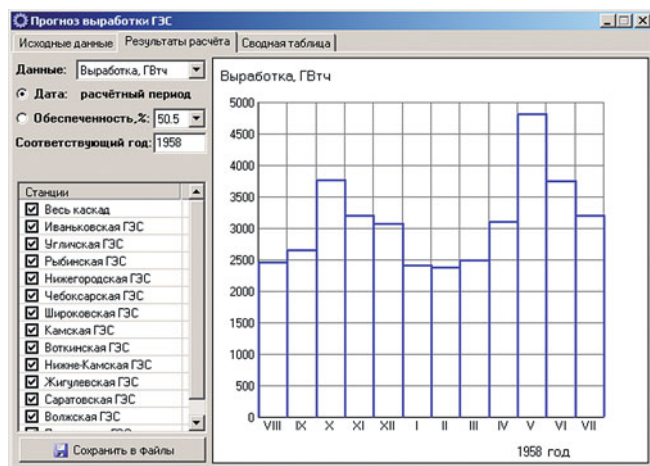


Рис. 7

тель может изменить учитываемый диапазон дат из данного периода наблюдений (рис. 2).

Программа автоматически рассчитывает выработку электроэнергии ГЭС, поэтому в опции “Дополнительно рассчитать параметры” пользователь может задать дополнительный вывод любых шести параметров, имеющихся в списке.

Результаты по расчету основных и дополнительных параметров могут быть сохранены в файлы с соответствующими именами в формате “Microsoft Excel” (\*.xls). Для сохранения подробных результатов расчёта по всем параметрам и створам каскада нужно активировать опцию “Сохранить промежуточные результаты расчета”.

После проведения расчета программа автоматически строит график эмпирической кривой обеспеченности по выработке электроэнергии всего каскада (рис. 5). Кроме того, эмпирическая кривая обеспеченности может быть построена для выбранного месяца, квартала или всего года в целом по выработке электроэнергии и по любому из дополнительно рассчитанных параметров (рис. 5). Эмпирическая кривая обеспеченности может быть построена не только для всего каскада в целом, но и для отдельно указанных ГЭС (рис. 6).

Для определения расчётного значения выбранного параметра пользователь может указать значение обеспеченности в процентах, после чего программа отобразит местоположение на графике и соответствующее расчетное значение выбранного параметра. Возможно и обратное действие: пользователь может ввести значение выбранного параметра, а программа определит значение обеспеченности. Кроме того, программа рассчитывает среднемноголетнее значение выбранного параметра.

В программе существует возможность построения графика изменения выбранного параметра от времени (рис. 7).

Расчитанные результаты могут быть сохранены в трех форматах: файле Microsoft Excel (\*.xls), текстовом файле с табуляторами (\*.txt), таблице XML (\*.xml).

Программный комплекс “Каскад” для проведения водохозяйственных и водноэнергетических расчетов каскадов ГЭС зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности патентам и товарным знакам. Правообладателем данного комплекса является ФГБОУ ВПО “НИУ “МЭИ”.

#### Список литературы

1. Александровский А. Ю., Силаев Б. И., Пугачев Р. В., Якушов А. Н. Программный комплекс для проведения водохозяйственных и водноэнергетических расчетов каскадов ГЭС “Каскад”. Свидетельство о государственной регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам программы для ЭВМ № 2011613087 от 19 апреля 2011 г.
2. Асарин А. Е., Бестужева К. Н. Водноэнергетические расчеты. — М.: Энергоатомиздат, 1986. 224 с.
3. Гидроэнергетика: Учебник для вузов / А. Ю. Александровский, М. И. Кнеллер, Д. Н. Коробова и др. — М.: Энергоатомиздат, 1988. 512 с.
4. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. — Л.: Гидрометеиздат, 1952. 392 с.

# О выборе типа сопряжения бьефов за высокой плотинной

Кузьмин С. А., доктор техн. наук,

Дерюгин Г. К., инженер (ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»)

Показаны проблемы, возникавшие при эксплуатации отечественных гидроузлов, на которых принята схема сопряжения бьефов отбросом потока от плотины. Рассмотрены случаи, когда применение отброса является оправданным, и условия, при которых предпочтительным является рассеяние энергии сбросного потока на креплении непосредственно за плотинной.

**Ключевые слова:** сопряжение бьефов, водосбросы, высокие плотины, рассеяние энергии, гидравлический прыжок, отброс струи, размыв русла, крепление, брызгообразование, обрушение склонов.

Одной из важнейших задач проектирования высоких плотин является выбор типа сопряжения бьефов за этими плотинами: с отбросом потока в неукрепленное или укрепленное русло или с обеспечением рассеяния большей части энергии потока на креплении непосредственно за сооружением в затопленном гидравлическом прыжке.

В нормативной литературе имеются рекомендации по гидравлическому расчёту ряда конструкций, с помощью которых обеспечивается сопряжение бьефов. Несмотря на большое количество таких эксплуатируемых объектов, обобщение опыта их работы и сопоставление с расчётными предположениями практически отсутствуют. Тип сопряжения для каждого гидроузла выбирается на основе требований СНиП и личного опыта специалистов, принимающих участие в проектировании, и лишь для уникальных объектов, например для Саяно-Шушенской ГЭС, — на основе проведения лабораторных исследований. Для Зейской и Бурейской ГЭС с плотинами высотой соответственно 110 и 130 м отброс струи в нижний бьеф принят до проведения лабораторного обоснования. Следует отметить, что даже с учётом такого обоснования далеко не всё удаётся предвидеть. Последующий опыт эксплуатации гидроузла показывает, что многих трудностей и дополнительных затрат можно было бы избежать в случае принятия при проектировании и строительстве более обоснованного технического решения. Иногда, например в связи с длительным маловодным периодом, когда водосбросные сооружения не работают или расходы через них малы, негативный опыт эксплуатации отсутствует и принятые решения по рассматриваемой проблеме представляются достаточно надёжными. С другой стороны, из-за неудовлетворительного выполнения элементов сооружений при строительстве и ошибок временной эксплуатации могут произойти аварии (например, повреждение крепления дна водобойного колодца Саяно-Шушенской ГЭС в 1981 г. и разрушение в 1985 г. [1]). Поверхностный анализ этих событий может привести к отказу от применения на перспективных гидроузлах гашения

энергии в гидравлическом прыжке непосредственно за плотинной.

Практика показала, что выбор типа сопряжения бьефов является непростым вопросом и необходимы публикации, позволяющие принять более обоснованное решение. Данная статья по этой проблеме, по нашему мнению, может быть полезной.

Обычно в первую очередь рассматривают возможность отброса потока от сооружения. Если негативные последствия при отбросе струи преобладают, то на основе технико-экономического расчёта, с учётом ожидаемой надёжности сооружения, удобств эксплуатации и условий пропуска расходов в строительный и эксплуатационный период, применяют крепление, обеспечивая гашение энергии в гидравлическом прыжке за плотинной, удовлетворительную работу крепления в течение длительного периода эксплуатации, значительно меньшие скорости течения, волнообразование и местные деформации русла в нижнем бьефе.

Очевидно, что отброс струи за плотинной целесообразно применять когда:

ожидаемые размывы русла не угрожают устойчивости плотины и сооружениям нижнего бьефа;

воздействие отброшенной струи и возбуждаемых в нижнем бьефе волнений и течений не потребует выполнения дополнительного объёма защитных сооружений;

исключены подмыв склонов, их сползание в русло и его завал с опасным повышением уровня нижнего бьефа у ГЭС;

ожидаемое образование русловых отложений за ямой размыва не приведёт к подпору и необходимости выполнения масштабных расчисток русла для предотвращения потерь выработки энергии и затруднений при судоходстве;

обводнение склонов облаками брызг не приведёт к сползанию с них больших объёмов грунта, завалу дорог, производственных площадок и русла.

Отброс струи от сооружения может быть принят, если возможные негативные последствия, в том числе и перечисленные выше, могут быть опеределены без больших погрешностей. В этом прогнозе последствий и заключается основная слож-

ность, так как многие из указанных выше явлений изучены недостаточно, а иногда при проектировании ими пренебрегают, не ожидая существенных осложнений.

Основываясь на имеющемся опыте строительства и эксплуатации ряда отечественных гидроузлов, приведём информацию по указанным выше явлениям.

1. Практика показала, что могут быть допущены значительные ошибки в оценке местных размывов скального русла за плотиной, даже при проведении лабораторного обоснования проекта, если информация о прочности и трещиноватости грунта будет неточной. Так, например, на основании геологических данных подбирали крупность грунтов для гидравлических лабораторных исследований Бухтарминской и Саяно-Шушенской ГЭС, но в натуральных условиях деформация русла оказалась значительно меньше, чем ожидалась по лабораторным данным. В связи с этим произошли неоднократные повреждения крепления правого берега на Бухтарминской ГЭС [2]. На модели основная часть энергии сбросного потока рассеивалась в яме размыва, тогда как в натуральных условиях яма размыва оказалась значительно меньшей по объёму, гашение энергии было слабым и высокоскоростной поток воздействовал на крепление правого берега. Оказался неустойчивым не только камень, но и тетраэдры массой по 4 т; пришлось выполнить монолитное крепление.

Решение о применении водобойного колодца на Саяно-Шушенской ГЭС было принято исходя, в том числе, из прогнозируемых размывов русла глубиной до 50 – 70 м за плотиной, но на этом объекте при удельных расходах  $160 \text{ м}^2/\text{с}$  и средних скоростях 55 м/с стабилизировавшийся размыв парасланцев непосредственно за плотиной, за достаточно длительное время после разрушения плит крепления колодца, произошёл на глубину лишь около 8 м [2].

Чтобы исключить подобные несоответствия, необходимо выполнение тщательного геологического обследования зоны возможного воздействия отброшенной струи. Желательна сопоставительная характеристика скального грунта по прочности и трещиноватости с аналогами, для которых имеются характеристики размывов, полученные в натуральных условиях. Так, например, близкими по сопротивляемости размыву оказались скальные породы русла на Красноярской, Зейской и Бурейской ГЭС, что позволило на этих гидроузлах надёжно прогнозировать развитие размыва, в том числе при пропуске расчётных расходов малой вероятности превышения. Сопоставление модель — натура для условий пропуска паводков с расходом через водосброс  $4000 \text{ м}^3/\text{с}$  в 2007 г. на Зейской ГЭС и  $4500 \text{ м}^3/\text{с}$  в

2009 г. на Бурейской показало удовлетворительное соответствие натуральных и лабораторных данных, причём не только по глубине, но и по очертанию зоны размыва [3].

По возможности характеристики грунта должны быть даны без введения излишних “запасов”. Как показано выше, завышенная оценка трещиноватости может привести к неудачным техническим решениям и тяжёлым последствиям (Бухтарминская ГЭС), так же как и заниженная оценка — к опасному подмыву сооружений. При необходимости уточнения характеристик грунтов могут быть выполнены после вскрытия котлована, а также на основании сопоставления модель — натура в период пропуска строительных расходов.

Размывы за плотиной, как правило, вызывают образование гряды отложений (бара), которая может стеснять русло, приводя к увеличению скоростей в протоках у берегов и повышению уровней у ГЭС. В условиях Бурейского гидроузла, при расходах около 10 – 11 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$ , объём ямы размыва по лабораторным данным должен был составить 500 – 600 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$ . При таком объёме отложений подпор мог достигать 5 – 6 м и угрожать затоплением здания ГЭС, но промеры, выполненные после пропуска паводка в 2009 г., показали, что только половина объёма продуктов размыва остаётся в баре [3], относительно мелкие отдельности переносятся потоком на значительное расстояние от плотины, а это резко снижает подпор. Для моделирования таких деформаций необходима подробная информация о гранулометрическом составе отдельностей, из которых могут состоять продукты размыва. При её отсутствии ориентировочные выводы должны быть сделаны на основе материалов, полученных на объектах-аналогах.

Применение отброса струи от сооружения является достаточно надёжным если прочные породы основания способны успешно выдерживать воздействие высокоскоростного потока (диабазы на Усть-Илимском и Братском гидроузлах, граниты на Днепрогэсе) или если на дно действует относительно слабый поток с малыми удельными расходами, равномерно распределённый по ширине плотины.

2. Отброшенная струя воздействует на русло нижнего бьефа и сооружения в нём, изменяет уровень режим, образует высокоскоростные, часто неустойчивые течения, большие по высоте волны на свободной поверхности, распространявшиеся на значительное расстояние от места падения струи [4]. Масштаб указанных явлений увеличивается с ростом сбросных расходов и перепада бьефов, зависит от глубины русла (которая может увеличиваться с развитием размыва) и его ширины.

В месте падения струи наблюдается характерное существенное понижение уровня нижнего бье-



Размыв левого берега в зоне падения отброшенной струи за водосбросной плотиной Бурейской ГЭС

фа, относительно осреднённого для соответствующего расхода, за ним — повышение уровня в связи с образованием гидравлического прыжка или прыжка-волны, перемещение которых и инициирует волнообразование.

Кроме сбросного потока, постепенно расширяющегося и тормозящегося при взаимодействии с массой воды в нижнем бьефе, возникает система течений, на которую влияет геометрия русла и сооружений, обтекаемых потоком.

Воздействие компактной части струи определяют известными методами и принимают слабо изменяющимся во времени (кроме нестабильной зоны вблизи её поверхностей). В случае распада струи на отдельности, размеры которых уменьшаются с удалением от её оси, они оказывают кратковременное воздействие продолжительностью 0,2 – 0,3 с, и чем дальше от траектории основной струи, тем более редкое. Однако этих воздействий достаточно, например, для размыва скального склона берега. Так, за плотиной Бурейской ГЭС размыв берег и повреждена автодорога (рисунок). Измеренные датчиками в лабораторных условиях размахи воздействий отдельностей струи на проектируемые защитные сооружения Зейской и Бурейской ГЭС в зоне уровня воды в русле достигали 450 – 600 кПа на площадку размером около 1 м, а размахи совместных воздействий волн и течений вблизи места падения струи на глубине около 20 м составляли до 200 – 250 кПа и распространялись на значительные по площади поверхности. Размеры этих поверхно-

стей характеризуют корреляционные зависимости, ориентировочно на расстоянии 15 м коэффициенты корреляции снижались до 0,3.

С удалением от места падения струи высота волн существенно снижается. Для условий Бурейского гидроузла, при расходе 10 000 м<sup>3</sup>/с и малых деформациях русла, по данным модели высота волн снижается с 6,5 до 4 м на расстоянии около 700 м. При проектировании крепления откоса правого берега на этом объекте расчётная высота волн была принята равной 4 м с учётом того, что ко времени пропуска большого расхода некоторый размыв уже произойдёт.

Для условий Саяно-Шушенской ГЭС рассматривался не принятый вариант сопряжения бьефов с отбросом струи. По модельным данным, в относительно узком (250 м) и неглубоком русле при больших расходах наблюдались неустойчивые течения с попеременным натеканием на берега и местным повышением уровня до 15 м. Учитывая это, пришлось бы повышать незатопляемые отметки, обеспечивать тяжёлое крепление берегов на более значительном по протяжённости участке русла, чем в современных условиях. Отмеченные обстоятельства привели к решению об устройстве водобойного колодца на этом гидроузле. Такое же решение принято при проектировании дополнительного туннельного водосброса этого гидроузла (причём сторонников применения отброса струи для условий данного объекта стало значительно меньше, чем в период проектирования приплотинного водосбро-

са, несмотря на уже имеющиеся данные об исключительно прочных породах основания).

3. Серьёзной проблемой может оказаться повышенное брызгообразование при отбросе струи, если на крутом склоне долины имеются немалые объёмы осыпей. Брызги поднимаются на большую высоту над траекторией струи, переносятся ветром на значительное расстояние; их основной объём может смещаться на 200 м и более ниже места падения струи. Насыщение грунта водой приводит к образованию ручьёв и снижению устойчивости берегов. Общая картина склона левого берега после работы эксплуатационного водосброса Бурейской ГЭС видна на рисунке.

При испытании эксплуатационного водосброса Чиркейской ГЭС пропуск в 1975 г. расхода  $800 \text{ м}^3/\text{с}$  в течение 1 ч привёл к обводнению несвязных грунтов в долине небольшого ручья за туннелем, сползанию в узкое русло  $100 \text{ тыс. м}^3$  грунта. Образовавшийся завал вызвал повышение уровня почти до крыши здания ГЭС, и почти сразу завал был частично промыт, но до сих пор подпор при работе ГЭС сохраняется близким к 4 м.

Опасение обрушения большого объёма грунта вынуждает по возможности ограничивать расход через водосброс Курпсайской ГЭС.

С учётом отмеченного выше оценим целесообразность применения принятых схем сопряжения бьефов на ряде отечественных гидроузлов.

Отсутствуют какие-либо противопоказания по применению отброса струи на Братском, Усть-Илимском, Усть-Каменогорском и Мамаканском гидроузлах. На Красноярском и Бухтарминском гидроузлах неоднократно происходили повреждения крепления ближайших к водосбросу берегов, но эти примеры свидетельствуют лишь о погрешностях проектирования и исследовательского обоснования [1], и, с учётом масштаба этих повреждений, нет основания считать, что для данных сооружений применение гашения энергии на креплении было бы предпочтительней. При широком русле нижнего бьефа (на Красноярской ГЭС примерно 550 м) и прочных скальных грунтах основания (на Бухтарминской ГЭС) применение отброса струи является вполне оправданным.

Во время проектирования Бурейского гидроузла отброс потока от плотины был принят без учёта больших размывов узкого отводящего канала водосброса, сползания осыпей и возможного волнового воздействия на правый берег, по которому проходит единственная дорога к ГЭС. Параметры волн у этого берега тогда было невозможно оценить из-за отсутствия соответствующих опубликованных расчётных рекомендаций, в настоящее время они имеются [2]. Для условий Бурейского гидроузла лишь на завершающей стадии строительства на основе

лабораторных исследований было выполнено соответствующее обоснование и принято крепление плитами толщиной 1 м на подушке из камня толщиной 3,5 м. При перепаде высот в пределах откоса 18 м для выполнения этого крепления потребовалось бетона примерно столько же, сколько было бы достаточно для строительства за плотиной водобойного колодца и гашения энергии в затопленном гидравлическом прыжке. При наличии последнего были бы исключены обводнение левого берега, масштабные осыпи с него, размыв дороги, подмыв раздельного устоя в случае пропуска расходов более 8 – 9 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$ , прогнозируемый на основе данных лабораторных исследований. Предложения об устройстве водобойного колодца для условий этого гидроузла были высказаны рядом специалистов как на ранних стадиях проектирования, так и в настоящее время, когда потребовалась разработка защиты облицовки левого берега и концевых секций раздельного устоя. При наличии колодца резко уменьшились бы местные размывы отводящего канала и объём отложений в русле, которые периодически приходится разбирать (на Бурейском гидроузле к настоящему времени из русла удалено около 150 тыс.  $\text{м}^3$  продуктов размыва); отпала бы необходимость выполнения мощного крепления берегов и раздельного устоя.

Для условий Зейской ГЭС использование отброса струи оказалось правильным решением. Следовало только ограничиться установкой массивных секций раздельной стены и правобережной подпорной стены до предполагаемой зоны интенсивного размыва русла и не размещать водовод из верхнего бьефа в г. Зее непосредственно за правобережной ограждающей стеной, за гребень которой падает периферийная часть отброшенной струи при работе крайних пролётов и за которой образуется вдольбереговой поток.

В случае расположения ответственных сооружений в нижнем бьефе, в непосредственной близости к области возможных больших местных размывов русла, следует рассмотреть целесообразность гашения энергии на креплении. Для Чиркейской ГЭС предложен и осуществлён строительством трамплин с боковым сливом, позволяющий растянуть отброшенную струю по длине узкого криволинейного в плане русла, но относительно слабые грунты русла (сланцы) при больших расходах могут быть размывы в большей мере, чем это прогнозировалось на основе лабораторных данных. Высокие крутые берега в этом случае будут подмыты и возможны их обрушения. В естественных условиях р. Сулак неоднократно отмечались обрушения склонов и большие объёмы завалов русла при прохождении паводковых расходов. В створе гидроузла перепад уровней составляет более 180 м, что

резко увеличивает возможное воздействие на русло и склоны. То, что эти процессы не развиваются, связано с продолжающимся длительным маловодным периодом в данном регионе и наличием водохранилища. После возведения гидроузла большие сбросные расходы через него не пропускались.

По нашему мнению, для условий Чиркейской ГЭС следовало обеспечить гашение избыточной энергии на креплении, что повысило бы надёжность длительной работы ГЭС. Такой вариант конструкции водосброса рассматривался в проекте, но не был принят для реализации.

С учётом условий конкретного гидроузла некоторые негативные явления, связанные с применением сопряжения бьефов отбросом струи, могут быть исключены или ослаблены маневрированием затворами водосбросной плотины и применением специальной конструкции её концевого устройства, но рассмотрение этих вопросов остаётся за пределами данной статьи.

## Выводы

1. Применение отброса струи от водосбросной плотины можно считать оправданным, если исключаются образование недопустимых размывов отводящего русла, завал русла продуктами размыва и склоновых обрушений с угрозой опасного повышения уровня в нижнем бьефе и необходимостью вы-

полнения большого объёма работ по расчистке русла для обеспечения нормальных условий работы ГЭС, строительство дорогостоящих защитных сооружений в нижнем бьефе.

2. Применяя маневрирование затворами и используя специальную конструкцию концевого устройства водосбросной плотины, некоторые негативные явления, связанные с отбросом струи, можно ослабить или исключить.

3. Существенное снижение в нижнем бьефе скоростей течения, волно- и брызгообразования, а также местных деформаций русла обеспечивается путем рассеивания энергии сбросного потока в гидравлическом прыжке на креплении.

## Список литературы

1. Ефименко А. И., Рубинштейн Г. Л. Водосбросные сооружения Саяно-Шушенской ГЭС. — СПб., 2008.
2. Дерюгин Г. К., Кривоногова Н. Ф. Сопротивляемость размыву скальных грунтов за рядом водосбросных сооружений // Известия ВНИИГ. 2010. Т. 259. С. 11 – 21.
3. Васильев А. В., Кокурин С. А., Дерюгин Г. К. Испытания эксплуатационного водосброса Бурейской ГЭС при пропуске паводка 2009 г. // Гидротехническое строительство. 2012. № 3.
4. Петров О. А. Лабораторные исследования параметров волн, возникающих в нижнем бьефе при отбросе протока от водосбросных сооружений // Известия ВНИИГ. 2009. Т. 254. С. 28 – 34.



# Сопоставление работы внутреннего и наружного водоводов по данным натурных наблюдений

Дурчева В. Н., канд. техн. наук,  
Беллендир Л. Э., инженер (ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»)

Рассмотрено состояние элементов наружного и внутреннего водоводов по данным натурных наблюдений в периоды строительства и эксплуатации на примере водоводов Усть-Илимской и Бурейской ГЭС. Напряженное состояние внутреннего водовода более благоприятно по сравнению с напряженным состоянием наружного водовода: в наружном водоводе возникают трещины, превышающие нормативные значения допустимого раскрытия в железобетонных конструкциях.

**Ключевые слова:** натурные наблюдения, внутренний водовод, наружный водовод, металлическая оболочка, железобетонная оболочка, напряженное состояние, строительный период, эксплуатационный период

При русловой компоновке гидроузла в станционных секциях водоводы проектируют наружными или внутренними. В плотинах, например, Ангарского каскада, Усть-Каменогорской ГЭС водоводы расположены в теле плотины (внутренний водовод), в то время как на Саяно-Шушенской, Красноярской, Зейской, Чиркейской, Бурейской ГЭС водоводы монтировались снаружи низовой грани (наружный водовод). Конструкция наружного и внутреннего водоводов одинакова — металлическая оболочка и два-три арматурных кольца железобетонной оболочки. В обоих случаях предполагается полное сцепление бетона с металлом. Во внутренних водоводах это достигается цементацией, а в наружных (в отсутствие цементации) возможно только пунктирное сцепление вследствие передачи внутреннего гидравлического давления от металла на бетон. Разница заключается в состоянии контакта между железобетонной и металлической оболочками. Во внутреннем водоводе зацементированный шов между металлом и бетоном железобетонной оболочки обеспечивает совместность работы оболочек. В наружном водоводе к металлической оболочке в ходе монтажа привариваются уголки и жесткие пространственные поддерживающие фермы (к последним крепятся арматурные пояса) [1], переносящие усилия на железобетонную оболочку, тем самым разгружая металлическую оболочку. Наличие совершенного контакта между металлом и бетоном предполагается только в расчетах. Фактически может существовать лишь пунктирный контакт.

Многолетние натурные наблюдения за состоянием элементов водоводов в строительный и эксплуатационный периоды [1] позволяют оценить работу наружных и внутренних водоводов.

**Усть-Илимский внутренний водовод.** Внутренний диаметр двадцати водоводов Усть-Илимской ГЭС составляет 7,8 м, толщина металлической оболочки меняется от 18 до 32 мм. Металлическая оболочка сварена из листовой стали 09Г2 с пределом текучести 300 МПа. Бетон вокруг метал-

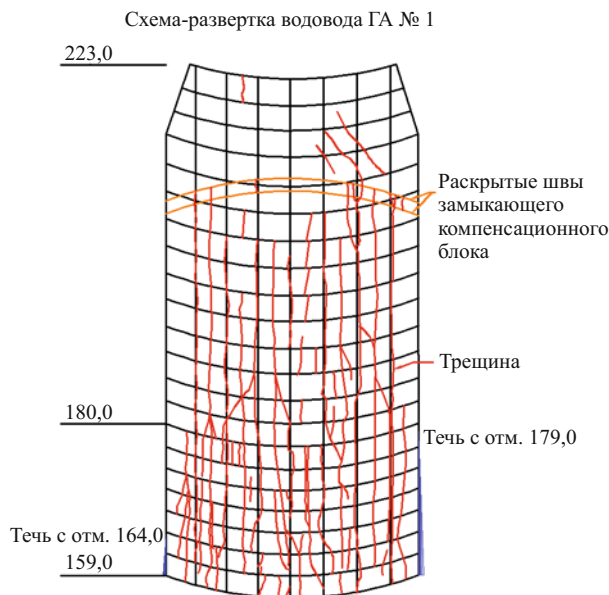
лической оболочки армировался кольцевыми армокаркасами из арматуры марки 18Г2С диаметром от 32 до 50 мм. При проектировании водовода учитывались некоторые результаты работы водовода Братской ГЭС. В частности, ребра жесткости сохранились только в переходной зоне — от наклонного до горизонтального участка. Учитывалась также работа арматуры железобетонной оболочки. Для ограничения раскрытия швов на низовой грани установлены две сетки на расстоянии 0,5 и 1 м от поверхности низовой грани. Водовод работает практически при постоянном напоре, колебание верхнего бьефа находится в пределах 0,5 м.

Четыре водовода работали по временной схеме. К началу эксплуатации была полностью возведена нижняя часть станционных секций. Остальные водоводы к началу заполнения водохранилища продолжали монтироваться параллельно с ростом секций.

**Бурейский наружный водовод.** Шесть водоводов Бурейской ГЭС состоят из металлической и железобетонной оболочек. Расположены на низовой части плотины длиной около 100 м. Средняя часть водовода на протяжении 46 м отделена от низовой грани скользящим швом, выполненным из рубероида на битумной прокладке. Толщина железобетонной оболочки составляет 150 см. Железобетонная оболочка армирована двумя армокаркасами — внутренним и внешним, выполненными из продольной и кольцевой арматуры диаметрами от 22 до 36 мм соответственно.

Бетон оболочки соответствует классу В15Ф200. Кольцевая арматура диаметром 36 мм, продольная — 22 и 25 мм (А-III), изготовленная из стали марки 25Г2С ( $\sigma_T \approx 400$  МПа). Оболочка из стали марки 09Г2С толщиной до 3 см ( $\sigma_T \approx 345$  МПа). Три водовода монтировались по временной схеме работы, три — по постоянной. Сезонное изменение напора составляет 20 м.

Напряжения в элементах водовода складываются из технологических и эксплуатационных. На не-



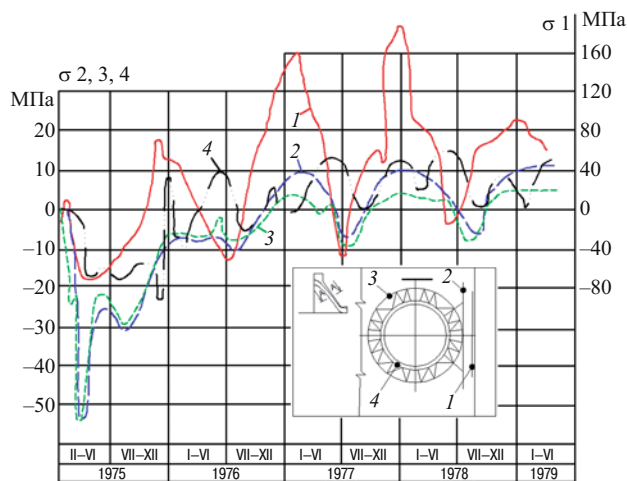
**Рис. 1.** Схем расположения трещин на водоводе Бурейской ГЭС, гидроагрегат № 1

которых водоводах напряжения, возникшие в строительный период, превышают напряжения, обусловленные давлением воды и сезонным изменением температуры в период постоянной эксплуатации. На формирование напряженного состояния водовода во время строительства влияют температурный режим бетонирования (экзотермический разогрев и скорость остывания); температурный градиент до момента заполнения водовода водой; НДС низовой грани, частью которой являются водоводы. Температурный режим внутреннего водовода является более щадящим, так как температура наружного воздуха влияет только со стороны низовой грани. Наружный водовод испытывает воздействие температуры наружного воздуха с трех сторон, что понижает трещиностойкость поверхностных слоев бетона. На рис. 1 приведена схема расположения трещин на водоводе Бурейской ГЭС, выполненная в мае 2011 г. В зимнее время раскрытие и протяженность трещин больше.

Появление трещин наблюдается не только в водоводах ГЭС, возведенных в суровом климате. На водоводах Чиркейской ГЭС также в строительный период возникли трещины, но в меньшем количестве.

На рис. 2 приведены напряжения в водоводе Усть-Илимской ГЭС в арматурном поясе в период наполнения водохранилища и на начальном этапе его работы [2]. Трещинообразование ограничено поверхностным слоем бетона глубиной менее 1 м. Уже на глубине 1 м арматурная сетка растянута только на 20 МПа.

**Сопоставление состояния водоводов в эксплуатационный период.** На рис. 3 приведен график сезонных изменений напряжений в металлической оболочке и арматуре водовода в станционной



**Рис. 2.** Напряжение в арматуре турбинного водовода секции № 39 Усть-Илимской ГЭС: 1 — максимальные напряжения во внешней армосетке; 2 — то же во внутренней армосетке; 3 — то же в арматуре внешнего армокольца; 4 — то же в арматуре внутреннего армокольца

секции 32 Усть-Илимской плотины. Из графика следует, что:

изменения напряжений носят сезонный характер, определяемый изменением температуры наружного воздуха. Эти колебания температуры не доходят до внутренней части водовода, в которой напряжения постоянны, так как плотина работает при постоянном УВБ;

водовод работает как единая целая конструкция, об этом свидетельствует синхронность изменений напряжений в арматуре и металле. Уровень напряжений небольшой, причем более напряженной является арматура, а не металлическая оболочка.

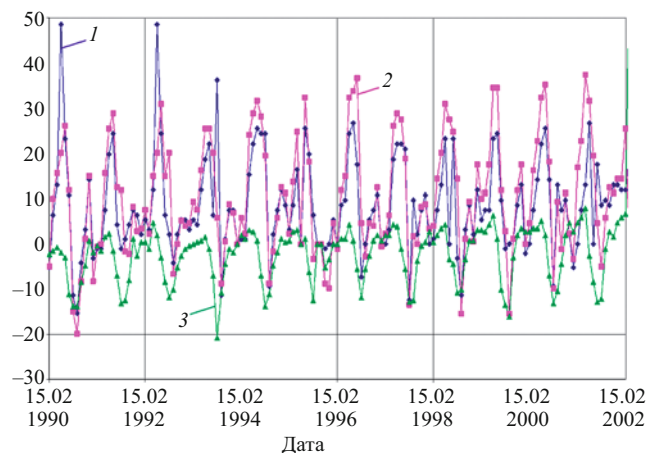
На рис. 4 приведен график кольцевых напряжений в водоводе Бурейской ГЭС. Из графика следует, что:

металлическая оболочка напряжена слабо; уровень напряжений растяжения в арматуре свидетельствует о раскрытии трещин в бетоне порядка 1 – 3 мм.

В табл. 1 и 2 сопоставлены максимальные измеренные напряжения в одинаково расположенных точках контролируемых эксплуатируемых водоводов.

Большое количество измерительных точек в четырех сечениях водовода Бурейской ГЭС позволило определить влияние технологии возведения, подъема УВБ и эксплуатационные воздействия на работу наружного водовода.

В строительный период из-за высоких температурных градиентов в бетоне появлялись трещины с раскрытием свыше 1 мм, что не было учтено проектом. При пуске агрегатов трещины строительного периода увеличили раскрытие и появились новые. Металлическая оболочка достаточно напряжена только в отдельных точках отдельных сечений.



**Рис. 3.** Приращения напряжений в турбинном водоводе 32 секции Усть-Илимской ГЭС (на низовой грани): 1 — металлическая оболочка; 2 — внутренняя арматура; 3 — наружная арматура

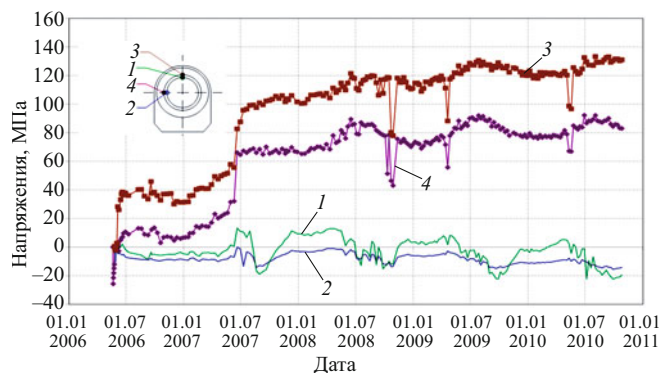
Кольцевая арматура внешнего пояса реагирует на сезонные изменения температуры, внутренняя арматура воспринимает гидростатическое давление.

Расчет сталежелезобетонной конструкции водоводов проводится из условия совместной работы всех элементов. По мере получения результатов натурных наблюдений о напряженном состоянии водоводов, не совпадающих с расчетами, начали усложнять расчетные схемы, включая в них влияние температуры, взаимосвязи с низовой гранью плотины, возможное трещинообразование в бетоне железобетонной оболочки. По расчетным данным удалось смоделировать асимметричное распределение напряжений по сечению водовода, но всегда напряжения в металлической оболочке были существенно выше, чем в арматуре железобетонной оболочки. Фактическая схема работы наружных водоводов принципиально отличается от принятых расчетных схем отсутствием контакта между бетоном и металлической оболочкой, наличием уголков, играющих роль ребер жесткости и обуславливающих

Т а б л и ц а 1

Радиус водовода	Оболочка	Арматура	
		внутренняя	наружная
Сечение III-III агрегат № 3			
Верх	75 – 80/59,7	97/110	40/57
Правый	-/14	50/66,8	100/137,8
Нижний	-/39,9	100/61,7	50/41,8
Левый	-/47,9	10/99,3	12/177,8

**Примечание.** В числителе даны значения кольцевых напряжений в турбинном водоводе секции 32 Усть-Илимской ГЭС, в знаменателе — кольцевые напряжения в турбинном водоводе агрегата № 3 Бурейской ГЭС, МПа.



**Рис. 4.** Кольцевые напряжения в турбинном водоводе гидроагрегата № 5 Бурейской ГЭС, с. III – III: 1 — металлическая оболочка, верх; 2 — металлическая оболочка, слева; 3 — внутренняя арматура, верх; 4 — внутренняя арматура, слева

передачу усилий от металлической оболочки на арматурные кольца. Кроме того, в расчетах не предполагалось наличие протяженных трещин раскрытием более 1 мм.

Температурный режим внутреннего водовода в эксплуатационном режиме обуславливает существенно меньшую сезонную амплитуду кольцевых и продольных напряжений.

Сопоставление работы наружного и внутреннего водоводов показало разный характер технологических и эксплуатационных напряжений.

Трещиностойкость бетона железобетонной оболочки внутреннего водовода, зависящая от температурных градиентов, выше, поскольку внутренний водовод является частью низовой грани плотины. В наружном водоводе уже в строительный период появляются трещины раскрытием свыше 1 мм, что приводит к напряжениям растяжения в арматуре порядка 100 – 150 МПа.

Контакт между металлической оболочкой и бетоном во внутреннем водоводе, обеспеченный цементацией шва, обуславливает совместную работу всех элементов сталежелезобетонной конструкции.

Т а б л и ц а 2

Радиус водовода	Оболочка	Арматура	
		внутренняя	наружная
Сечение III-III агрегат № 5			
Верх	5/- 2,1	32/70,7	20/177,1
Правый	0/- 37,1	28/83	18/82,9
Нижний	75/-	40/123,9	15/85,2
Левый	-/ 9,9	22/131	30/92,3

**Примечание.** В числителе даны значения кольцевых напряжений в турбинном водоводе секции 39 Усть-Илимской ГЭС, в знаменателе — кольцевые напряжения в турбинном водоводе агрегата № 5 Бурейской ГЭС, МПа.

В наружном водоводе передача усилий на арматурные кольца происходит с помощью конструктивных уголков, приваренных к оболочке.

Температурные напряжения в эксплуатационный период в наружном водоводе намного превышают напряжения во внутреннем водоводе, что провоцирует появление новых трещин.

Монтаж наружного водовода требует дополнительного объема бетона, металла, опалубки и технически сложнее.

Такое преимущество наружного водовода — раздельное бетонирование станционных секций и последующий монтаж наружного водовода — уже в строительный период обуславливает высокий уровень напряжений растяжения в арматуре и появление температурных трещин в железобетонной оболочке водовода.

Сопоставление работы наружных и внутренних водоводов по результатам натурных наблюдений показывает несомненное преимущество напряженного состояния внутренних водоводов как в строительный, так и в эксплуатационный период.

Недостатком внутренних водоводов следует считать ослабление станционных секций со стороны низовой грани. Известно, что станционные секции Усть-Илимской плотины оказались более чувствительны к действующим нагрузкам по сравнению с водосливными и глухими секциями [1, 3]. Объем бетона на единицу действующего гидростатического давления в этих секциях ниже, чем в остальных. Однако увеличение объема бетона в нижней части гравитационной плотины, равное бетону наружного водовода могло бы полностью компенсировать ослабление станционных секций с внутренними водоводами.

## Выводы

Многолетние натурные наблюдения за изменением напряжений в арматуре и металлической оболочке в наружных и внутренних водоводах выявили преимущества внутренних водоводов, в которых:

более высокая трещиностойкость бетона в период строительства;

меньшие сезонные температурные напряжения в эксплуатационный период;

более эффективное использование металлической оболочки в работе водовода.

В наружном водоводе металлическая оболочка существенно недогружена.

Выбор наружного или внутреннего водовода должен производиться исходя из его состояния в эксплуатационный период.

Особенности работы водоводов, полученные по данным натурных наблюдений, должны учитываться при проектировании новых водоводов. Также должны быть уточнены критерии надежной работы эксплуатируемых водоводов с учетом фактических данных о раскрытии трещин и их влияние на долговечность железобетонной конструкции.

## Список литературы

1. Марчук А. Н. Статическая работа бетонных плотин. — М: Энергоатомиздат. 1983.
2. Дурчева В. Н., Беллендир Л. Э. Особенности работы водоводов гидроагрегатов высоких бетонных плотин // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2008. Т. 252.
3. Эйдельман С. Я., Дурчева В. Н. Бетонная плотина Усть-Илимской ГЭС (натурные наблюдения и исследования). — М.: Энергия, 1981.

# Комплексное обследование технического состояния строительных конструкций сооружений Жигулёвской ГЭС

Бальзанников М. И., доктор техн. наук,  
Зубков В. А., Кондратьева Н. В., кандидаты техн. наук  
(Самарский государственный архитектурно-строительный университет),  
Хуртин В. А., главный инженер (Жигулевская ГЭС)

Приведены результаты комплексного обследования строительных конструкций основных сооружений Жигулевской ГЭС. По результатам обследования определено, что техническое состояние обследованных сооружений ГЭС обеспечивает общую надежность гидроузла.

**Ключевые слова:** сооружения ГЭС, строительные конструкции, комплексное обследование, испытание, техническое состояние, надежность гидроузла.

Волжская гидроэлектростанция имени В. И. Ленина на р. Волге, в настоящее время официально называемая Жигулёвской ГЭС, является уникальным объектом отечественного гидротехнического строительства. В состав гидроузла входят сложные в конструктивном отношении водоподпорные и водопропускные сооружения: бетонная водосливная плотина, грунтовая плотина, агрегатное здание ГЭС, шлюзы и другие сооружения.

Гидроэлектростанция (ГЭС) эксплуатируется уже более 55 лет [1]. С целью обеспечения надежной работы этого ответственного комплексного гидроузла все сооружения ГЭС находятся под пристальным наблюдением специалистов. Предотвращение появления аварийных ситуаций на гидротехнических объектах возможно при реализации эффективной системы управления их состоянием [2] и своевременным проведением ремонтных работ. Конструктивные элементы сооружений, основное энергетическое и механическое оборудование Жигулёвской гидроэлектростанции постоянно обследуются, осуществляется оценка их технического состояния, при необходимости проводятся ремонтные и (или) восстановительные работы.

В настоящее время на Жигулёвской ГЭС осуществляется комплекс мероприятий по модернизации основного энергетического оборудования, которое технически и морально устарело. Замена отслужившего свой срок оборудования на более надежное и современное, несомненно, прогрессивное решение. Однако ввод в эксплуатацию новых гидроагрегатов увеличенной мощности повлечет за собой увеличение нагрузок на конструктивные элементы сооружения и изменение их напряженно-деформированного состояния.

Строительные конструкции за период длительной эксплуатации ГЭС подвергались многочисленным, иногда нерасчетным, механическим и коррозионным воздействиям, которые могли снизить их

несущую способность. Эти факторы вызвали объективную потребность в тщательном анализе фактического технического состояния и условий работы строительных конструкций сооружений Жигулёвской ГЭС.

В соответствии с планом мероприятий по ГЭС и согласно законодательству Российской Федерации [3] на основных сооружениях Жигулёвской гидроэлектростанции с 2005 по 2012 г. проведено комплексное обследование несущих строительных конструкций с целью оценки их технического состояния. Обследование было поручено испытательному центру “Самарстройиспытания” Самарского государственного архитектурно-строительного университета (СГАСУ). Испытательный центр “Самарстройиспытания” аккредитован Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии и имеет большой опыт по обследованию конструкций энергетических объектов. СГАСУ имеет свидетельство о допуске к работам, которые оказывают влияние на безопасность объектов капитального строительства.

В ходе работ были обследованы наиболее ответственные конструктивные элементы сооружений Жигулёвской ГЭС. К ним в первую очередь относятся перекрытие монтажной площадки и машинного зала ГЭС, подкрановые консоли машинного зала, перекрытие щитового отделения верхнего бьефа (ЩОВБ), конструкции и затворы водосливной плотины и ЩОВБ, конструкции кабельных туннелей и технических помещений ГЭС. Поскольку такое комплексное обследование было выполнено своевременно, восстановить надёжность этих конструкций, кроме металлических подкрановых балок в машинном зале, можно было путём их усиления без замены на новые конструкции [4 – 8].

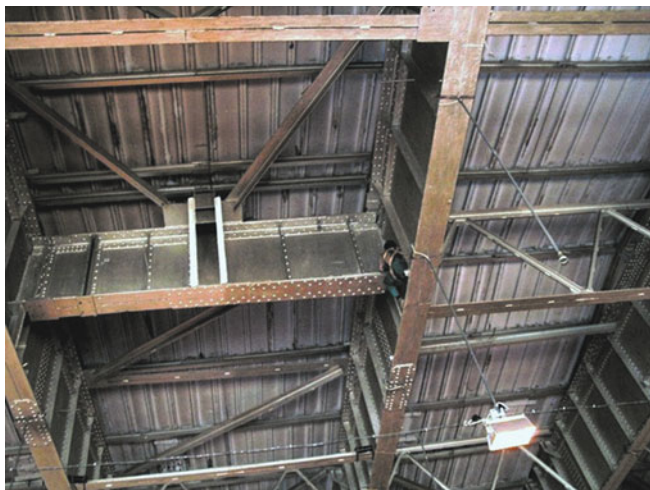


Рис. 1. Общий вид исследованных балок перекрытия

### Обследование перекрытия монтажной площадки и машинного зала

Несущими конструкциями перекрытия монтажной площадки ГЭС являются стальные стропильные балки, которые опираются на стальные колонны, установленные в железобетонных стенах с шагом 6 м. Пролет несущих конструкций составляет 25 м. Балки двутаврового сечения высотой 2400 мм предназначены для восприятия нагрузки от перекрытия и от опор линии электропередачи. По балкам установлены прогоны и мелкогабаритные железобетонные плиты.

В процессе обследования определяли степень коррозионного износа металла, прогиб и наличие относительного смещения конструкций, состояние заклепок. Было обследовано более тысячи заклепок. Коррозионный износ металла определяли визуально с использованием ультразвукового толщиномеров и механического глубиномера. Прогиб конструкций определяли путем измерения положения частей конструкции относительно горизонтального лазерного луча. Наиболее трудоёмким оказалось обследование состояния заклепок, которое определяли методом простукивания молотком по головке заклепки. Если при ударе молотком в четырех направлениях относительно продольной оси заклепки происходит её смещение, такую заклепку выбраковывали. Обследование состояния заклепок и степени коррозионного износа металла в перекрытии монтажной площадки приведено на рис. 1.

Результаты обследования показали, что коррозионный износ металла в конструкциях перекрытия не превышал 5 %, величина прогиба находилась в допустимых пределах, дефектных заклепок не обнаружено. Это позволило оценить состояние металлических конструкций перекрытия как работоспособное.



Рис. 2. Проведение испытаний консолей подвижной нагрузкой

Мелкогабаритные железобетонные плиты покрытия имеют многочисленные сколы бетона в ребрах, разрушение защитного слоя бетона и находятся в ограниченном работоспособном состоянии. Ремонт и усилению данные плиты не подлежат, их необходимо заменить. Аварийные плиты были ранее заменены.

Несущими конструкциями перекрытия машинного зала ГЭС являются односкатные стальные стропильные фермы пролетом 25 м, установленные с шагом 5 м непосредственно на продольные стены здания. Для сложной пространственной металлической конструкции важно не допускать эксплуатацию с деформированными элементами [9]. Элементы ферм перекрытия машинного зала ГЭС выполнены из парных уголков различного сечения. По верхнему поясу ферм уложены железобетонные ребристые плиты.

При обследовании перекрытия и по результатам расчетов было установлено, что напряжения в раскосах ферм превышают расчетные значения на 15 – 20 %. Причиной такого состояния элементов ферм явилось увеличение снеговой нагрузки, на что используемые фермы не были рассчитаны. По результатам обследования испытательным центром “Самарастройиспытания” разработан проект усиления ферм. Проектом было предусмотрено усиление более 200 элементов ферм. Усиление проводилось путем постановки дополнительных стальных уголков. Предложенное усиление было срочно выполнено и несущая способность ферм, с учетом увеличения снеговой нагрузки, была восстановлена.

Пока не решен вопрос о замене мелкогабаритных железобетонных плит покрытия, которые находятся в ограниченно работоспособном состоянии, поскольку в них обнаружены разрушение бетона в ребрах, опорных участках и коррозия арматуры. Такими плитами выполнено покрытие монтажной площадки, пристроя к монтажной площадке, по-



**Рис. 3.** Испытание перекрытия машинного зала статической нагрузкой

крытие в первой и второй секциях. Замена этих плит связана со значительными капитальными вложениями, но в ближайшей перспективе эти плиты планируется заменить. При замене плит необходимо предусмотреть также замену утеплителя и гидроизоляционного ковра с использованием современных материалов.

#### **Обследование подкрановых консолей и подкрановых балок в машинном зале**

Машинный зал ГЭС оборудован двумя мостовыми кранами грузоподъемностью 450/100 т с подкрановыми путями на отметке 62,95 м и двумя мостовыми кранами 30/5 т с подкрановыми путями на отметке 57,50 м. Несущей конструкцией крановых путей крана грузоподъемностью 450 т являются железобетонные консоли, монолитно соединенные с продольными стенами [10, 11].

При обследовании подкрановых консолей проводили замеры геометрических размеров сечений, определение прочности бетона, анализ влияния дефектов и повреждений. В процессе обследования были обнаружены участки с разрушением бетона в угловых зонах консолей и усадочные трещины. Данные дефекты не влияли на несущую способность подкрановых консолей.

Однако для оценки общей надежности работы консолей и подкрановых путей были проведены их испытания подвижной нагрузкой. В качестве подвижной нагрузки использовались два крана весом по 397 т с грузом. В качестве груза использовался ротор гидроагрегата весом 744 т (рис. 2). Это практически самый большой груз, который транспортируется кранами по машинному залу. Поскольку вес груза значительно превышал грузоподъемность одного крана, то подъем и перемещение груза осуществлялись совместно двумя кранами. Общий вес подвижной временной нагрузки составил 1538 т. Мак-



**Рис. 4.** Вид поврежденной железобетонной конструкции, находящейся в воде

симальная нагрузка на 1 пог. м консоли в процессе испытания составила 32 т при расчетной нагрузке 38 т на 1 пог. м. При испытаниях измеряли прогиб консолей и деформацию бетона в растянутой зоне. Измеряемые величины не превышали расчетных значений.

По результатам обследования и испытания было определено, что железобетонные консоли и подкрановые пути кранов грузоподъемностью 450 т находятся в работоспособном состоянии и надежность их работы обеспечена.

Несколько другие результаты были получены при обследовании подкрановых балок и путей кранов грузоподъемностью 30 т. Несущими конструкциями кранового пути данных кранов являются металлические подкрановые балки и фермы, которые опираются на стальные или железобетонные консоли. В подкрановых балках обнаружен конструктивный недостаток, который явился основной причиной многочисленных обрывов крепёжных болтов и снижения надёжности работы балок.

Обследованием установлено, что стальной квадрат, предусмотренный по проекту в конструкции подкранового пути, заменен на рельс. Это привело к увеличению усилия в анкерных болтах от горизонтальных нагрузок.

Для многих балок выявлены отклонения от вертикальной плоскости. Стальные листы, предназначенные для восприятия тормозных усилий, оказались оторванными от верхнего пояса подкрановых балок. В районе осадочных швов, где подкрановые балки опираются на железобетонные консоли, по проекту не предусмотрены конструкции для восприятия горизонтальных нагрузок. Проектом также не предусмотрены опорные элементы, передающие горизонтальные усилия на стену здания, в результате чего в опорных узлах возникал изгибающий мо-



**Рис. 5.** Общий вид затвора № 10. Пример коррозии металла стрингера

мент, действующий перпендикулярно вертикальной плоскости балок, что явилось причиной обрыва анкерных болтов. Во время испытания подкрановых балок подвижной нагрузкой произошел отрыв болта, соединяющего опорную пластину балки с консолью.

По результатам обследования было рекомендовано заменить все подкрановые балки и фермы кранов грузоподъемностью 30 т. Рекомендации были срочно выполнены по проекту, разработанному в испытательном центре «Самарастройиспытания».

#### **Обследование и испытание перекрытия машинного зала на отметке 41,3 м**

Перекрытие машинного зала представляет собой монолитную железобетонную плиту толщиной 750 мм, разделенную осадочными швами на секции. Плита в каждой секции в продольном направлении опирается на продольные стены, а в поперечном направлении — с одной стороны на поперечную стену, с другой — на ригели и колонны. В средней зоне плита опирается на две монолитные железобетонные шахты, в которых располагаются электрогенераторы. В соответствии с проектом временная распределенная нагрузка на плиту составляет  $5000 \text{ кг/м}^2$ .

В процессе выполненного обследования было установлено, что разрушение бетона, оголение и коррозия рабочей арматуры, влияющие на несущую способность конструкций, отсутствуют. Однако в нижней поверхности плиты были обнаружены трещины с шириной раскрытия до 3 мм. В расположении участков появления трещин и в их направлении имелась определенная закономерность. Большая часть трещин появилась в угловых зонах проемов в плите и в зонах сопряжения генераторных



**Рис. 6.** Состояние затвора водосливной плотины в зимний период

шахт с перекрытием. Такие трещины могли появиться в результате:

действия механической нагрузки от собственного веса перекрытия и веса технологического оборудования;

неравномерной осадки секций здания ГЭС.

Для уточнения причин появления трещин были проведены поверочные расчеты и испытания перекрытия статической нагрузкой. Результаты расчёта показали, что осадка секций приводит к резкому росту напряжений на нижней поверхности плиты, которые в сочетании с напряжениями от временных нагрузок превышают предельные значения. При испытании нагрузку на перекрытие создавали весом двух траверс и лопаток турбин (рис. 3). Общая нагрузка составила 100 т на площади  $20 \text{ м}^2$ . В процессе испытания измеряли прогиб перекрытия и деформацию бетона в наиболее нагруженных участках.

Прогиб перекрытия при испытаниях не превышал 0,001 пролета, а увеличение напряжения в бетоне от действия временной нагрузки соответствовало расчетным значениям. Следовательно, основной причиной появления трещин в перекрытии явилась неравномерная осадка секций.

Для предотвращения дальнейшего раскрытия и появления новых трещин в перекрытии был выполнен ремонт с инъецированием трещин полимерным составом и установкой дополнительного армирования. В качестве дополнительной арматуры использовали полосы из углеродного композиционного материала.

#### **Обследование перекрытия щитового отделения верхнего бьефа (ЩОВБ) на отметке 73,90 м**

Несущими конструкциями перекрытия ЩОВБ на отметке 73,90 м являются железобетонные балки таврового сечения типа БД 12. Недостатком этих



балок являются их малая жесткость и трещиностойкость. При обследовании было обнаружено большое количество трещин с шириной раскрытия более 0,5 мм по наклонному и нормальному сечению. Наличие таких трещин снижает надежность конструкций, особенно в сооружениях с повышенной влажностью. Был разработан проект по восстановлению несущей способности балок путем их усиления предварительно напряженными шпренгельными конструкциями и ремонта поверхности бетона специальным гидроизолирующим составом. После выполнения усиления несущая способность балок была восстановлена.

### **Обследование железобетонных конструкций ЩОВБ, находящихся в воде**

Обследование состояния железобетонных конструкций ЩОВБ, которые находились ниже уровня воды верхнего бьефа, представляло определенные трудности. Привлечение водолазов для обследования было невозможно, поскольку конструкции располагались в труднодоступных местах. В связи с этим для обследования таких конструкций в испытательном центре была разработана система, состоящая из телевизионной камеры, блока цифровой обработки изображения, монитора и осветительной аппаратуры. Система позволяла обследовать конструкции, которые находились в воде на глубине до 20 м (рис. 4).

По результатам обследования составлена ведомость дефектов железобетонных конструкций. В ближайшей перспективе эти конструкции планируются ремонтировать.

### **Разработка мероприятий по предотвращению затопления машинного зала ГЭС при подъеме воды в верхнем бьефе до отметки форсированного подпорного уровня**

При обследовании строительных конструкций кабельного туннеля и щитового отделения верхнего бьефа, а также по результатам анализа осадок секций выяснилось, что при достижении воды в верхнем бьефе отметки форсированного подпорного уровня (ФПУ) имеется угроза затопления машинного зала. Вода будет проникать в машинный зал через осадочные швы ЩОВБ, хранилища затворов и проемы в стене по оси 2 – 2.

Предотвратить проникновение воды в машинный зал при достижении ФПУ можно двумя путями:

осуществить герметизацию перекрытий кабельного туннеля и ЩОВБ, поскольку они находятся ниже отметки ФПУ;

допустить затопление кабельного туннеля и ЩОВБ.

Данные предложения были детально рассмотрены на техническом совете Жигулевской ГЭС, при этом учитывались технические и экономические факторы. Основным критерием, который рассматривался при выборе приемлемого варианта, являлась возможность работы машинного зала в случае достижения в водохранилище отметки ФПУ. На совете было принято решение о возможности затопления кабельного туннеля и ЩОВБ при достижении ФПУ, поскольку первое предложение связано с большими экономическими затратами и добиться полной и надежной герметизации перекрытий практически невозможно. Сотрудниками испытательного центра были разработаны мероприятия и техническая документация по реализации принятого второго предложения. Данные мероприятия предусматривают подъем всех электрических кабелей выше отметки ФПУ, устройство подпорной стенки в торцевой части кабельного туннеля, наращивание стенок осадочных швов, хранилища затворов и дверных проемов. В настоящее время данные мероприятия выполнены.

### **Обследование затворов и водосливных граней водосливной плотины**

Было проведено детальное обследование технического состояния и поверочный расчет несущей способности затворов водосливной плотины (ВСП). Всего было обследовано 36 затворов.

Обследованием установлено, что основными дефектами, влияющими на несущую способность затворов, являются язвенная и пластовая коррозия металла, погибы листов обшивки и других конструктивных элементов, прогиб затворов, превышающий допустимое значение, качество уплотнения по периметру затвора. Наиболее опасными дефектами, снижающими надежность работы затворов, является коррозия металла в нижнем ригеле затвора, который воспринимает основную нагрузку. Потеря сечения элементов нижнего ригеля доходит до 100 % (рис. 5).

По результатам обследования был сделан вывод, что затворы № 10, 23, 32 имеют нулевой остаточный ресурс и подлежат срочной замене, поскольку у них имеются элементы с потерей сечения до 100 %. Данные затворы были срочно (в течение двух суток) выведены из эксплуатации. Остальные затворы, кроме 11, 14, 16, 27, 28, имеют остаточный ресурс от 2 до 7 лет и должны быть выведены из эксплуатации согласно разработанному графику до 2017 г. Для замены указанных затворов на новые были выделены специальные средства, благодаря чему данный график в настоящее время выполняется. Затворы № 11, 14, 16, 27, 28 находятся в работоспособном состоянии. Однако данные затворы не

отвечают требованиям п. 5.3.3 СНиП 33-01-2003 [2] по надежности сооружений по назначению и в дальнейшем могут эксплуатироваться только в ремонтных пазах.

При изготовлении новых затворов рекомендовано использовать медесодержащую сталь, которая менее подвержена коррозии.

Длительная эксплуатация водосбросов водосливной плотины в сложных температурных условиях приводит к нарушению герметичности при замыкания затворов (рис. 6). Основными причинами нарушения герметичности являются порывы и ухудшение эластичности резиновых уплотнений, а также деформация опорных пластин в пазах.

Обследованием также установлено разрушение бетона водосливных граней. Глубина разрушения доходит до 500 мм. Периодический ремонт водосливных граней методом торкретирования не дал желаемых результатов. В связи с этим специалистами была разработана техническая документация по ремонту водосливных граней, которая предусматривала замену слоя бетона на глубину 500 мм, при этом используется специальный бетон с полимерными добавками, повышенной прочностью и морозостойкостью. Графиком производства работ предусмотрено выполнение работ по ремонту водосбросов двух секций ежегодно.

#### **Обследование состояния подпорной стенки машинного зала**

В процессе обследования несущих конструкций машинного зала ГЭС установлен прогрессирующий характер выщелачивания бетона подпорной стенки за счет воздействия фильтрующейся со стороны верхнего бьефа воды. Аналогичные негативные проявления влияния воды обнаружены на поверхности бетонных конструкций водосливной плотины и сороудерживающего сооружения. Это приводит к деградации бетона и снижению прочности всего сооружения.

Такое явление, как выщелачивание бетона, известно давно и свойственно практически всем гидроэлектростанциям, однако эффективных мер по его предотвращению практически не принимается. Выщелачивание бетона является очень опасным явлением. Не всегда можно обнаружить и оценить степень деградации бетона, а следовательно, и степень опасности этого явления. Мероприятий по абсолютному исключению выщелачивания бетона в настоящее время неразработано. На некоторых ГЭС делаются попытки исключить выщелачивание путём тампонирувания участков выхода воды из бетонной конструкции со стороны нижнего бьефа. Такой метод является неэффективным, а в некоторых случаях может быть вредным, поскольку миг-

рирующая внутри бетонного массива вода будет выходить в другом месте, иногда непредсказуемом и более опасном.

Данная проблема имеется практически на всех ГЭС, поэтому целесообразно, чтобы инициативу по её решению взяла на себя управляющая компания.

Исследования, проведенные в испытательном центре “Самарастройиспытания”, показали, что наиболее эффективным методом борьбы с выщелачиванием является предотвращение проникновения воды в бетон со стороны верхнего бьефа путём инъектирования и гидроизоляции поверхности бетона специальными полимерными составами с армированием углеродными волокнами. На Жигулёвской ГЭС планируется провести дополнительные исследования и обработать экспериментальный участок с целью совершенствования метода борьбы с выщелачиванием бетона.

Таким образом, комплексное обследование показало, что Жигулевская ГЭС, проработавшая более 55 лет, обладает достаточной надежностью. Отдельные конструктивные элементы, получившие деформации и снизившие свою несущую способность, восстанавливаются в соответствии с разработанными испытательным центром “Самарастройиспытания” рекомендациями. Затраты на проведение систематических плановых комплексных обследований и восстановление несущей способности строительных конструкций ГЭС целесообразно предусматривать в соответствующих планах. Наличие гарантированного финансирования является своего рода гарантией надежности строительных конструкций ГЭС.

#### **Выводы**

1. По результатам выполненного комплексного обследования строительных конструкций Жигулёвской ГЭС можно заключить, что, несмотря на длительный период эксплуатации, техническое состояние обследованных сооружений ГЭС обеспечивает общую надежность гидроузла.

2. Анализ результатов обследований показал, что отдельные конструктивные элементы сооружений вследствие продолжительного воздействия нагрузок и водной среды претерпели деформации и коррозионные разрушения. Эти изменения технического состояния конструкций можно считать несущественными для обеспечения дальнейшей безаварийной работы гидроэлектростанции.

3. Большинство выявленных при обследовании конструктивных недостатков были устранены незамедлительно. Отдельные ремонтно-восстановительные работы, в частности замена затворов, ремонт водосливных граней и реализация мер по пре-

дотращению выщелачивания бетона, запланированы на ближайшее время.

4. Комплексные обследования ответственных гидротехнических объектов, их отдельных сооружений и несущих конструктивных элементов рекомендуется проводить систематически, не реже одного раза в пять лет. Затраты на проведение комплексных обследований и восстановление несущей способности строительных конструкций необходимо предусматривать в соответствующих планах.

#### Список литературы

1. Романов А. А. Жигулевская ГЭС. Эксплуатация гидротехнических сооружений. Самара: Агни, 2010. 360 с.
2. Бальзанников М. И., Иванов Б. Г., Михасек А. А. Система управления состоянием гидротехнических сооружений // Вестник МГСУ. 2012. № 7. С. 119 – 124.
3. Федеральный закон 117-ФЗ “О безопасности гидротехнических сооружений” от 28.07.1997 № 30.
4. СТО 17330282.27.140.016-2008. Здания ГЭС и ГАЭС. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования.
5. РД 22-01.97. Требования к проведению оценки безопасности эксплуатации производственных зданий и сооружений поднадзорных промышленных производств и объектов (обследования строительных конструкций специализированными организациями).
6. РД 153-34.2-21.342-00. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений.
7. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений.
8. СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения.
9. Бальзанников М. И., Холопов И. С., Алтатов В. Ю. Применение решетчатых пространственных металлических конструкций в покрытиях машинных залов ГЭС // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2012. Вып. 28. С. 225 – 232.
10. Зубков В. А., Кондратьева Н. В. Испытание железобетонных подкрановых консолей машинного зала Жигулевской ГЭС // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Самара: СГАСУ, 2005. С. 422 – 424.
11. Зубков В. А. Проблемы эксплуатации строительных конструкций энергетических сооружений // Строй-инфо. Информационный бюллетень. Самара. 2004. № 12. С. 20 – 23.

### **ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!**

*Сведения о переводе на английский язык статей из журнала «Гидротехническое строительство» можно получить в редакции по телефону (495)741-49-81.*

*По вопросам выплаты авторского гонорара за переведенные статьи обращайтесь в отдел валютных расчетов Российского авторского общества (РАО) по адресу:*

*125993, Москва, ГСП-3, ул. Большая Бронная, д. 6а, комн. 225.*

*Телефоны для справок: (495)697-33-35, 697-92-88, 697-06-68.*

*Часы работы: с 9-30 до 15-30, обеденный перерыв с 12-30 до 13-30.*

# Феномены Загорской ГАЭС-2

Несынова Э. Ю., инженер (ОАО “Институт Гидропроект”)

Статья затрагивает вопросы сложного геологического строения района Загорской ГАЭС-2. Рассказывается о фактах геологических аномалий, обнаруженных при проведении инженерных изысканий.

**Ключевые слова:** Загорская ГАЭС, нижний аккумулярующий бассейн, геологическое строение, деформации пород, мезозойская фауна.

С 2007 г. ОАО “РусГидро” ведет проектирование и строительство второй очереди Загорской гидроаккумулирующей станции.

Реконструкция Загорского гидроузла со строительством новых сооружений потребовала увеличения объема нижнего аккумуляющего бассейна для создания дополнительной емкости порядка 7 млн. м<sup>3</sup>. С этой целью были выполнены земляные

работы на левобережном склоне и в пойме р. Куньи вблизи г. Краснозаводска.

Участок Краснозаводской поймы расположен в хвостовой части реконструируемого водохранилища. Он лежит за пределами контура НПУ существующего бассейна и поэтому раньше был плохо изучен. Границы выполненной здесь деловой выемки хорошо выражены на космофотоснимке (рис. 1).

Вместе с тем как по геоморфологическим условиям, так и по геологическому строению этот участок сильно отличается от расположенного вниз по течению отрезка реки, где создано водохранилище первой очереди гидроузла. Здесь ширина долины на протяжении 1,5 – 2,0 км резко увеличивается от 100 – 150 до 400 – 500 м. В ней образуется котловина с дном, полностью занятым поймой. От расположенного ниже отрезка течения р. Куньи она отделена сужением, на котором построена верховая плотина действующей ГАЭС.

Геологический разрез выше и ниже указанной горловины неодинаковый. Вниз по течению под современными пойменными накоплениями развиты пески, мощность которых составляет около 10 м. Характер отложений, содержащих много гравия и гальки, указывает на их образование в условиях относительно высоких скоростей течения. Выше верховой плотины, непосредственно перед “горловиной”, подпойменный разрез включает в себя слои иловатых черных суглинков, супесей и глин общей мощностью 5 – 6 м. При бурении скважины № 2211 была вскрыта толща темно-серых и темно-коричневых глин мощностью около 30 м. Подобные отложения меньшей мощности, залегающие под базаль-



Рис. 1. Деловая выемка нижнего бассейна



а)



б)



в)

Рис. 2. Крутопадающий контакт песков с моренным суглинком (а), линза песка прямоугольной формы в моренном суглинке (б), опрокинутый песчаный блок на контакте с моренным суглинком (в)



**Рис. 3.** Нарушенное залегание моренных отложений



**Рис. 4.** Складчатые дислокации песчаных линз



*a)*



*б)*

**Рис. 5.** Пески разномерные в замке складки (*a*), песок гравелистый (*б*)

ным слоем пойменного аллювия, также наблюдаются в скважинах № 2208, 2209. Эти факты указывают на то, что в период, предшествующий формированию поймы, в водоеме, находившемся на месте расширения долины, существовал застойный режим.

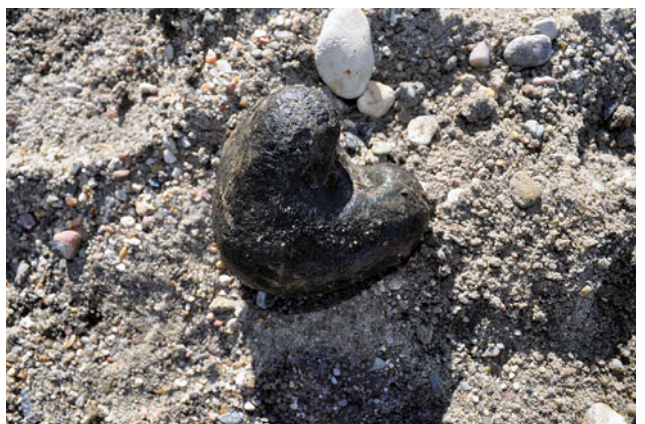
Возможно, что на начальном этапе разработки современной долины р. Куньи здесь произошел завал. В результате образовалось озеро, выработавшее котловинообразное расширение.

Климатическая и геолого-геоморфологическая обстановка того времени в долине р. Куньи не под-

дается воссозданию в деталях методом инженерной геологии. Такая реконструкция требует выполнения специальных исследований, задачи которых выходят за рамки этой статьи. Без этого нет достаточных данных для каких-либо конкретных выводов. Можно лишь предполагать некоторые основные особенности существовавших палеогеографических условий. Очевидно, что грунтовой массив по берегам р. Куньи находился в мерзлом состоянии. При этом он испытывал значительные напряжения. Они привели к деформациям мерзлых пород, имевшим как деструктивный (глыбовый), так



*a)*

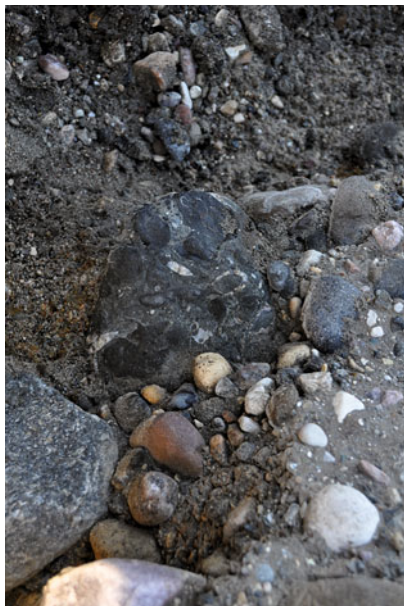


*б)*

**Рис. 6.** Валун фосфоритового песчаника (*a*), желвак фосфорита (*б*)



a)



б)

**Рис. 7.** Южный борт котлована. Валунно-галечные отложения (a), фосфоритовый валун в валунно-галечной толще (б)

и пликвативный (пластический) характер. На это указывают многочисленные случаи вертикальных контактов между песками и моренными суглинками, залегание пород в виде клиньев среди чуждых по литологическому составу отложений. Примеры “глыбового” характера залегания приводятся на рис. 2. В отдельных случаях отмечены нарушения типа сбросов с небольшой амплитудой (рис. 3).

Параметры				
$\alpha$ простира- ния	$\alpha$ падения	Угол наклона	Расстояние между осями	Высота (амп- литуда)
110°	20°	15 – 20°	3 – 10 м	1,5 – 3,0 м



a)



б)

**Рис. 8.** Валун, состоящий из сцементированных ростров белемнитов (a), обломки сцементированной фауны (б)

Большой интерес представляют складчатые дислокации в песках (рис. 4). Смятые в складки пески, показанные на рис. 4, экспонированы в левобережном (западном) борту котлована между абсолютными отметками 184 и 188 м. Здесь склон долины сложен суглинистыми образованиями морены московского горизонта (glQIIms), а также песками предположительно позднемосковского времени (fglQIIms) или (и) внутриморенными. В обнажении деформации песков представлены серией изоклиальных складок, постепенно уменьшающихся в размерах по направлению с севера на юг. Складки заканчиваются формой, напоминающей будинаж. Элементы залегания складок и другие их параметры приводятся в таблице.

Состав дислоцированных песков разномерный, с преобладанием гравелистых разностей (рис. 5).

Вероятно, складчатость в песках относится к пластическим гляциодислокациям, обусловленным общим состоянием мерзлого массива. Возможно, что оно отражает крайне неравномерный характер напряжений в период распада ледникового покрова. Высказывается также и другая, далеко не бес-



а)



б)

**Рис. 9.** Отпечатки брахиопод на фосфоритовой породе (а), раковины брахиопод и их отпечатки хорошей сохранности (б)

спорная, но интересная точка зрения на происхождение Краснозаводских дислокаций, согласно которой они могли образоваться в зоне влияния крупного тектонического нарушения сдвигового характера, существующего в породах кристаллического фундамента.

Другим интересным фактом является находка в котловане обильной мезозойской фауны моллюсков, приуроченная к южному замыканию разрабатываемого котлована и глубинам порядка 15 – 22 м от земной поверхности (отметки 148 – 155 м абсолютной высоты). Фауна содержится в валунах фосфоритового песчаника средней крепости и крепкого. Валун имеет неправильную, зачастую причудливую форму с округленными сложными очертаниями, по виду напоминающую крупные желваки (рис. 6). Размер их обычно составляет 20 – 30 см. Они включены в слой валунно-галечных отложений значительной (порядка 10 м) мощности с песчаным и песчано-гравийным заполнителем (рис. 7). В обнажении валунно-галечниковый слой перекрывается моренными суглинками, находящимися во вторичном залегании. Толща, содержащая валуны с фауной, относится к отложениям либо аллювиального (alQIII(2t)), либо водно-ледни-

кового происхождения (fglQIIms). Для точного определения её генезиса необходимо изучение дополнительных материалов.

Фауна, законсервированная в фосфоритовых отложениях, образует обильные послонные скопления. Местами фосфоритовые песчаники буквально набиты фауной (рис. 8). Встречаются брахиоподы хорошей сохранности (рис. 9), крупные ростры белемнитов, аммониты, иногда очень больших размеров, судя по осколкам раковин, диаметром до 25 – 30 см. Раковины головоногих моллюсков отличаются очень хорошей сохранностью (рис. 10).

Особо следует выделить перламутровую раковину аммонита великолепной сохранности (рис. 11) размером 5 – 7 см в диаметре. Аммонит относится к роду *Virgatites pallasianus* (d'Orbigny) и является руководящей фауной для среднего подъяруса волжского яруса верхней юры (определения М. А. Рогова, ГИН РАН) [1].

Условия, при которых богатые фауной волжские породы размывались и переоткладывались, не полностью выявлены и находятся на стадии изучения. Возможно, наличие горизонта, содержащего валуны фосфоритового песчаника, является результатом переработки юрского отторженца, перемещен-



**Рис. 10.** Раковина наутилуса хорошей сохранности



**Рис. 11.** Аммонит рода *Virgatites pallasianus* (d'Orbigny)

ного ледником на достаточно далекое расстояние. Ближайшие пункты, где юрские отложения залегают относительно близко к поверхности, находятся около пос. Хотьково (30 км от ЗаГАЭС-2). Непосредственно в месте находок фауны залегание юры установлено бурением на глубине 100 м.

Геологическое изучение участка Загорской ГАЭС продолжается больше пятидесяти лет. Среди особенностей геологического строения здесь выявлены факты, ранее не встречавшиеся в практике и недостаточно изученные наукой [2]. Остается лишь догадываться, сколько еще неожиданных и удивительных фактов может скрывать этот богатый на геологические загадки район. Несомненно, помимо познавательного интереса они могут быть важны и в профессиональном отношении. Например, благодаря хорошей сохранности и комплексности фаунистические находки представляют палеонтологиче-

ский интерес. А в случае подтверждения версии о тектоническом характере напряжений, вызвавших дислокации в песках, это явление может иметь существенное инженерно-геологическое значение.

Уместно напомнить высказывание геологов Гидропроекта по поводу выбора мест для строительства Загорской ГАЭС: в равнинных условиях для этих сооружений необходим аномальный рельеф. Чаще всего в таких случаях геологическое строение тоже аномально. Тогда и феномены на Загорской ГАЭС вполне закономерны.

#### Список литературы

1. *Митта В. В.* Аммониты и зональная стратиграфия Центральной России. — Киев: Геопрогноз, 1993.
2. *Юдкевич А. И.* Феномены Загорской ГАЭС // Юбилейный сборник научных трудов Гидропроекта (1930 – 2000). — М.: АО “Институт Гидропроект”, 2000. Вып. 159.



## Исследование трубопроводного транспорта пульпы при разработке сапропеля земснарядами с центробежными насосами

Арефьев Н. Н., доктор техн. наук, главный специалист по гидротехнике  
(ООО “Октябрьский СЗ — НН”)

Разработана методика и даны практические рекомендации по определению предельного значения объемной концентрации сапропелевой пульпы в зависимости от свойств сапропеля в залежи.

**Ключевые слова:** трубопроводный транспорт, сапропелевая пульпа, свойства, объемная концентрация.

Одним из наиболее распространенных способов добычи сапропеля является гидромеханизованный — земснарядами с центробежными грунтовыми насосами. Впервые средства гидромеханизации были использованы Р. Э. Классоном и В. Д. Кирпичниковым для добычи сапропеля в 1923 г. на оз. Селигер. Принцип работы земснарядов основан на рыхлении сапропеля, разбавлении и перемешивании его с дополнительной водой и всасывании полученной пульпы центробежными насосами. Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют о том, что кавитационные характеристики центробежных насосов, перекачивающих вязкопластичные жидкости (к которым относится сапропелевая пульпа), существенно ухудшаются по сравнению с характеристиками насосов, перекачивающих воду [1, 2]. Известно также, что напор центробежного насоса при работе на сапропелевой пульпе меньше, а потери на дисковое трение значительно превышают потери при работе на воде. Все это обуславливает повышение потребляемой мощности, снижение подачи и напора насоса [1, 3]. Поэтому разработку залежей сапропелей землесосными снарядами с центробежными грунтовыми насосами рекомендуется производить с концентрацией не более 2,5 – 7 % [4], а соотношение сапропеля естественной влажности к свободной воде зависит от физико-химических свойств сапропеля и в среднем должно находиться в пределах 1:4 – 1:25 [5]. Исследованиями [5, 6] установлена рациональная зона предельных напряжений сдвига сапропелевой пульпы —  $p_0 \leq 22,5$  Па, в пределах которой из условия энергозатрат гидротранспорт сапропелевой пульпы целесообразен. При  $p_0 > 22,5$  Па в соответствии с исследованиями [5] гидротранспорт центробежными насосами становится нецелесообразным, так как с небольшим увеличением концентрации пульпы резко возрастают энергозатраты.

Гидравлический расчет трубопроводного транспорта сапропелевой пульпы можно выполнить по методикам [4, 5, 6, 7, 8, 9]. Потери напора на длине

трубопровода (гидравлический уклон  $i$ , м/м) можно определить в соответствии с исследованиями [5, 6, 7] по выражению

$$i = \frac{2p_0}{\rho g R} + \lambda \frac{V^2}{4gR}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность пульпы, кг/м<sup>3</sup>;  $R$  — внутренний радиус трубы, м;  $V$  — средняя скорость течения пульпы по сечению трубы, м/с;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\lambda$  — коэффициент гидравлического трения.

Значение  $p_0$  можно определить в соответствии с исследованиями [7] по эмпирической формуле

$$p_0 = 10^{-5} (100 - A)^{1,5} e^{0,026(100-A)c}, \quad (2)$$

где  $c$  — содержание сухого вещества в пульпе, %;  $A$  — зольность сапропеля в залежи, %.

Значение  $c$  можно определить

$$c = \frac{K}{W_0} (100 - W_0), \quad (3)$$

где  $W_0$  — относительная влажность сапропеля в залежи, %;  $K$  — объемная концентрация сапропелевой пульпы по сапропелю естественной влажности, %.

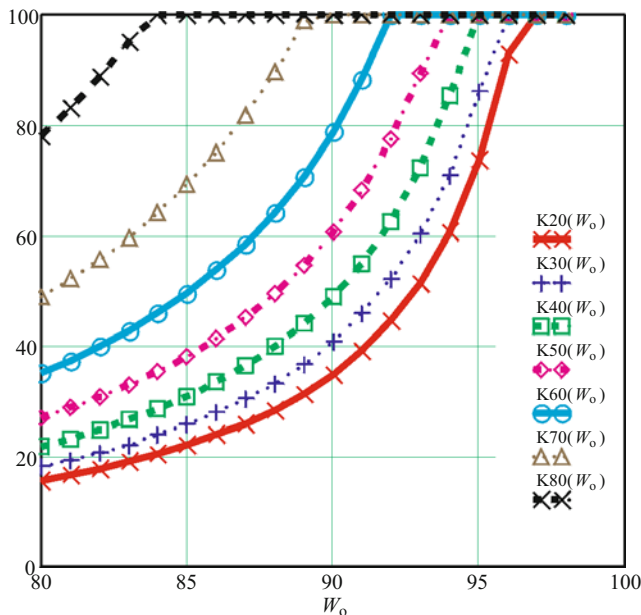
Значение  $V$  можно определить по выражению

$$V = \frac{Q}{3600\pi R^2}, \quad (4)$$

где  $Q$  — расход по пульпе, м<sup>3</sup>/ч.

Значение  $\lambda$  находится с учетом режима течения [6, 7], определяемого в зависимости от числа Рейнольдса  $Re$ :

при ламинарном режиме течения ( $Re < 4000$ )



**Рис. 1.** Графики зависимостей предельно допустимых значений объемной концентрации сапропелевой пульпы  $K$  от относительной влажности  $W_0$  и зольности сапропеля в залежи  $A$ :

$K_{20}(W_0)$  — для зольности  $A = 20\%$ ;  $K_{30}(W_0)$  — для зольности  $A = 30\%$ ;  $K_{40}(W_0)$  — для зольности  $A = 40\%$ ;  $K_{50}(W_0)$  — для зольности  $A = 50\%$ ;  $K_{60}(W_0)$  — для зольности  $A = 60\%$ ;  $K_{70}(W_0)$  — для зольности  $A = 70\%$ ;  $K_{80}(W_0)$  — для зольности  $A = 80\%$

$$\lambda = \frac{64}{Re}; \quad (5)$$

при турбулентном режиме течения ( $Re \geq 4000$ )

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}. \quad (6)$$

Значение  $Re$  можно определить для вязкопластичной жидкости по соотношению

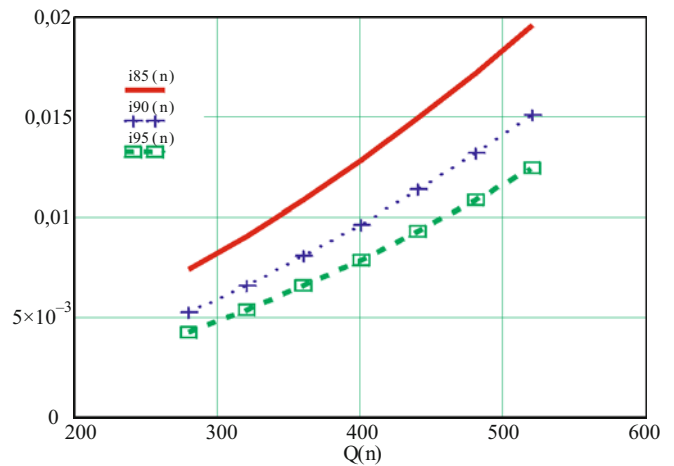
$$Re = \frac{2VR}{\chi + \frac{p_0 R}{3\rho V}}, \quad (7)$$

где  $\chi$  — кинематическая вязкость сапропелевой пульпы,  $m^2/c$ .

Значение  $\chi$  можно определить на основании исследований [6]

$$\chi = 4 \cdot 10^{-6} \left[ 1 + c^2 \left( \frac{1-A}{100} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Учитывая рекомендации [5, 6], что  $p_0$  не может превышать 22,5 Па, после преобразований (2) с учетом (3) можно написать выражение для определения предельного значения объемной концентра-



**Рис. 2.** Зависимость гидравлического уклона от относительной влажности сапропеля в залежи:

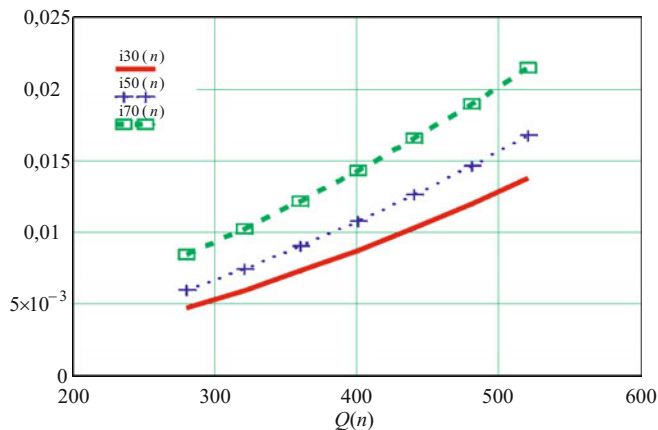
$i_{85}(n)$  — для слоя сапропелевой залежи влажностью 85 %;  $i_{90}(n)$  — для слоя сапропелевой залежи влажностью 90 %;  $i_{95}(n)$  — для слоя сапропелевой залежи влажностью 95 %

ции  $K$  сапропелевой пульпы в зависимости от относительной влажности  $W_0$  и зольности  $A$  сапропеля в залежи

$$K \leq \frac{W_0}{0,026(100 - W_0)(100 - A)} \ln \frac{22,5 \cdot 10^5}{(100 - A)^{1,5}}. \quad (9)$$

Графики зависимостей предельно допустимых значений объемной концентрации пульпы от относительной влажности и зольности сапропеля в залежи, полученные по (9), приведены на рис. 1.

В процессе геологической разведки месторождения обычно определяются значения относительной влажности и зольности сапропеля в залежи по слоям. По этим значениям можно определить предельную объемную концентрацию сапропелевой пульпы при перекачивании ее центробежными насосами, воспользовавшись рис. 1. И в зависимости от полученного значения объемной концентрации принять решение об использовании соответствующего грунтозаборного устройства и технологии разработки. Так, например, по рис. 1 можно определить, что при относительной влажности сапропеля в залежи 90 % и зольности 20 % объемная концентрация сапропелевой пульпы не может превышать 35 %. А при той же относительной влажности 90 % и зольности 60 % объемная концентрация сапропелевой пульпы может достигать 80 %. При относительной влажности 92 % и зольности свыше 60 % можно сапропель не смешивать с водой, а перекачивать его в состоянии естественной влажности центробежными насосами. При относительной влажности сапропеля в залежи 95 % и выше его можно перекачивать центробежными насосами в естественном состоянии без разбавления водой при зольности 40 % и выше.



**Рис. 3.** Зависимость гидравлического уклона от объемной концентрации сапропелевой пульпы:

$i_{30}(n)$  — для сапропелевой пульпы с концентрацией 30 %;  $i_{50}(n)$  — для сапропелевой пульпы с концентрацией 50 %;  $i_{70}(n)$  — для сапропелевой пульпы с концентрацией 70 %

Зависимости  $p_0$  и  $\chi$  от  $W_0$ ,  $K$  и  $A$  получим соответственно из (2) и (8), подставив туда значение  $c$  из (3):

$$p_0 = 10^{-5} (100 - A)^{1,5} e^{0,026(100-A)(100-W_0) \frac{K}{W_0}}, \quad (10)$$

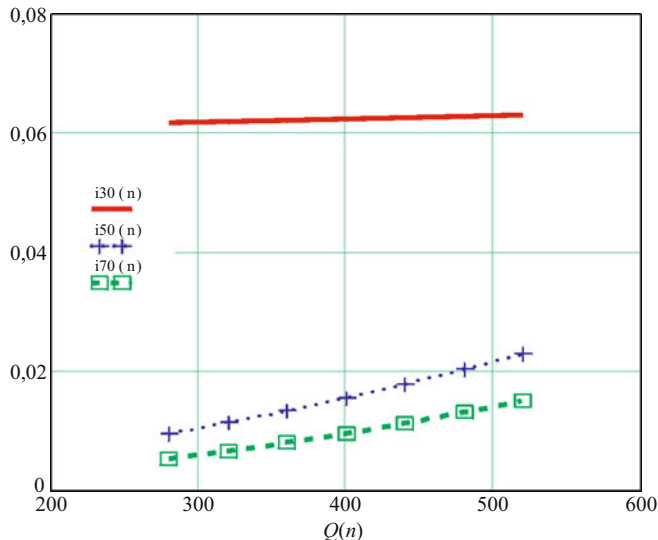
$$\chi = 4 \cdot 10^{-6} \left\{ 1 + \left[ \frac{K}{W_0} (100 - W_0) \left( 1 - \frac{A}{100} \right) \right]^2 \right\}. \quad (11)$$

С помощью выражений (10) и (11) показана зависимость реологических характеристик сапропелевой пульпы не только от свойств сапропеля в залежи ( $A$  и  $W_0$ ), но и от объемной концентрации пульпы  $K$ .

Подставляя в (10) значения  $A$  и  $W_0$ , полученные из данных геодезической разведки, и  $K$ , не превышающее значение из графика рис. 1, определяем величину предельного напряжения сдвига  $p_0$  для сапропелевой пульпы, которая используется для расчета гидравлического уклона в (1).

При определении гидравлического уклона по (1) для земснаряда проекта 258.Г80 с центробежным насосом марки ГрАУ400/20 проведены исследования его зависимости от относительной влажности и зольности сапропеля в залежи и объемной концентрации сапропелевой пульпы.

На рис. 2 приведены графики зависимости гидравлического уклона  $i$  от влажности  $W_0$  сапропеля в залежи и расхода в трубопроводе  $Q$ . В расчетах приняты следующие значения:  $K = 40$  %,  $A = 70$  %,  $R = 0,15$  м. Исследования проведены для  $W_0 = 85$ , 90 и 95 %. Из графиков видно, что с уменьшением относительной влажности сапропеля в залежи возрастает гидравлическое сопротивление при транс-



**Рис. 4.** Зависимость гидравлического уклона от зольности сапропеля в залежи:

$i_{30}(n)$  — для сапропелевой залежи зольностью 30 %;  $i_{50}(n)$  — для сапропелевой залежи зольностью 50 %;  $i_{70}(n)$  — для сапропелевой залежи зольностью 70 %

портировании сапропелевой пульпы: кривая  $i_{85}(n)$ , соответствующая образованию пульпы из сапропелевой залежи с относительной влажностью 85 %, располагается выше кривой  $i_{95}(n)$ , соответствующей образованию пульпы из сапропелевой залежи с относительной влажностью 95 %. Таким образом, при расчете гидротранспорта сапропелевой пульпы необходимо знать относительную влажность сапропеля в залежи. Учитывая, что относительная влажность в залежи изменяется по мере роста слоя сапропеля, расчет требуется проводить для различных слоев отдельно. Исходным материалом являются данные геологической разведки об относительной влажности по толщине слоя залежи сапропеля.

На рис. 3 приведены графики зависимости гидравлического уклона  $i$  от объемной концентрации  $K$  пульпы и расхода в трубопроводе  $Q$ . В расчетах приняты следующие значения:  $W_0 = 90$  %,  $A = 70$  %,  $R = 0,15$  м. Исследования проведены для  $K = 30$ , 50 и 70 %. Из графиков видно, что с увеличением объемной концентрации сапропелевой пульпы возрастает гидравлическое сопротивление при транспортировании: кривая  $i_{30}(n)$ , соответствующая сапропелевой пульпе с объемной концентрацией 30 %, располагается ниже кривой  $i_{70}(n)$ , соответствующей концентрации 70 %. Таким образом, при расчете гидротранспорта сапропелевой пульпы необходимо учитывать ее объемную концентрацию, которая зависит от эффективности грунтозаборного устройства.

На рис. 4 приведены графики зависимости гидравлического уклона  $i$  от зольности  $A$  сапропеля в залежи и расхода в трубопроводе  $Q$ .

В расчетах приняты следующие значения:  $K = 40 \%$ ,  $W_0 = 90 \%$ ,  $R = 0,15$  м. Исследования проведены для  $A = 70$ ; 50 и 30 %. Из графиков видно, что с уменьшением зольности сапропеля в залежи возрастает гидравлическое сопротивление при транспортировании сапропелевой пульпы: кривая  $i_{30}(n)$ , соответствующая образованию пульпы из сапропелевой залежи с зольностью 30 %, располагается значительно выше кривой  $i_{70}(n)$ , соответствующей образованию пульпы из сапропелевой залежи с зольностью 70 %. Следовательно, чем ниже зольность, тем больше органики в сапропелевой залежи, тем выше гидравлическое сопротивление при транспортировании пульпы. Таким образом, при расчете гидротранспорта сапропелевой пульпы необходимо знать зольность сапропеля в залежи. Исходным материалом являются данные геологической разведки о зольности залежи сапропеля.

## Выводы

1. Получено математическое описание реологических характеристик сапропелевой пульпы в зависимости не только от свойств сапропеля в залежи (зольности и относительной влажности), но и от объемной концентрации пульпы.

2. Разработана методика и даны практические рекомендации по определению предельного значения объемной концентрации сапропелевой пульпы в зависимости от свойств сапропеля в залежи.

3. Показано, что при относительной влажности и зольности сапропеля соответственно выше 95 и

40 % его можно перекачивать центробежными насосами в естественном состоянии без разбавления водой.

4. Гидравлическое сопротивление при трубопроводном транспортировании сапропелевой пульпы увеличивается при уменьшении относительной влажности и зольности сапропеля в залежи, а также с увеличением объемной концентрации пульпы.

## Список литературы

1. *Арефьев Н. Н.* Научное обоснование технических решений и разработка на их основе средств повышения эффективности судовых энергетических установок землесосных снарядов: Дис. ... доктора техн. наук. Н. Новгород, 2011.
2. *Животовский Л. С., Смойловская Л. А.* Техническая механика гидросмесей и грунтовые насосы. — М.: Машиностроение, 1986.
3. *Арефьев Н. Н.* Инженерная методика пересчета характеристик центробежных насосов с воды на сапропель // Сб. докладов VI съезда гидромеханизаторов России. — М.: ООО "Центр Инновационных технологий", 2012.
4. *Рекомендации по технологии добычи сапропелей землесосными установками намывом в отстойники с обезвоживанием их до влажности 50 – 60 процентов.* — М.: ВНИИГиМ, 1978.
5. *Методические указания по расчету гидравлического транспорта сапропелей.* — М.: ВНИИГиМ, 1981.
6. *Лопотко М. З., Лецко А. П., Дубинин С. К.* Рекомендации по технологии промышленной добычи сапропелей из открытых водоемов. — М.: Наука и техника, 1981.
7. *Рекомендации по промышленной технологии добычи сапропелей из открытых водоемов для удобрений.* — М.: Колос, 1983.
8. *Смолдырев А. Е.* Трубопроводный транспорт (основы расчета). — М.: Недра, 1980.
9. *Штин С. М.* Озерные сапропели и их комплексное освоение. — М.: МГУ, 2005.

# Исследование гидротермического режима проточного неглубокого водохранилища-охладителя с использованием численной модели

Соколов А. С., доктор техн. наук (ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»)

С целью прогнозирования гидротермического режима проточного неглубокого водохранилища-охладителя, которое обеспечивает охлаждающей технической водой хранилище отработавшего ядерного топлива, построена математическая модель, основанная на решении уравнений гидродинамики и переноса тепла методом конечных элементов. Проведенные численные эксперименты позволили оценить влияние ветровых условий и расхода воды в реке на температуру технической воды.

**Ключевые слова:** проточное водохранилище-охладитель, гидротермический режим, хранилище отработавшего ядерного топлива, охлаждающая техническая вода, уравнения гидродинамики и теплопереноса, численное моделирование, метод конечных элементов.

Водохранилища-охладители, предназначенные для охлаждения технической воды энергетических и промышленных объектов, могут быть созданы на реках устройством водоподпорных сооружений, образованы отсечением части акватории крупных водных объектов или возведением ограждающих дамб по всему контуру при размещении вне водотоков. В первом случае они относятся к проточным водоемам, поскольку пропускают речной сток.

Следует отметить, что в некоторых работах (в частности [1–2]) любое водохранилище-охладитель полагается проточным из-за циркуляции, обусловленной сбросом подогретой технической воды и ее забором после охлаждения.

В настоящей статье под проточным понимается водохранилище-охладитель, созданное на реке, а его проточность обусловлена речным стоком. Для определенности можно считать водохранилище проточным, если расход воды в реке составляет не менее 10 % расхода технической воды [3]. В этом случае при обосновании системы водоснабжения энергетического или промышленного объекта следует учитывать влияние поступления речной воды на гидротермические процессы в водохранилище.

Обычно полагается, что техническая вода, предназначенная для отвода тепла от оборудования, сбрасывается в водохранилище-охладитель, охлаждается в нем, а затем забирается для повторного использования. Однако в случае проточного водохранилища такое представление является неточным, поскольку в водозабор поступает также и речная вода.

С использованием разработанной численной конечно-элементной модели исследовался гидротермический режим проточного водохранилища-охладителя, предназначенного для водоснабжения хранилища отработавшего ядерного топлива (ХОЯТ) атомной электростанции. Задачей численного моделирования являлось прогнозирование температуры технической воды, поступающей из водохрани-

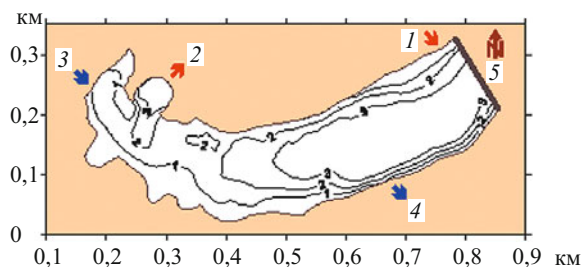
лища в ХОЯТ и используемой там для отвода остаточного тепловыделения, а также оценка изменения температурного режима водохранилища при сбросе подогретой технической воды с точки зрения экологической безопасности.

## Краткое описание объекта исследований и исходные данные для численного моделирования

План водохранилища-охладителя ХОЯТ с картой глубин и расположением основных гидротехнических сооружений приведен на рис. 1.

Водохранилище, созданное на реке путем возведения земляной плотины, относится к числу мелководных; его средняя глубина составляет 2,1 м, площадь свободной поверхности — 0,11 км<sup>2</sup>. По данным многолетних наблюдений расход воды в реке изменялся в диапазоне 0,03 – 0,63 м<sup>3</sup>/с.

Согласно проекту забор технической воды и ее сброс после прохождения через теплообменники ХОЯТ предполагается осуществлять на левом берегу водохранилища через открытые каналы. Расстояние по береговому контуру между каналами составляет примерно 600 м. На правом берегу в 200 м от плотины находится вход в канал паводкового водосброса, поддерживающего постоянный уровень в водохранилище. Расход технической



**Рис. 1.** Водохранилище-охладитель ХОЯТ с картой глубин (м): 1 – водосброс ХОЯТ; 2 – водозабор ХОЯТ; 3 – речной сток; 4 – паводковый водосброс; 5 – плотина

воды составляет  $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ , в теплообменниках ХОЯТ она нагревается на  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Численное моделирование гидротермических процессов в водохранилище проводилось для среднемесячных метеорологических условий самого теплого месяца календарного года. Из-за отсутствия данных по температуре речной воды она принималась равной температуре воды в водохранилище при отсутствии теплового сброса (естественной температуре  $T_e$ ).

Расчеты выполнялись для четырех направлений ветра при варьировании его скорости и расхода речной воды.

### Численная модель

Температурный режим водохранилища-охлаждителя при сбросе подогретой технической воды ХОЯТ определялся на основе решения следующей системы уравнений:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{q_i q_1}{H} \right) + \rho g H \frac{\partial \eta}{\partial x_1} - \tau_{s1} + \tau_{b1} - \frac{\partial}{\partial x_i} \vartheta \frac{\partial q_1}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{q_i q_2}{H} \right) + \rho g H \frac{\partial \eta}{\partial x_2} - \tau_{s2} + \tau_{b2} - \frac{\partial}{\partial x_i} \vartheta \frac{\partial q_2}{\partial x_i} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial x_i} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{q_i}{\rho} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} a_i H \frac{\partial T}{\partial x_i} - \frac{\Phi_s}{c\rho} = 0, \quad (4)$$

где  $i = 1, 2$ , причем по дважды повторяющимся индексам в одночленных выражениях производится суммирование;  $x_i$  — горизонтальные координаты в прямоугольной системе координат;  $q_i = \int_0^H \rho v_i dx_3$  —

составляющие удельного массового расхода воды;  $x_3$  — координата вдоль направленной вверх вертикальной оси;  $v_i$  — горизонтальные составляющие скорости;  $H$  — глубина (расстояние от дна до уровня свободной поверхности);  $\eta$  — изменение уровня свободной поверхности;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\tau_{si}$  и  $\tau_{bi}$  — составляющие напряжений трения на свободной поверхности и на дне соответственно;  $T$  — температура воды;  $\vartheta$  и  $a_i$  — коэффициенты переноса;  $\rho$  и  $c$  — плотность и удельная теплоемкость воды, принятые постоянными;  $\Phi_s$  — плотность потока тепла на свободной поверхности.

Уравнения (1) – (3) получены интегрированием по глубине трехмерных уравнений движения, уравнение (4) — интегрированием по глубине уравне-

ния переноса тепла. По причине небольшой глубины водохранилища вертикальные изменения температуры не учитывались. Поскольку в данном случае плотность воды принималась постоянной величиной, уравнения движения решались независимо от уравнения теплопереноса.

Составляющие напряжения трения на свободной поверхности и на дне рассчитывались по формулам:

$$\tau_{s1} = c_f \rho_a W^2 \cos \theta; \quad (5)$$

$$\tau_{s2} = c_f \rho_a W^2 \sin \theta; \quad (6)$$

$$\tau_{bi} = \frac{g}{\rho C^2 H^2} q_i (q_1^2 + q_2^2)^{1/2}, \quad i = 1, 2, \quad (7)$$

где  $c_f$  — коэффициент ветрового напряжения;  $\rho_a$  — плотность воздуха;  $W$  — скорость ветра на высоте 10 м;  $\theta$  — угол между направлением ветра и осью  $x_1$ ;  $C$  — коэффициент Шези, который определялся по формуле Маннинга.

Плотность потока тепла  $\Phi_s$  рассчитывалась с использованием зависимостей, приведенных в [4].

При решении системы уравнений движения (1) – (3) на участках берегового контура, где речная вода и подогретая техническая вода поступают в водохранилище, граничные условия задавались в виде

$$q_n = q_n^*; \quad (8)$$

$$q_\tau = 0; \quad (9)$$

$$\eta = 0, \quad (10)$$

где  $q_n$  и  $q_\tau$  — нормальная и касательная к границе составляющие удельного массового расхода;  $q_n^*$  — значение нормальной составляющей  $q$ , определяемое исходя из расхода речной или технической воды.

Условие (10) обычно интерпретируется как условие присоединения бесконечно глубокого водоема со спокойной поверхностью.

На участках границы, где вода выходит из водохранилища (водозабор ХОЯТ и вход в канал паводкового водосброса), ставились условия (8) – (9).

На твердом береговом контуре задавалось условие “непротекания”

$$q_n = 0. \quad (11)$$

При решении уравнения теплопереноса (4) граничные условия задавались следующим образом.

На твердом береговом контуре ставилось условие тепловой изоляции

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (12)$$

где  $n$  — координата по нормали к граничному контуру.

Граничное условие в виде (12) задавалось также на участках жидкой границы, где вода выходит из водохранилища, поскольку полагалось, что здесь конвективный перенос тепла через границу играет определяющую роль.

На участке жидкой границы, где речная вода поступает в водохранилище, ставилось условие

$$T = T_p, \quad (13)$$

где  $T_p$  — температура речной воды.

В месте сброса нагретой технической воды ХОЯТ граничное условие записывалось в виде

$$T_{\text{сбр}} = T_{\text{заб}} + \Delta T, \quad (14)$$

где  $T_{\text{сбр}}$  — температура сбрасываемой технической воды;  $T_{\text{заб}}$  — температура технической воды, поступающей в водозабор ХОЯТ;  $\Delta T$  — нагрев технической воды в теплообменниках ХОЯТ, принимаемый постоянным.

Следует отметить, что в (14) температуры  $T_{\text{сбр}}$  и  $T_{\text{заб}}$  — искомые величины.

В расчетах использовались следующие значения коэффициентов, входящих в уравнения и граничные условия:  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $c = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ ;  $\vartheta = 10^{-1} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $c_f = 2,6 \cdot 10^{-3}$ ;  $\rho_a = 1,2 \text{ кг/м}^3$ . Коэффициент шероховатости в формуле Маннинга принимался равным  $3 \cdot 10^{-2}$ .

Известно, что основной вклад в суммарный коэффициент переноса тепла в уравнении (4) вносит составляющая, выражающая гидродинамическую дисперсию (конвективную диффузию), а двумя другими составляющими, которые характеризуют интенсивность молекулярного и турбулентного обмена, можно пренебречь. При назначении коэффициента дисперсии в настоящей работе использовались данные, приведенные в работе [5].

Как показали результаты исследований процессов переноса в водных объектах, дисперсия увеличивается при увеличении скорости течения, причем значения ее продольной (вдоль потока) и поперечной (поперек потока) составляющих существенно различаются. Оба этих обстоятельства учитыва-

лись при прогнозировании температурного режима водохранилища-охладителя ХОЯТ.

Составляющие коэффициента дисперсии задавались постоянными для всего водохранилища, но меняющимися в зависимости от средней скорости течения. Поскольку последняя зависит от скорости ветра и расхода воды в реке, принятые в численных экспериментах значения составляющих коэффициента дисперсии различались. Продольная составляющая задавалась в диапазоне  $2,5 \cdot 10^{-2} \div 1,0 \cdot 10^{-1} \text{ м}^2/\text{с}$ , поперечная составляющая — в диапазоне  $2,5 \cdot 10^{-3} \div 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$ . Переход к составляющим  $a_i$  в уравнении (4) осуществлялся путем соответствующего поворота координатных осей исходя из полученного направления вектора скорости в узлах расчетной сетки.

Для решения дифференциальных уравнений (1) – (4) был применен метод конечных элементов в сочетании с методом Галеркина (например [6 – 7]).

В соответствии с методом конечных элементов неизвестная искомая функция  $U$  (в данном случае ее роль играют параметры гидротермического режима  $q_1, q_2, \eta$  и  $T$ ) аппроксимируется выражением

$$U = [N]\{\Phi_U\}, \quad (15)$$

где  $[N]$  — матрица-строка функций формы, определяемых геометрией конечного элемента;  $\{\Phi_U\}$  — вектор-столбец значений функции  $U$  в узлах конечного элемента.

Приближенное решение уравнения

$$L(U) = 0 \quad (16)$$

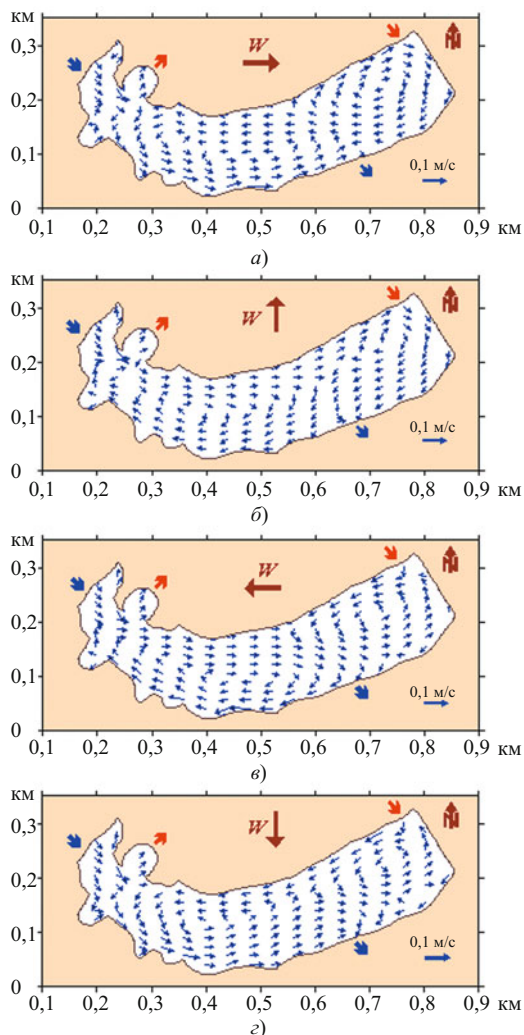
строится путем минимизации взвешенных невязок исходя из соотношения

$$\int_{S_e} [N]^t L(U) dS_e = 0, \quad (17)$$

где  $L$  — дифференциальный оператор;  $S_e$  — площадь элемента;  $t$  — знак транспонирования.

После подстановки в (17) выражения для искомой функции в виде (15) и последующего интегрирования для каждого конечного элемента формируется локальная система алгебраических уравнений, которая используется при построении глобальной системы уравнений для определения значений функции  $U$  в узлах конечно-элементной сетки расчетной области.

При разработке вычислительной программы в данном случае использовались двумерные симплекс-элементы, т.е. аппроксимация искомым функцией осуществлялась линейными полиномами на треугольных конечных элементах.



**Рис. 2.** Поля средней скорости в водохранилище-охладителе ХОЯТ при ветре различных направлений ( $W = 3 \text{ м/с}$ ,  $Q_p = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ ):

*a* — западном; *б* — южном; *в* — восточном; *з* — северном

Для дискретизации нелинейных членов в уравнениях количества движения (1)–(2) применялся групповой вариант метода конечных элементов, а полученная в результате система алгебраических уравнений решалась методом Ньютона.

### Анализ результатов численного моделирования

С использованием разработанной вычислительной программы были проведены расчеты гидротермических процессов в водохранилище-охладителе, которые позволили исследовать влияние ветровых условий и расхода речной воды на температурный режим водохранилища и температуру технической воды, поступающей в ХОЯТ.

На рис. 2 приведены поля течений, рассчитанные для четырех различных направлений ветра. В этой серии численных экспериментов скорость ветра  $W$  была принята равной ее среднемесячному значению  $3 \text{ м/с}$ , расход речной воды  $Q_p$  равнялся  $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ .

На всех планах течений можно выделить две основные водоворотные области (в центральной и восточной частях водохранилища), однако направление движения воды в них зависит от направления ветра.

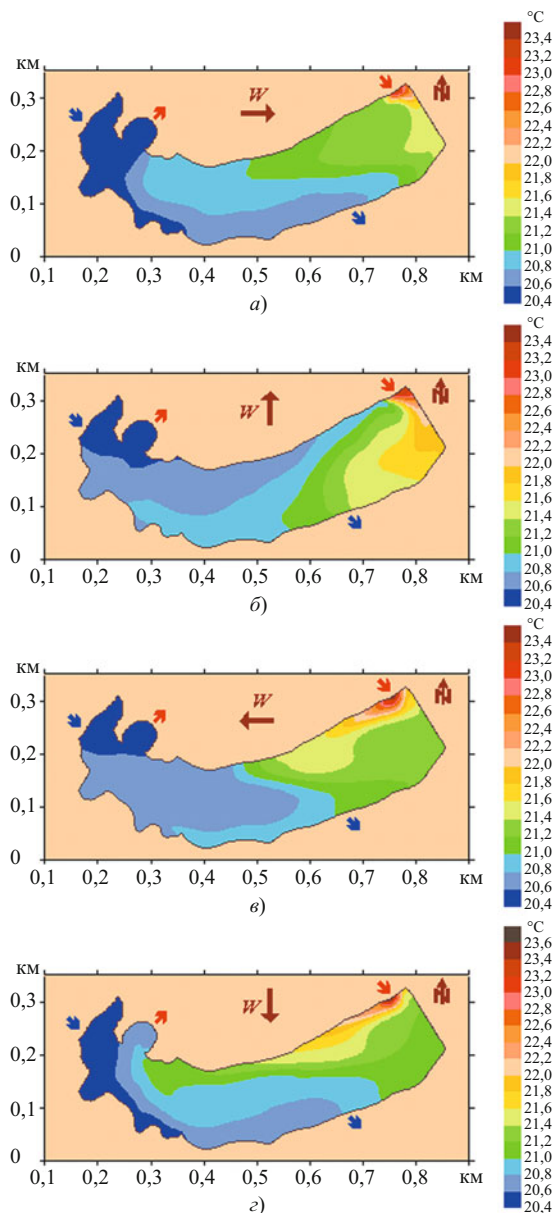
При ветре западного направления поступающая из ХОЯТ нагретая техническая вода под воздействием ветра движется вдоль плотины и в районе паводкового водосброса перемешивается с проходящим вдоль правого берега потоком речной воды (рис. 2, *a*). Южный ветер также способствует распространению сбрасываемой технической воды в направлении плотины, однако в отличие от предыдущего случая речная вода движется вдоль левого берега водохранилища и поэтому ее перемешивание с технической водой происходит в районе водосброса ХОЯТ (рис. 2, *б*). При восточном ветре сбрасываемая техническая вода перемещается вдоль левого берега в направлении водозабора, но, не дойдя до середины водохранилища, меняет направление движения на противоположное под воздействием встречного потока речной воды (рис. 2, *в*). Северный ветер прижимает речной поток к правому берегу, а сбрасываемая техническая вода перемещается вдоль левого берега в противоположном направлении почти до водозабора ХОЯТ (рис. 2, *з*).

В целом можно сделать вывод, что характер циркуляции водных масс в водохранилище при наличии ветра существенно зависит от его направления.

Поле скорости в значительной степени определяет характер распределения изотерм, которое устанавливается в водохранилище при сбросе подогретой воды из ХОЯТ. На рис. 3 приведены температурные поля, соответствующие гидродинамическим режимам, представленным на рис. 2. При ветре западного и южного направлений область с высокими значениями температуры воды находится вблизи плотины (рис. 3, *a*, *б*). При восточном и северном ветре изотермы вытянуты в западном направлении в соответствии с направлением движения нагретой технической воды, поступающей из ХОЯТ (рис. 3, *в*, *з*).

Несмотря на различия в распределении изотерм, повышение температуры воды на водозаборе ХОЯТ по отношению к естественной температуре  $T_e$ , которая при  $W = 3 \text{ м/с}$  составляет  $20,4 \text{ }^\circ\text{C}$ , вне зависимости от направления ветра сравнительно невелико и не превосходит  $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Такой результат в значительной степени обусловлен тем, что в данной серии численных экспериментов принятый расход воды в реке вдвое превышал расход технической воды, и поэтому речной поток является существенным препятствием для проникновения подогретой в ХОЯТ технической воды к водозабору.

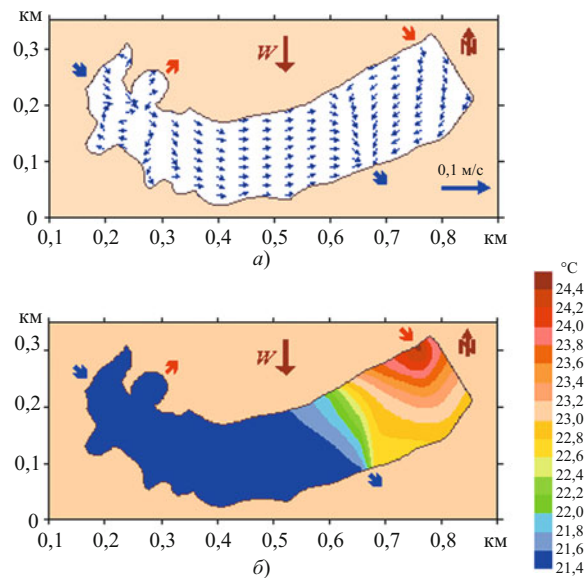




**Рис. 3.** Поля изотерм в водохранилище-охладителе ХОЯТ при ветре различных направлений ( $W = 3 \text{ м/с}$ ,  $Q_p = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ ):  
 а — западном; б — южном; в — восточном; з — северном

Наибольшее значение  $T_{\text{заб}}$  получено для северного ветра, наименьшее — для западного.

В отличие от направления ветра его интенсивность оказывает влияние не только на формирование поля скорости воды в водохранилище и, соответственно, конвективный перенос тепла, но и на теплообмен водохранилища с атмосферой. На рис. 4 приведены результаты численного эксперимента, в котором скорость ветра неблагоприятного северного направления была уменьшена до  $0,5 \text{ м/с}$ . Как видно на рис. 4, а, снижение скорости ветра приводит к тому, что почти на всей акватории водохранилища движение водных масс направлено по течению реки. Исключение составляет восточная часть водохранилища, где поле скорости в основном определяется сбросом технической воды из



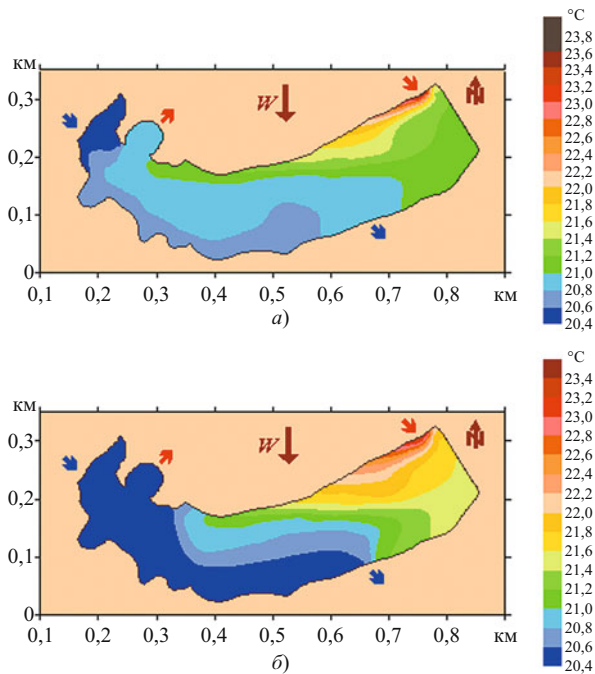
**Рис. 4.** Поля средней скорости (а) и температуры (б) в водохранилище-охладителе ХОЯТ при скорости ветра северного направления  $0,5 \text{ м/с}$  ( $Q_p = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ )

ХОЯТ. При низкой скорости ветра водоворотные области, образование которых связано с ветровым воздействием, на плане течений отсутствуют.

Изменение гидродинамического поля, обусловленное уменьшением скорости ветра, приводит к изменению характера распределения температуры в водохранилище. На рис. 4, б видно, что при снижении интенсивности северного ветра, который способствует распространению подогретой в ХОЯТ технической воды в направлении водозабора, тепловое пятно смещается в восточную часть водохранилища.

Вместе с тем из сопоставления полей изотерм, представленных на рис. 3, з и рис. 4, б, следует, что средняя температура водохранилища и температура воды, поступающей в водозабор ХОЯТ, при уменьшении скорости ветра повышаются. Такой результат обусловлен вторым фактором, определяющим влияние ветра на температурный режим водохранилища, — снижением теплоотдачи в атмосферу с уменьшением скорости ветра. При этом повышение температуры воды в водохранилище происходит как за счет снижения интенсивности теплообмена с атмосферой через свободную поверхность, так и за счет увеличения температуры поступающей речной воды. Очевидно, что значение последнего обстоятельства в формировании температурного режима водохранилища возрастает при увеличении расхода воды в реке. Рассчитанная естественная температура воды  $T_e$  при скорости ветра  $0,5 \text{ м/с}$  составила  $21,4 \text{ °C}$ .

Следует отметить, что в глубоких водохранилищах-охладителях с вертикальной температурной стратификацией увеличение скорости ветра способствует перемешиванию верхнего слоя с более



**Рис. 5.** Поля изотерм в водохранилище-охладителе ХОЯТ при различном расходе воды в реке (северный ветер,  $W = 3$  м/с):  
 а —  $0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ ; б —  $0,6 \text{ м}^3/\text{с}$

холодными нижними слоями. Поэтому при использовании глубинного водозабора ветровое перемешивание может привести к повышению температуры воды, поступающей из придонных слоев водохранилища в водозабор, и таким образом влияние скорости ветра на температуру технической воды оказывается неоднозначным.

Увеличение расхода воды в реке играет позитивную роль для снижения температуры технической воды, поскольку, во-первых, способствует движению водных масс в направлении от водозабора к водосбросу, во-вторых, приводит к понижению общего уровня температур в водохранилище за счет поступления большего количества речной воды.

На рис. 5 приведены результаты расчетов гидротермического режима водохранилища для существенно различающихся расходов речной воды —  $0,05$  и  $0,6 \text{ м}^3/\text{с}$ .

При расходе воды в реке  $0,05 \text{ м}^3/\text{с}$  (рис. 5, а), вдвое меньшем, чем расход технической воды, перемешивание речной и технической воды происходит в основном вблизи водозабора ХОЯТ. Снижение температуры технической воды в водохранилище обусловлено в большей степени теплообменом с атмосферой, чем перемешиванием с речной водой. Вместе с тем из-за того, что водосброс и водозабор ХОЯТ расположены в разных концах водохранилища, сбрасываемая техническая вода успевает значительно охладиться. В результате температура воды на водозаборе ХОЯТ мало отличается от естественной температуры.

При увеличении расхода воды в реке до  $0,6 \text{ м}^3/\text{с}$  (рис. 5, б) характер распределения температуры в водохранилище меняется. Перемешивание технической воды с речной водой происходит уже вблизи водосброса ХОЯТ. Речной поток препятствует рециркуляции теплой воды к водозабору, поэтому в водозабор ХОЯТ поступает вода с естественной температурой.

На рис. 6 приведены построенные исходя из результатов численных экспериментов кривые зависимости температуры технической воды на водозаборе ХОЯТ от расхода воды в реке при различной скорости ветра неблагоприятного северного направления. Как можно видеть, при небольшой скорости ветра (кривая 1) влияние речного расхода на величину  $T_{\text{заб}}$  невелико. Это означает, что расстояние от водосброса до водозабора достаточно для того, чтобы обеспечить при слабом ветре охлаждение технической воды почти до естественной температуры за время ее циркуляции в водохранилище.

Если скорость ветра неблагоприятного направления возрастает до  $1,5$  м/с (кривая 2), воздействие ветра на гидродинамический режим приводит к тому, что температура технической воды повышается по отношению к естественному фону, и поэтому влияние расхода воды в реке становится более существенным.

При увеличении скорости ветра до  $3$  м/с (кривая 3) и небольших значениях речного расхода влияние последнего на температуру технической воды снижено, поскольку в этом случае ветер является существенно более важным фактором для формирования гидротермического режима водохранилища.

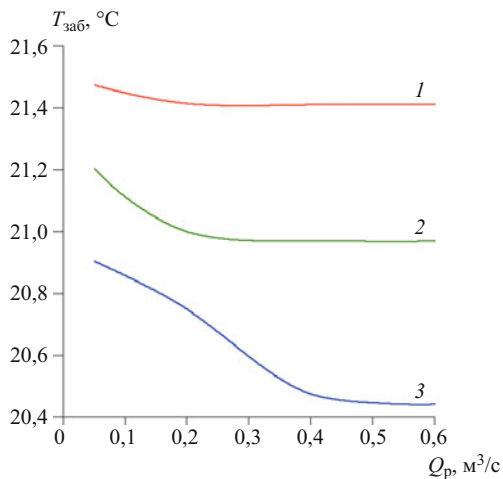
При речных расходах воды в реке, превышающих  $0,4 \text{ м}^3/\text{с}$ , во всех рассмотренных случаях температура технической воды на водозаборе ХОЯТ практически не превышает естественный фон.

Моделирование гидротермического режима позволяет оценить эффективность схемы использования водохранилища-охладила на основе расчета специальных показателей, которые применяются также для пересчета результатов модельных экспериментов на натурные условия (например [8 – 10]).

Важной характерной особенностью этих показателей, которая определяет возможность их применения для указанных целей, является автомодельность в некоторой области исследований по отношению к параметру теплообмена

$$\Pi = \frac{c\rho Q}{\alpha_{\Sigma}\Omega}, \quad (18)$$

где, кроме ранее принятых обозначений,  $Q$  — расход технической воды;  $\alpha_{\Sigma}$  — суммарный коэффи-



**Рис. 6.** Зависимость температуры технической воды на водозаборе ХОЯТ от расхода воды в реке при скорости ветра северного направления:

1 – 0,5 м/с; 2 – 1,5 м/с; 3 – 3 м/с

циент теплоотдачи через свободную поверхность водохранилища;  $\Omega$  — площадь свободной поверхности водохранилища.

Автомодельность показателей эффективности схемы использования водохранилища-охладителя по отношению к условиям теплообмена, выраженным показателем  $\Pi$ , позволяет использовать результаты ограниченного числа модельных экспериментов для более широкого диапазона изменения реальных условий эксплуатации.

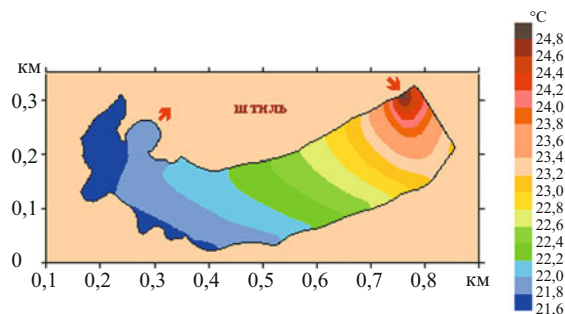
Вместе с тем применение этих показателей для проточного водохранилища-охладителя связано с трудностями, обусловленными влиянием на гидротермический режим речного стока. В качестве иллюстрации проанализируем, как меняется в рассматриваемом случае один из широко применяемых на практике показателей эффективности схемы использования водохранилища-охладителя — параметр распределения температуры, который определяется формулой

$$\Pi_T = \frac{T_s - T_{\text{заб}}}{\Delta T}, \quad (19)$$

где  $T_s$  — средняя температура поверхностного слоя водохранилища (при отсутствии вертикальной стратификации она совпадает со среднеобъемной температурой).

Более высокие значения параметра  $\Pi_T$  соответствуют более эффективной схеме использования водохранилища-охладителя.

Поступление речной воды приводит к снижению как средней температуры водохранилища-охладителя, так и температуры забираемой из него технической воды, однако эти температуры могут измениться в разной степени.



**Рис. 7.** Поле изотерм в водохранилище-охладителе ХОЯТ при отсутствии речного стока и штиле

В частности, как показали численные эксперименты, для рассматриваемого водохранилища-охладителя ХОЯТ в большинстве случаев наблюдается следующая картина. При небольшом расходе речной воды его увеличение приводит к более существенному снижению температуры воды на водозаборе по сравнению со снижением средней температуры. В результате, как следует из (19), значение параметра  $\Pi_T$  возрастает. По мере дальнейшего увеличения расхода речной воды средняя температура водохранилища снижается более интенсивно, в то время как снижение температуры воды на водозаборе замедляется, поскольку она приближается к своему предельно низкому значению — естественной температуре. При этом значение параметра  $\Pi_T$  начинает уменьшаться.

Таким образом, для одной и той же схемы использования проточного водохранилища-охладителя параметр  $\Pi_T$  меняется в зависимости от расхода воды в реке. Поэтому, чтобы оценить эффективность схемы использования водохранилища-охладителя, целесообразно определять параметр  $\Pi_T$  исходя из результатов расчетов, проведенных при условии отсутствия речного стока.

Расчеты гидротермического режима водохранилища-охладителя ХОЯТ, выполненные для случая  $Q_p = 0$ , показали, что при скорости ветра 3 м/с параметр  $\Pi_T$  в зависимости от направления ветра меняется от 0,05 до 0,15. Сравнительно низкие значения параметра  $\Pi_T$  в данном случае обусловлены низкими значениями параметра теплообмена [8]. Максимальная температура воды, поступающей в водозабор ХОЯТ, составила 21,1 °C, что на 0,7 °C выше естественной температуры  $T_e$ .

Для определения максимального значения температуры технической воды (при заданных температуре воздуха, влажности воздуха и облачности) был проведен расчет гидротермического режима водохранилища при отсутствии речного стока и штиле. Полученное поле изотерм представлено на рис. 7. Температура технической воды на водозаборе ХОЯТ равна 21,8 °C, что на 0,2 °C выше соответствующей естественной температуры. При этом

значение параметра  $Л_T$  в этом численном эксперименте составило 0,20.

Таким образом, несмотря на то что при штиле значение показателя эффективности схемы использования оказалось выше, чем в предыдущих случаях, температура воды на водозаборе ХОЯТ принимает более высокое значение. Это еще раз показывает, что среди факторов, определяющих влияние ветровых условий на температуру технической воды, главным в данном случае является зависимость интенсивности теплообмена с атмосферой от скорости ветра.

Сброс технической воды, нагретой в теплообменниках ХОЯТ, приводит к изменению температурного режима водохранилища. Однако, как показали численные эксперименты, в данном случае эти изменения незначительны и не могут существенно повлиять на экологическое состояние водного объекта. Увеличение средней температуры водохранилища по отношению к величине  $T_e$  не превышает 1,5 °С, увеличение температуры в точке сброса нагретой технической воды из ХОЯТ не превышает 4 °С. Это обусловлено, с одной стороны, небольшим нагревом технической воды в теплообменниках ХОЯТ, с другой — близостью температуры на водозаборе к естественному температурному фону.

## Выводы

1. При использовании проточного водохранилища в качестве охладителя характер гидродинамического режима может существенно меняться в зависимости от степени влияния каждого из трех основных факторов — речного стока, сброса и забора технической воды, воздействия ветра.

2. Для водохранилища-охладителя со слабой вертикальной температурной стратификацией уве-

личение теплоотдачи через свободную поверхность при увеличении скорости ветра является одним из главных факторов, способствующих снижению температуры технической воды.

3. Прогнозную оценку эффективности схемы использования проточного водохранилища-охладителя целесообразно проводить на основе численных экспериментов, выполненных при условии отсутствия речного стока.

## Список литературы

1. *Оберкамф, Кроу.* Численное исследование полей скорости и температуры в проточных водоемах // Труды американского общества инженеров-механиков. Сер. Теплопередача. 1976. № 3.
2. *Квон В. И.* Температурно-стратифицированное течение в проточном водоеме // Метеорология и гидрология. 1979. № 6.
3. *Трубина Е. К.* Опыт лабораторного проектирования на моделях водохранилищ-охладителей. — Л.: Энергия, 1969.
4. *Методические указания по технологическим расчетам водоемов-охладителей:* РД 153-34.2-21.144-2003. — СПб.: ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2004.
5. *Шеренков И. А.* Прикладные плановые задачи гидравлики спокойных потоков. — М.: Энергия, 1978.
6. *Коннор Дж., Бреббия К.* Метод конечных элементов в механике жидкости / Пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1979.
7. *Флетчер К.* Вычислительные методы в динамике жидкостей / Пер. с англ. — М.: Мир, 1991.
8. *Макаров И. И.* Анализ коэффициентов, характеризующих инженерные схемы использования водохранилищ-охладителей // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1980. Т. 143.
9. *Соколов А. С.* Анализ методов оценки температуры охлажденной воды при моделировании гидротермического режима водоемов-охладителей // Электрические станции. 1996. № 4.
10. *Соколов А. С.* Моделирование температурного режима водоемов-охладителей // Теплоэнергетика. 1997. № 12.

### Теоретическое обоснование конструктивных параметров усовершенствованного гидравлического стабилизатора расхода воды

Атаманова О. В., доктор техн. наук, Круглова В. В., аспирант  
(Кыргызско-Российский Славянский университет)

Описывается усовершенствованная конструкция гидравлического стабилизатора расхода воды с коническим козырьком. Определяется положение свободной поверхности потока при истечении из-под конической поверхности. Теоретически обосновываются конструктивные параметры предложенного гидравлического стабилизатора расхода воды с коническим козырьком.

**Ключевые слова:** стабилизатор расхода воды, конический козырек, наклонный козырек, свободная поверхность потока, боковое сжатие потока, параметры стабилизатора, теоретические исследования.

Мелиоративное строительство в Кыргызской Республике неразрывно связано с поиском путей рационального использования земельных ресурсов, экономии воды и энергии при снижении трудозатрат на орошение. Важным направлением является строительство новых и реконструкция существующих гидромелиоративных систем с применением энерго- и ресурсосберегающих технологий на основе автоматизации процессов водораспределения и водоподачи [1]. Особое внимание при этом уделяется вопросам автоматизации сооружений водоподачи оросительных систем.

Автоматизация водовыпускных сооружений чаще всего носит местный характер. Оснащение автоматами всех водовыпускных сооружений оросительных систем в Кыргызстане — процесс длительный и трудоемкий, так как эти сооружения являются наиболее массовыми на гидромелиоративных системах [2].

Сегодня существует достаточно количество гидравлических автоматов расхода воды для оросительных систем, однако каждая из существующих конструкций имеет свои недостатки. Большинство из них достаточно громоздки и не обеспечивают требуемой точности регулирования расхода воды.

С целью совершенствования существующих конструкций гидроавтоматов на кафедре гидротехнического строительства и водных ресурсов (ГТСиВР) Кыргызско-Российского Славянского университета (КРСУ) (г. Бишкек) предложен гидравлический стабилизатор расхода воды с коническим козырьком (рис. 1). Стабилизатор расхода воды, расположенный на входе в отводящий канал 1, состоит из подвижно установленного в пазах 2 устоев 3 и имеющего привод 4 затвора 5, полость которого образована ступенчатой лицевой гранью 6 и внутренней вертикальной гранью 7 со ступенчатыми коробчатыми секциями 8, симметричными относительно вертикальной оси затвора 5, причем верхняя часть 9 лицевой грани 6 затвора 5 выполнена наклонной в сторону потока так, что толщина коробчатых секций 8 в верхней части переменна по высоте, при этом на нижней части внутренней грани 7 затвора 5 закреплен наклонный козырек 10 под углом  $\beta_1 = 150^\circ$  к потоку, а на лицевой грани 6 затвора 5 закреплен конусообразный козырек 11.

Устройство работает следующим образом. При расчетном уровне воды  $H_1$  перед затвором 5, когда стабилизатор работает в режиме без перелива в коробчатые секции 8, истечение в отводящий канал 1 происходит из-под нижней водосливной кромки конусообразного козырька 11, и сжатый поток проходит, не касаясь наклонного козырька 10. При этом стабилизатор имеет максимальную пропускную способность (коэффициент расхода  $\mu = 0,57 \dots 0,6$ , ширина водосливной кромки затвора  $b_1 = 1,4b$ ).

При увеличении уровня воды больше расчетного  $H_1$  начинается перелив воды в крайние коробчатые секции 8, которые через короткое время заполняются водой, и на этом участке затвора 5 истечение переходит из режима истечения из-под конусообразного козырька 11 на истечение из-под наклонного козырька 10 с меньшей пропускной способностью ( $\mu = 0,5 - 0,53$ ) и меньшей шириной водосливной кромки. При этом пропускная способность первой секции резко уменьшается за счет уменьшения ширины крайних секций затвора в 1,4 раза, уменьшения открытия козырька в 1,25 раза и уменьшения коэффициента расхода в 1,1 раза. Это уменьшение расхода истечения в 1,92 раза из-под крайних секций компенсирует увеличение расхода из-под остальных секций затвора 5.

Для исключения сопротивления потоку, вытекающему из-под конического козырька, необходимо нижнюю грань плоского наклонного козырька располагать не ниже кривой свободной поверхности струи, претерпевающей не только вертикальное, но и боковое сжатие при истечении из-под конического козырька (рис. 2) [3].

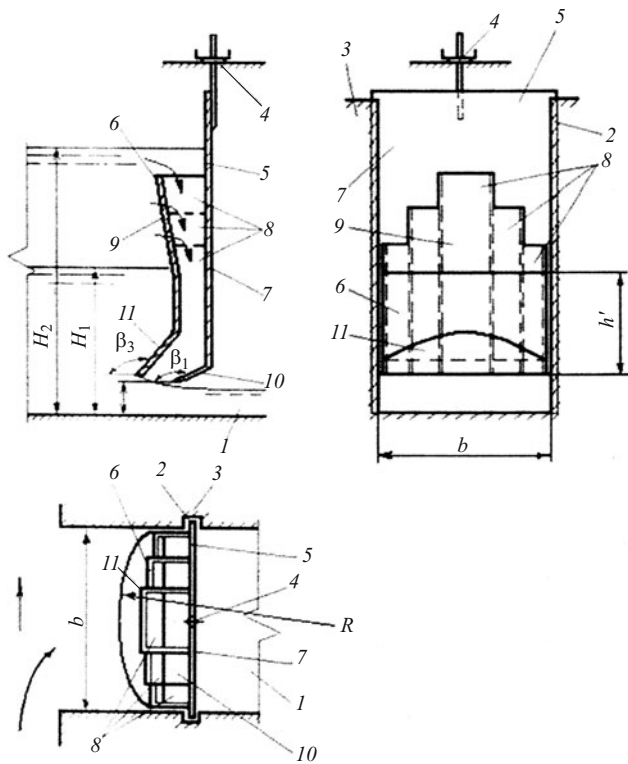


Рис. 1. Стабилизатор расхода воды с коническим козырьком (СРВКК)

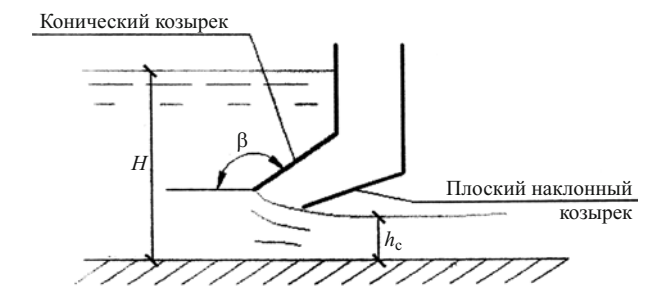


Рис. 2. Схема истечения из-под СРВКК

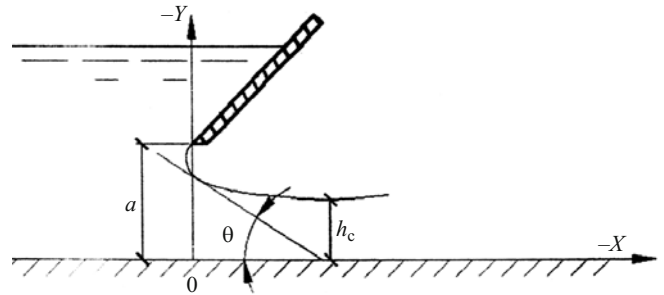


Рис. 3. Схема истечения из-под конического козырька

Для построения кривой свободной поверхности потока, вытекающего из-под конического козырька, нужно решить уравнение Н. Е. Жуковского для ординаты линии тока при истечении жидкости из сосуда [4]. При решении уравнения Н. Е. Жуковского необходимо выполнить условие истечения из-под наклонного козырька ( $\beta = 3\pi/4$ ) при наличии бокового сжатия потока. Возникающее в данном случае боковое сжатие потока оказывает существенное влияние на положение кривой свободной поверхности потока при истечении из-под конического козырька.

Классическая форма уравнения Н. Е. Жуковского имеет вид [4]

$$y = -\frac{\alpha}{\omega q} \int \sin\theta \operatorname{ctg}\left(\frac{\theta}{q}\right) d\theta - C, \quad (1)$$

где  $y$  — ордината точек кривой свободной поверхности;  $\alpha$  — параметр расхода воды,  $\alpha = Q/\pi$ ;  $Q$  — расход воды;  $\omega$  — скорость потока в сжатом сечении;  $\theta$  — угол между касательной к кривой свободной поверхности потока и осью  $x$  в плоскости  $yOx$  (рис. 3);  $q$  — параметр положения козырька.

Решим уравнение (1) для случая расположения конического козырька под углом  $\beta = 3\pi/4$ . В этом случае параметр  $q = 3/2$  [4]. Постоянная интегрирования  $C$  определяется в конце решения.

Подставим в (1) значение  $q$  и значение параметра  $\alpha = Q/\pi$ :

$$y = -\frac{Q}{\omega} \frac{2}{3\pi} \int \sin\theta \operatorname{ctg}\left(\frac{2\theta}{3}\right) d\theta - C. \quad (2)$$

Упростив подынтегральное выражение в (2), получим

$$\sin\theta \cdot \operatorname{ctg}\frac{2\theta}{3} = \frac{1}{2\cos\frac{\theta}{3}} - 3\cos\frac{\theta}{3} + 4\cos^3\frac{\theta}{3}. \quad (3)$$

Перепишем уравнение (2) с учетом (3):

$$= -\frac{Q}{\omega} \cdot \frac{2}{3\pi} \left[ \int \frac{d\theta}{2 \cos \frac{\theta}{3}} - \int 3 \cos \frac{\theta}{3} d\theta + \int 4 \cos^3 \frac{\theta}{3} d\theta \right] - C. \quad (4)$$

Проинтегрируем каждое слагаемое в скобках выражения (4):

$$\frac{1}{2} \int \frac{d\theta}{\cos \frac{\theta}{3}} = \frac{3}{2} \ln \left| \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{6} \right) \right| + C; \quad (5)$$

$$3 \int \cos \frac{\theta}{3} d\theta = 9 \sin \frac{\theta}{3} + C; \quad (6)$$

$$4 \int \cos^3 \frac{\theta}{3} d\theta = 12 \sin \frac{\theta}{3} - 4 \sin^3 \frac{\theta}{3} + C. \quad (7)$$

Перепишем (4) с учетом (5), (6), (7):

$$y = -\frac{Q}{\omega} \cdot \left[ \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left| \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{6} \right) \right| + \frac{2}{\pi} \cdot \sin \frac{\theta}{3} - \frac{8}{3\pi} \cdot \sin^3 \frac{\theta}{3} \right] - C. \quad (8)$$

Выражение (8) описывает ординату свободной поверхности потока, вытекающего из-под наклонного козырька ( $q = 3/2$ ), без учета бокового сжатия потока в плане. Для учета бокового сжатия потока в плане необходимо провести следующие математические преобразования. По условию, принятому Н. Е. Жуковским [4], для двухмерного движения потока жидкости запишем [3, 4]

$$\frac{Q}{\omega} = 2h_c, \quad (9)$$

где  $h_c$  — глубина потока в сжатом сечении.

В нашем случае

$$\frac{Q}{\omega} = 2h_c' = 2 \frac{Ba\varepsilon}{b}, \quad (10)$$

где  $B$  — длина конического козырька по кромке истечения;  $b$  — ширина отверстия в свету;  $\varepsilon$  — коэффициент сжатия потока;  $a$  — открытие затвора;  $h_c'$  — глубина потока в сжатом сечении при вертикальном и боковом сжатии потока.

Таким образом:

$$\varepsilon = \varepsilon_b \varepsilon_6, \quad (11)$$

где  $\varepsilon_b$  — коэффициент вертикального сжатия потока;  $\varepsilon_6$  — коэффициент бокового сжатия потока.

$$\text{При } \theta = 0^0 \Rightarrow y = -C = -\frac{B \cdot \varepsilon \cdot a}{b} \Rightarrow$$

$$y = -\frac{2B \cdot \varepsilon \cdot a}{\pi \cdot b} \cdot \left[ \ln \left| \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{6} \right) \right| + 2 \cdot \sin \frac{\theta}{3} - \frac{8}{3} \cdot \sin^3 \frac{\theta}{3} \right] - \frac{B \cdot \varepsilon \cdot a}{b}. \quad (12)$$

При  $\theta = \frac{3\pi}{4} \Rightarrow y = -a; \varepsilon = \varepsilon_\sigma; \frac{B}{b} = 1$ .

Следовательно, можем записать как для плоской задачи

$$-a = -\frac{\varepsilon_\sigma \cdot a}{\pi} \cdot \left\{ \frac{2}{\pi} \left[ \ln \left| \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{6} \right) \right| + 2 \cdot \sin \frac{\theta}{3} - \frac{8}{3} \cdot \sin^3 \frac{\theta}{3} \right] + 1 \right\}. \quad (13)$$

Упростив выражение (13), получим

$$\varepsilon_\sigma = \frac{\pi}{2,71 + \pi}. \quad (14)$$

Далее найдем выражение для коэффициента бокового сжатия потока. Используем формулу К. Ф. Хи-мицкого [5], преобразовав ее для коэффициента бокового сжатия потока к виду

$$\varepsilon_\sigma = \frac{1}{1 + \sqrt{k \cdot \sin^2(\gamma\theta) \left[ 1 - \left( \frac{b}{B} \right)^2 \right]}}, \quad (15)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от величины бокового сжатия потока;  $\gamma$  — коэффициент, позволяющий привести в соответствие между собой углы наклона плоскостей истечения к потоку.

Для наклона вертикальной плоскости истечения под углом  $\beta = 3\pi/4$  корректив по отношению к плоско-стям бокового сжатия потока  $\gamma = 2/3$ .

В случае, когда угол  $\theta = 0^\circ$ ,  $\varepsilon_\sigma = 1$ . Если угол  $\theta = 3\pi/4$ ,  $\varepsilon_\sigma = b/B$ .

Найдем значение коэффициента  $k$  с учетом последнего условия:

$$\frac{b}{B} = \frac{1}{1 + \sqrt{k \cdot \sin^2 \left( \frac{2\theta}{3} \right) \left[ 1 - \left( \frac{b}{B} \right)^2 \right]}}; \quad (16)$$

$$k = \frac{1 - \frac{b}{B}}{\left( \frac{b}{B} \right)^2 \left( 1 + \frac{b}{B} \right)}.$$

Подставим выражение (16) в формулу (15) и получим

$$\varepsilon_\sigma = \frac{\frac{b}{B}}{\frac{b}{B} + \left( 1 - \frac{b}{B} \right) \sin(\gamma\theta)}.$$

Принимая во внимание, что для  $\beta = 3\pi/4$  имеем  $\gamma = 2/3$ , получим



$$\varepsilon_{\sigma} = \frac{\frac{b}{B}}{\frac{b}{B} + \left(1 - \frac{b}{B}\right) \sin\left(\frac{2\theta}{3}\right)}. \quad (17)$$

Таким образом, коэффициент сжатия потока, вытекающего из-под конического козырька, можно записать в виде

$$\varepsilon = \varepsilon_{\sigma} \varepsilon_{\sigma} = \frac{\pi}{2,71 + \pi} \cdot \frac{\frac{b}{B}}{\frac{b}{B} + \left(1 - \frac{b}{B}\right) \sin\left(\frac{2\theta}{3}\right)}. \quad (18)$$

С учетом (18) перепишем выражение (12) в виде

$$y = -\frac{a\pi}{2,71 + \pi} \cdot \frac{1}{\frac{b}{B} + \left(1 - \frac{b}{B}\right) \sin\left(\frac{2\theta}{3}\right)} \cdot \left\{ 2 \left[ \ln \left| \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{6} \right) \right| + 2 \sin \frac{\theta}{3} - \frac{8}{3} \sin^3 \frac{\theta}{3} \right] + 1 \right\}. \quad (19)$$

Уравнение (19) устанавливает связь между ординатой  $y$  и углом  $\theta$  наклона касательной кривой свободной поверхности к оси  $Ox$  при любом открытии  $a$  затвора.

Из уравнения (2) можно получить абсциссу  $x = f(\theta)$ , так как

$$dy/dx = \operatorname{tg} \theta. \quad (20)$$

Для дальнейшего решения необходимо продифференцировать выражение (2), записав его с учетом (11), (17) и (18)

$$y = -2 \frac{\varepsilon \cdot a \cdot B}{b} \cdot \frac{2}{3\pi} \int \sin \theta \cdot \operatorname{ctg} \frac{2\theta}{3} d\theta - \frac{\varepsilon \cdot a \cdot B}{b};$$

$$y = -\frac{a\pi}{2,71 + \pi} \cdot \frac{1}{\frac{b}{B} + \left(1 - \frac{b}{B}\right) \sin\left(\frac{2\theta}{3}\right)} \cdot \left[ \frac{4}{3\pi} \int \sin \theta \cdot \operatorname{ctg} \frac{2\theta}{3} d\theta + 1 \right]. \quad (21)$$

Введем обозначение

$$K = -\frac{a\pi}{2,71 + \pi} \cdot \frac{1}{\frac{b}{B} + \left(1 - \frac{b}{B}\right) \sin\left(\frac{2\theta}{3}\right)}; \quad (22)$$

$$y = K \cdot \frac{4}{3\pi} \int \sin \theta \cdot \operatorname{ctg} \frac{2\theta}{3} d\theta + K; \quad (23)$$

$$dy = \frac{4K}{3\pi} \sin \theta \cdot \operatorname{ctg} \frac{2\theta}{3} d\theta. \quad (24)$$

С учетом (20) запишем

$$dx = \frac{4K}{3\pi} \cos \theta \cdot \operatorname{ctg} \frac{2\theta}{3} d\theta. \quad (25)$$

Проинтегрируем (25)

$$x = \frac{4K}{3\pi} \int \cos \theta \cdot \operatorname{ctg} \frac{2\theta}{3} d\theta. \quad (26)$$

Упростим подынтегральное выражение в формуле (26) и получим

$$\cos \theta \cdot \operatorname{ctg} \frac{2\theta}{3} = \frac{1}{2 \sin \frac{\theta}{3}} - 3 \sin \frac{\theta}{3} + 4 \sin^3 \frac{\theta}{3}. \quad (27)$$

Проинтегрируем выражение (26) с учетом (27):

$$x = \frac{2K}{\pi} \left[ \ln \left| \operatorname{tg} \frac{\theta}{6} \right| - 2 \cos \frac{\theta}{3} + \frac{8}{3} \cos^3 \frac{\theta}{3} \right] - C'. \quad (28)$$

Подставим в (28) значение  $K$

$$x = -\frac{2a}{2,71 + \pi} \cdot \frac{1}{\frac{b}{B} + \left(1 - \frac{b}{B}\right) \sin \left(\frac{2\theta}{3}\right)} \cdot \left[ \ln \left| \operatorname{tg} \frac{\theta}{6} \right| - 2 \cos \frac{\theta}{3} + \frac{8}{3} \cos^3 \frac{\theta}{3} \right] - C'. \quad (29)$$

Постоянную величину  $C'$  найдем из условия  $x = 0$  при  $\theta = 3\pi/4$ . В этом случае

$$0 = -\frac{2a}{2,71 + \pi} \cdot \left[ \ln \left| \operatorname{tg} \frac{3\pi}{4 \cdot 6} \right| - 2 \cos \frac{3\pi}{4 \cdot 3} + \frac{8}{3} \cos^3 \frac{3\pi}{4 \cdot 3} \right] - C';$$

$$C' = \frac{2,71a}{2,71 + \pi}. \quad (30)$$

Система уравнений для определения координат кривой свободной поверхности потока при истечении из-под конического козырька с углом наклона к горизонту  $\beta = 3\pi/4$  будет иметь вид

$$\begin{cases} x = -\frac{2a}{2,71 + \pi} \cdot \frac{1}{\frac{b}{B} + \left(1 - \frac{b}{B}\right) \sin \left(\frac{2\theta}{3}\right)} \cdot \left[ \ln \left| \operatorname{tg} \frac{\theta}{6} \right| - 2 \cos \frac{\theta}{3} + \frac{8}{3} \cos^3 \frac{\theta}{3} \right] - \frac{2,71a}{2,71 + \pi}; \\ y = -\frac{a\pi}{2,71 + \pi} \cdot \frac{1}{\frac{b}{B} + \left(1 - \frac{b}{B}\right) \sin \left(\frac{2\theta}{3}\right)} \cdot \left\{ \frac{2}{\pi} \left[ \ln \left| \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{6} \right) \right| \right] + 2 \sin \frac{\theta}{3} - \frac{8}{3} \sin^3 \frac{\theta}{3} \right\} + 1 \end{cases}. \quad (31)$$

Таким образом, зная величину бокового сжатия потока  $b/B$  для конкретного стабилизатора и величину открытия затвора  $a$ , можем рассчитать координаты  $x$  и  $y$  свободной поверхности потока при истечении из-под конического козырька, задаваясь углом  $\theta$  от 0 до  $3\pi/4$ .

Построим кривые свободной поверхности при открытии затвора, равном единице и различной величине бокового сжатия потока  $b/B$  (рис. 4).

Для сравнения на рис. 4 показано положение экспериментальных кривых свободной поверхности потока, вытекающего из-под криволинейных козырьков с различной величиной бокового сжатия потока ( $b/B = 0,7; 0,8; 0,9$ ), полученных в результате модельных исследований.

Пользуясь теоретическими зависимостями (31), при определенной величине бокового сжатия  $b/B$  потока при истечении из-под конического козырька, максимальном открытии  $a_{\max}$  и расчетном значении напо-

Расчетные зависимости для определения параметров СРВКК

Зависимость	Ед. изм.	Название зависимости
$y = -\frac{\pi \cdot a_{\max}}{2,71 + \pi} \cdot \frac{1}{\frac{b}{B} + \left(1 - \frac{b}{B}\right) \sin\left(\frac{2\theta}{3}\right)} \cdot \left\{ \frac{2}{\pi} \left[ \ln \left  \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{6} \right) \right  + 2 \sin \frac{\theta}{3} - \frac{8}{3} \sin^3 \frac{\theta}{3} \right] + 1 \right\}$	м	Ордината свободной поверхности потока при истечении из-под конического козырька, $\beta = 3\pi/4$
$x = -\frac{2a_{\max}}{2,71 + \pi} \cdot \frac{1}{\frac{b}{B} + \left(1 - \frac{b}{B}\right) \sin\left(\frac{2\theta}{3}\right)} \cdot \left[ \ln \left  \operatorname{tg} \frac{\theta}{6} \right  - 2 \cos \frac{\theta}{3} + \frac{8}{3} \cos^3 \frac{\theta}{3} \right] - \frac{2,71 \cdot a_{\max}}{2,71 + \pi}$	м	Абсцисса свободной поверхности потока при истечении из-под конического козырька, $\beta = 3\pi/4$
$Q_1 = \varphi_1 \varepsilon_1 a_{\max} B \sqrt{2g(H_p - a_{\max} \varepsilon_1)}$ , где $\varphi_1 \varepsilon_1$ — коэффициенты скорости и сжатия конического козырька	м <sup>3</sup> /с	Расход истечения до перелива в коробчатую секцию
$Q_2 = \varphi_2 \varepsilon_2 a_1 b \sqrt{2g(H_p + \Delta H_1 - a_1 \varepsilon_2)}$ , где $\varphi_2 \varepsilon_2$ — коэффициенты скорости и сжатия плоского наклонного козырька	м <sup>3</sup> /с	Расход истечения после перелива в коробчатую секцию
$p = \left( 1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{H_p - a_{\max} \varepsilon_1}{H_p + \Delta H_1 - a_1 \varepsilon_2} \right) \cdot 100\%$	%	Точность стабилизации СРВКК в пределах одной секции
$n = \frac{1}{p} \left( \frac{1 - C''}{1 + C''} \right) \cdot 100$ , где $p$ — точность стабилизации водоподачи, $C''$ — коэффициент, определяемый по формуле $C'' = \varepsilon_1 \sqrt{\frac{1,85 H_p - a_{\max} \varepsilon_1}{H_p - a_{\max}}}$	шт.	Количество ступеней стабилизатора
$\beta_1 = \frac{3\beta}{4}$	—	Угол $\beta_1$ наклона внешнего козырька к горизонтальной плоскости
$\beta_2 = \frac{5\pi}{6} \dots \frac{11\pi}{12}$	—	Угол $\beta_2$ наклона внутреннего козырька к горизонтальной плоскости
$\frac{b}{B} = 0,7 \dots 0,85$	—	Величина бокового сжатия потока

ра  $H_p$  в верхнем бьефе сооружения можно легко рассчитать основные параметры стабилизатора СРВКК. Зная толщину  $t$  коробчатой секции затвора, конструктивно подбирается угол наклона внутреннего плоского козырька, а с помощью зависимостей (31) определяется открытие  $a_1$  внутренней поверхности стабилизатора при заданном напоре  $H_p = \Delta H_1$ , где  $\Delta H_1$  — приращение напора в пределах одной секции СРВКК. При расчетном и заданном значениях напора рассчитывается расход истечения до  $Q_1$  и после  $Q_2$  перелива в коробчатую секцию. Основные зависимости, необходимые для расчета СРВКК, представлены в таблице.

Расчетные зависимости, представленные в таблице, положены в основу методики расчета СРВКК. Для уточнения не показанных в таблице толщины  $t$  коробчатой секции затвора и величины угла наклона лицевой стенки к вертикальной плоскости предполагается проведение дополнительных гидравлических исследований модели стабилизатора.

Для подтверждения результатов теоретических исследований и проверки работоспособности предложенной конструкции гидравлического стабилизатора расхода воды были проведены гидравлические исследования действующей модели СРВКК в лаборатории гидротехнических сооружений (ГТС) кафедры ГТСиВР КРСУ. Модель СРВКК изготовлена на базе лаборатории ГТС кафедры ГТСиВР КРСУ. Линейный масштаб моделирования, исходя из размеров гидравлического лабораторного лотка (ГЛЛ), принят равным 1:3, что больше минимально допустимого, обеспечивающего автомодельность по Рейнольдсу [6]. Размеры лотка подводящего участка ГЛЛ прямоугольного сечения на модели составляют: ширина лотка 0,3 м, высота бортов 0,3 м, уклон дна 0,0008, что в масштабе соответствует размерам отводящего участка натурального канала (канал Джаламыш Сокулукского района Чуйской области Кыргызстана). Отводящий участок

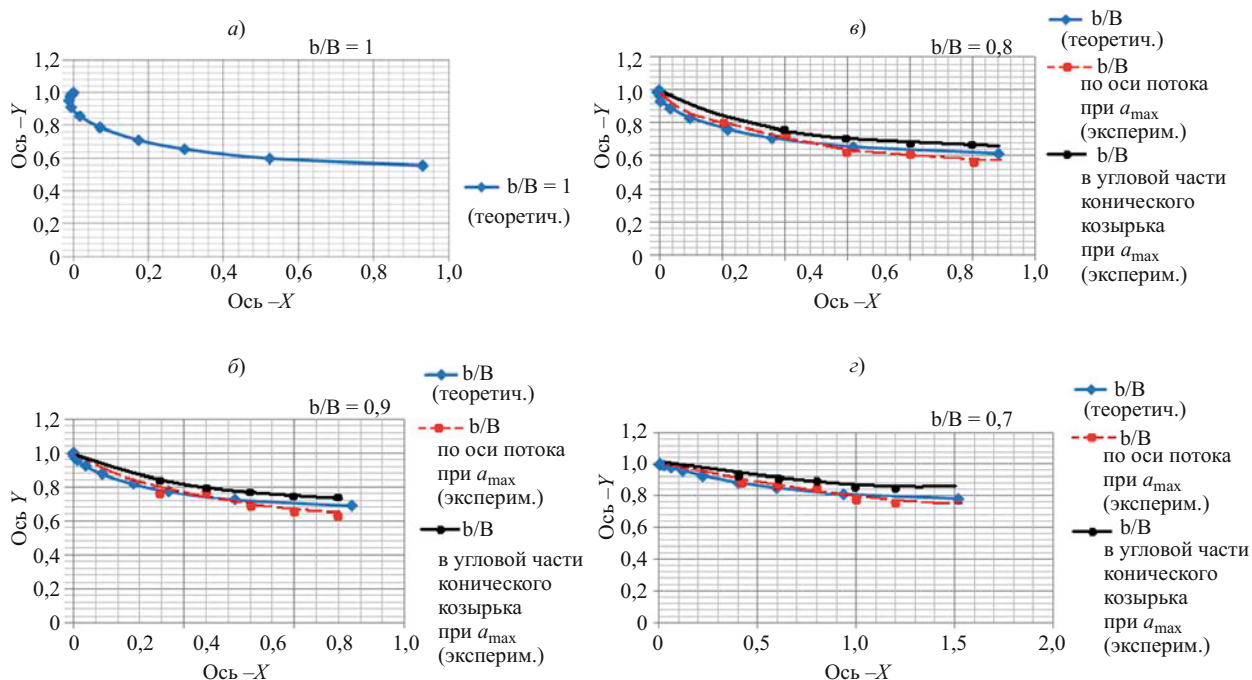


Рис. 4. Кривые свободной поверхности потока: а —  $b/B = 1$ ; б —  $b/B = 0,9$ ; в —  $b/B = 0,8$ ; г —  $b/B = 0,7$

модели имеет такие же геометрические размеры и форму сечения, как и подводящий. Модель СРВКК и сама лабораторная установка выполнены из металла (рис. 5).

Расходы воды на входе в гидравлический лабораторный лоток и на выходе из него измерялись с помощью прошедших метрологическую аттестацию в ПКТИ «Водавтоматика и метрология» треугольных мерных водосливов Томсона с углом выреза  $90^\circ$ . В основу статистической обработки экспериментальных данных для получения эмпирических зависимостей положен метод наименьших квадратов.

Обобщение опытных данных эксперимента предполагало вычерчивание кривых  $Q = f(H)$ , где  $Q$  — расход истечения,  $H$  — напор перед стабилизатором, и проверку возможности обеспечения стабилизации водоподачи СРВКК. В процессе модельных исследований необходимо было установить, изменяется ли отводимый расход воды в допустимых ( $\pm 5\%$ ) пределах при заданном открытии стабилизатора и колебаниях напоров перед стабилизатором в пределах  $H_{\min} \leq H \leq H_{\max}$ .

Обработка результатов лабораторных исследований модели СРВКК проводилась с использованием персональной ЭВМ.



Рис. 5. Гидравлические исследования модели СРВКК (момент начала перелива в нижнюю секцию короба)

По результатам проведенных модельных исследований были построены экспериментальные зависимости  $Q = f(H)$  (рис. 6), представленные на графике в относительных единицах. Анализ графических зависимостей (рис. 6) подтвердил работоспособность СРВКК в заданном диапазоне колебаний напоров перед стабилизатором  $H_{\max}/H_{\min} \leq 2,6$  и отводимых расходах  $Q = 0,1 \dots 1,0 \text{ м}^3/\text{с}$ ,

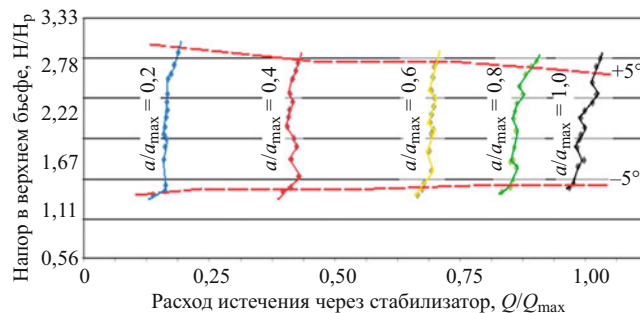


Рис. 6. Графические зависимости  $Q = f(H)$

что характерно для подавляющего большинства распределительных каналов оросительных систем Кыргызской Республики.

## Выводы

1. Построенные кривые (рис. 3) свободной поверхности потока истечения из-под конического ( $\beta = 3\pi/4$ ) козырька позволяют определить положение кромки внутреннего плоского наклонного козырька относительно кромки конического козырька СРВКК.

2. Кривые свободной поверхности потока при истечении из-под конического козырька показывают, что конструктивное выполнение соотношения длин кромок истечения конического и внутреннего плоского наклонного козырьков наиболее предпочтительно  $0,7 \leq b/B \leq 0,85$ , поскольку при  $b/B < 0,7$  наступает подтопление с нижнего бьефа конического козырька, что недопустимо в данной конструкции. При  $b/B > 0,85$  уменьшается диапазон регулирования стабилизатора.

3. Формализованные зависимости (31) являются универсальными и позволяют определять координаты свободной поверхности потока жидкости при истечении из-под наклонного козырька ( $\beta = 3\pi/4$ ) и наличии бокового сжатия потока на величину  $b/B$ .

4. Полученные расчетные зависимости (см. таблицу) положены в основу методики расчета усовершенствованного гидравлического стабилизатора расхода воды с коническим козырьком.

5. Гидравлический стабилизатор расхода воды с коническим козырьком позволяет обеспечить требуемое качество стабилизации отводимых расходов воды, работая в заданном диапазоне колебаний напоров перед сооружением и отводимых расходов воды.

## Список литературы

1. Атаманова О. В., Султаналиева Т., Ногойбаева К. Б. Пути совершенствования технических средств стабилизации водоподачи на открытых оросительных системах // Вестник КРСУ. 2010. Т. 10. № 2. С. 85 – 90.
2. Бочкарев Я. В., Атаманова О. В. Локальные системы стабилизации водоподачи на оросительных системах: Учеб. пособие. — Бишкек: КАА, 1997. 76 с.
3. Атаманова О. В. Совершенствование систем автоматизации водораспределения с использованием гидравлических стабилизаторов расходов воды. — Бишкек: Илим, 2002. 91 с.
4. Жуковский Н. Е. Собрание сочинений в 4-х т. — М.-Л.: Госиздат технико-теоретической литературы, 1949. Т. 2. 764 с.
5. Слисский С. М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. — М.: Энергия, 1979. 400 с.
6. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений. — Л.: Энергия, 1967. 235 с.

## Новости гидроэнергетики и гидротехники

### Строительство Богучанской ГЭС

В настоящее время на бетонной плотине Богучанской ГЭС завершаются строительные работы на секции № 30 – последней, которую предстоит достроить до проектной отметки гребня 214,0 м. Ранее на этой секции располагался строительный кран, и завершение работ стало возможно только после его демонтажа. Продолжается бетонирование донного отверстия временного водосброса в секции № 27, перекрытого в мае 2012 г. Полностью завершено строительство вспомогательного ступенчатого водосброса № 2. Подрядные организации ОАО “Объединенная энергостроительная корпорация” и ЗАО “Трансстрой Инжиниринговая корпорация”, занятые в возведении водосброса, разбирают опалубку и готовятся к сдаче объекта заказчику. За время строительства в водосброс № 2 уложено 386 тыс. м<sup>3</sup> бетона. В течение мая 2013 г. строители уложили 3899 м<sup>3</sup> бетона. Всего с начала строительства с апреля 1982 г. по май 2013 г. в бетонную плотину уложено 2,742 млн. м<sup>3</sup> бетона.

В середине мая начались монтажные работы на гидроагрегате № 9. Перед этим более месяца монтажники вели подготовку как на самом агрегате, где была завершена уборка и устранены строительные недоделки, так и на монтажной площадке, где велась укрупнительная сборка узлов агрегата. Всего в течение мая смонтировано 546 т гидросилового и гидромеханического оборудования.

Отделочные работы в здании машинного зала выполнены на площади 1018 м<sup>2</sup>, в здании служебно-производственного корпуса – на площади 2376 м<sup>2</sup>. Над секцией № 9 здания ГЭС выполнено 593 м<sup>2</sup> кровли.

Уровень Богучанского водохранилища в течение мая поднялся с отм. 185,25 м до отм. 188,08 м. Среднесуточная боковая приточность в течение месяца значительно изменялась и составляла от 710 до 4300 м<sup>3</sup>/сек. Сброс на Усть-Илимской ГЭС, расположенной выше по течению, увеличивался с 2700 до 3100 м<sup>3</sup>/сек. Пик паводка пришелся на первую половину месяца.

По данным на 20 мая 2013 г. Богучанская ГЭС выработала и поставила потребителям с начала месяца 165,50 млн. кВт·ч, с начала 2013 г. – 1221 млн. кВт·ч, с момента пуска в октябре 2012 г. – 1636 млн. кВт·ч. В связи с отсутствием разрешения Ростехнадзора на ввод оборудования схемы выдачи мощности 500 кВ гидроэлектростанция работает

только через сети 220 кВ. В работе одновременно могут находиться не более трех агрегатов.

В эксплуатации станции, строительных, отделочных и монтажных работах задействовано около 2500 работников ОАО “Богучанская ГЭС”, ЗАО “Организатор строительства Богучанской ГЭС” и подрядных организаций.

### Проектирование Верхне-Нарынского каскада

ОАО “Ленгидропроект” разработало технико-экономическое обоснование (ТЭО) проекта строительства Верхне-Нарынского каскада ГЭС в Киргизии и передало документацию заказчику. На заседании научно-технического совета ОАО “Ленгидропроект” разработанное ТЭО выбора площадок гидроузлов Верхне-Нарынского каскада было одобрено. Проектные работы велись в соответствии с договором с ЗАО “Верхне-Нарынские гидроэлектростанции”, заключенным в январе 2013 г. с ОАО “Ленгидропроект” как победителем открытого конкурса.

Верхне-Нарынский каскад ГЭС запланирован в верхнем течении р. Нарын в составе четырех гидроузлов: Акбулунской ГЭС и Нарынских ГЭС 1, 2, 3. В ходе работы над ТЭО определены места размещения гидроузлов, водно-энергетические характеристики каскада ГЭС, основные объемы строительно-монтажных работ, стоимость строительства. Оптимизация инженерных и технологических решений позволила увеличить установленную мощность каскада из четырех ГЭС до 237,7 МВт вместо фигурировавших в предварительных проработках 191 МВт, при среднегодовой выработке электроэнергии 942,4 млн. кВт·ч. Установленная мощность Акбулунской ГЭС составит 85,33 МВт, Нарынской ГЭС-1 – 47,14 МВт, ГЭС-2 – 46,84 МВт и ГЭС-3 – 55,42 МВт. Срок строительства каскада определен в 6 лет.

С целью минимального затопления земель на Верхне-Нарынском каскаде принята плотинно-деривационная компоновка гидроузлов. Часть напора будет создаваться плотиной высотой 15 – 20 м на Нарынских ГЭС 1, 2, 3 и до 75 м на Акбулунской ГЭС, а часть – деривационным каналом длиной от 2,5 км на Акбулунской ГЭС до 6 – 8 км на остальных ГЭС каскада.

Строительство Верхне-Нарынского каскада ГЭС в Киргизии предусмотрено Соглашением между Правительством Российской Федерации и Пра-

вительством Киргизской Республики, подписанным 20 сентября 2012 г. Для реализации проекта создано ЗАО “Верхне-Нарынские ГЭС” с паритетным распределением долей ОАО “РусГидро” и ОАО “Электрические станции” в уставном капитале. 27 октября 2012 г. состоялась торжественная церемония закладки памятного знака в месте строительства каскада с участием Президента Киргизии А. Атамбаева.

### **Восстановление Саяно-Шушенской ГЭС**

Выработка электроэнергии пятью новыми гидроагрегатами Саяно-Шушенской ГЭС (№ 1, 7, 8, 9 и 10) с 19 декабря 2011 г. – момента включения в сеть ГА № 1 – превысила 15 млрд. кВт·ч. За время эксплуатации отклонений контролируемых параметров от проектных значений не выявлено, все оборудование работает устойчиво и надежно.

Все новые гидроагрегаты станции участвуют в суточном регулировании нагрузки энергосистемы в соответствии с заданными диспетчерскими графиками. Такой режим работы предусмотрен в соответствии с соглашением между Саяно-Шушенской ГЭС и Объединенным диспетчерским управлением Сибири. Эти меры предоставили Системному оператору дополнительный источник покрытия пиковых нагрузок в Единой энергосистеме России и Сибири, тем самым повысив надежность ее работы.

ГА № 10 включен в сеть после реконструкции 4 марта 2013 г. Более чем за месяц эксплуатации отклонений контролируемых параметров не выявлено, агрегат работает устойчиво. В ходе реконструкции агрегата смонтированы новые турбина и генератор, элегазовый генераторный комплекс НЕС-8С, а также весь комплекс вспомогательного оборудования. Новый гидроагрегат оснащен современными системами автоматического управления и защит, а также стационарной системой вибрационно-го и теплового контроля. Оборудование гидроагрегата прошло все необходимые испытания, в которых участвовали специалисты завода-изготовителя – ОАО “Силовые машины”.

На данный момент основные работы ведутся в районе гидроагрегатов № 6 и 5, которые должны быть введены в эксплуатацию соответственно в июне и декабре 2013 г. В кратере ГА № 6 завершен монтаж основных узлов, продолжается монтаж трубопроводов охлаждения, системы технического водоснабжения и возбуждения гидрогенератора. В районе гидроагрегатов № 6 и 5 завершается монтаж балкона (металлической площадки), на котором располагаются щиты управления и защит. В кратере ГА № 5 продолжается обследование спиральной камеры и монтаж системы водяного охлаждения генератора, на монтажной площадке идет сборка ро-

тора генератора, продолжается сборка статора. Располагаемая мощность Саяно-Шушенской ГЭС в настоящее время составляет 3840 МВт (ГА № 1, 3, 7, 8, 9 и 10).

### **Строительство Загорской ГАЭС-2**

На Загорской ГАЭС-2 началось сооружение четвертого напорного водовода, длина которого около 800 м. Он состоит из 19 секций диаметром 7,5 м каждая. На данный момент монтажники ОАО “Трест Гидромонтаж” начали накатку звеньев. Это последний водовод ГАЭС-2. В 2012 г. построены и подготовлены к работе первый и второй водоводы, монтаж третьего завершен, ведется его бетонирование. Монтаж водовода – один из самых уникальных и трудоемких этапов строительства. В среднем он занимает около 12 месяцев.

На текущий момент строительная готовность сооружений Загорской ГАЭС-2 составляет 95 %. На станционном узле идет подготовка к укрупненной сборке и монтажу оборудования гидроагрегата № 3. Успешно завершились испытания железа статора агрегата. В ближайшее время начнется монтаж и испытания его обмотки. Продолжается строительство здания машинного зала и служебно-производственного комплекса. Ведется подготовка системы регулирования гидроагрегатов № 1 и 2. В апреле была разобрана временная перемычка и произведено наполнение нижнего бассейна.

### **Строительство Нижне-Бурейской ГЭС**

На Нижне-Бурейской ГЭС начата укладка бетона в основные сооружения гидроузла. К работам приступили в том месте, где в августе 2010 г. в присутствии бывшего премьер-министра России Владимира Владимировича Путина был уложен первый кубометр бетона в тело плотины. Начало бетонирования плотины знаменует собой переход строительства от подготовительного этапа к широкомасштабному развороту работ по сооружению электростанции. Нижне-Бурейская ГЭС будет обеспечивать энергоснабжение нефтепровода “Восточная Сибирь – Тихий океан”, нового космодрома “Свободный”, перспективных горнодобывающих проектов в Амурской области. Строительство ГЭС включено в Государственную программу “Социально-экономическое развитие Дальнего Востока и Байкальского региона”.

В настоящее время ведется бетонирование глухой правобережной плотины. При подготовке скального основания с целью предотвращения образования трещин вместо традиционных буровзрывных работ был применен метод канатного пиления. Бетонный завод, ранее выпускавший глинобетонную смесь для изготовления противофильтра-

ционной “стены в грунте”, перепрофилирован на выпуск бетона. В русле реки ниже по течению идет расчистка бара, образовавшегося во время пропуска паводка 2012 г. В полном объеме бетонные работы по строительству основных сооружений гидроэлектростанции будут развернуты с июня 2013 г., после полного осушения котлована. Всего в этом году планируется уложить 88,3 тыс. м<sup>3</sup> бетона и железобетона.

### Модернизация Саратовской ГЭС

На Саратовской ГЭС завершена реконструкция гидрогенератора № 4. Обновленная машина введена в эксплуатацию 29 апреля после успешного 72-часового комплексного опробования. Это 19-й по счету гидроагрегат, на котором произведена реконструкция гидрогенератора. Работы длились 10 месяцев, в течение которых специалисты станции и подрядных организаций произвели масштабную модернизацию генератора. Проведена замена активного железа статора и его обмотки. Новая обмотка имеет современную терморезистивную изоляцию, обладающую повышенной влагостойкостью, термостойкостью и механической прочностью. Заменены на новые катушки полюсов ротора, несущие узлы подпятника. На агрегате установлена со-

временная система автоматизированного управления, которая повышает качество регулирования его режимов, позволяет проводить дополнительный подробный анализ состояния турбины и генератора.

Всего на ГЭС установлено 24 гидроагрегата, в том числе 21 вертикальный мощностью 60 МВт, 2 горизонтально-капсульных, после завершения реконструкции которых мощность составит 54 МВт, и гидроагрегат рыбоподъемника мощностью 9 МВт. По своим габаритам диаметр рабочего колеса турбины составляет 10,3 м, вертикальные гидроагрегаты Саратовской ГЭС являются крупнейшими в России. На данный момент генераторы Саратовской ГЭС отработали уже более 30 лет. После реконструкции мощность каждого гидроагрегата увеличится с 60 до 66 МВт.

На Саратовской ГЭС готовятся к замене турбин. В соответствии с договором, подписанным с компанией “Voith Hydro”, предусматривается замена 21 гидротурбины, а также гидроагрегата рыбоподъемника. В настоящее время на заводе-производителе ведется изготовление первой новой гидротурбины, которую планируется смонтировать на гидроагрегате № 10. Отлита втулка рабочего колеса и часть лопастей, ведется их механическая обработка.

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

---

Сдано в набор 17.04.2013. Подписано в печать 19.06.2013. Формат 60×84 1/8.

Печать офсетная. Печ. л. 7,0. 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”

---