

**Открытое акционерное общество  
«Федеральная гидрогенерирующая компания»  
(ПАО «РусГидро»)**

**Акционерное общество  
«Научно-исследовательский институт энергетических сооружений»  
(АО «НИИЭС»)**

# **БЕЗОПАСНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

**ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ СБОРНИК**

**№2 (20)**

**Москва  
2015**

УДК 621.311, 624.9, 550.8

Председатель редакционного совета к. т. н. Ю.Б. Шполянский  
Научный редактор к. т. н. И.В. Семенов

**Безопасность энергетических сооружений.** // Научно-технический и производственный сборник. №2 (19). М.: АО «НИИЭС», 2015.

**Учредитель и издатель:** АО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений»

**Сборник зарегистрирован** в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации:

Председатель редакционного совета — *к. т. н. Ю.Б. Шполянский*

Научный редактор — *к. т. н. И.В. Семенов*

Выпускающий редактор — *А.Г. Мелихова*

Графический редактор — *В.И. Лукьянов*

Корректор — *Е.Б. Полякова*

**Корректоры:** верстка и дизайн: *Мелихова А.Г.*

125362, Москва, а/я 393, Строительный проезд, д. 7а

Телефон: (499) 493 51 32, (499)497-21-51

Факс: (499) 363 56 51

E-mail: [press@niies.ru](mailto:press@niies.ru)

Подписано в печать 25.09.2015 г.

Формат 60x90 1/16

Бумагаофс. №1. Печать офсетная

Объем 6,5 п.л. Тираж 500 экз.

Отпечатано в типографии ООО «Галея Принт»

г. Москва 5-я кабельная ул., 2-б

© АО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений», 2015

**РАЗДЕЛ 1. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
ГИДРОТУРБИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГЭС**

**КОНСТРУКТИВНО-ОБУСЛОВЛЕННЫЕ НОРМЫ ПРОТЕЧЕК  
ТУРБИННОГО МАСЛА В ПРОТОЧНЫЙ ТРАКТ  
ГИДРОАГРЕГАТОВ ГЭС**

*Иванченко И.П., кандидат техн. наук,  
Пуцын Н.В., инженер (ОАО «НПО ЦКТИ» ),  
Мулин И.Б., кандидат филос. наук (АО «НИИЭС» )*

Гидроэнергетика является наиболее экологически благополучной составляющей энергетической отрасли. Одним из немногих источников загрязнения являются протечки масла в воду, проходящую через турбины ГЭС. Главным образом протечки происходят через уплотнение фланцев лопастей поворотно-лопастных турбин. Анализ конструктивных схем механизма поворота лопастей показал, что, несмотря на их большое разнообразие, они имеют общий недостаток – наличие масла под давлением в корпусе рабочего колеса.

Механизм появления протечек масла следующий. Уплотнение от протечек масла устанавливается на цилиндрических поверхностях фланцев лопастей на большом диаметре. В результате износа бронзовых втулок появляется зазор между корпусом и фланцем лопасти, что нарушает работу уплотнения и приводит к вытеканию масла в воду. Особенно часто выходят из строя уплотнения лопастей турбин, работающих в режиме регулирования частоты в системе (с частыми перестановками лопастей). Анализ конструкций уплотнений не выявил решений, гарантированно исключающих протечки масла.

Масштабы протечек масла зависят от конструкции и технического состояния рабочего колеса. В 50 – 60-е годы прошлого века среднегодовые протечки на крупных ГЭС достигали 30 т на исправных агрегатах или  $13 \div 20\%$  от общего объема масла в турбине. Сегодня эти цифры значительно ниже.

По нормативным документам, действовавшим с начала 2000-х гг., протечки масла в воду считались недопустимыми. Однако, несмотря на техническое перевооружение ГЭС, проводимое эксплуатирующими организациями, сегодня на гидроэлектростанциях России используется значительное число поворотно-лопастных гидротурбин «старых» конструкций, допускающих попадание масла в проточный тракт при нормальной эксплуатации. В связи с этим была поставлена задача разработки технически обоснованных ненулевых норм потерь масла при эксплуатации поворотно-лопастных турбин.

В ходе работы была изучена история вопроса (см. табл. 1). Первые регламентирующие требования по протечкам масла через уплотнения фланцев лопастей ПЛ-турбин были изложены в книге Я.Ф.Фитермана «Монтаж и ремонт гидротурбин», изданной в 1961 г. Они построены на опыте ЛМЗ по созданию поворотно-лопастных рабочих колес и являются самым ранним вариантом норм. Допустимые нормы технологических протечек даны в зависимости от диаметра рабочего колеса: с увеличением диаметра колеса принимается большая величина протечек. Эти нормы до последнего времени использовались в практике Сызранского турбинного завода.

Приведенные в технической документации самого ЛМЗ допустимые нормы по протечкам масла немного выше, чем в книге Я.Ф. Фитермана. Их разработка приходилась на 1964 г. Но ссылка завода на эти нормы имеется даже через 13 лет (1977 год), когда уже работали экологически чистые рабочие колеса Чебоксарской и Нижне-Камской ГЭС (ТУ108.01.015-77).

Другие нормативные документы 70-х годов прошлого века задают нормы, близкие к нормам ЛМЗ.

Нормативные документы, полностью исключаящие протечки масла в системе регулирования, появились после 2000 года. По мнению авторов, они не должны распространяться на созданные в советские годы гидротурбины, так как

их проектирование велось на совершенно иной нормативной базе с использованием других конструкционных материалов, чем в настоящее время.

Для нормирования допустимых протечек масла в ПЛ-турбинах старой конструкции предлагается применять нормативы, разработанные в советские годы. В качестве источника таких нормативом авторами была принята «Инструкция по ремонту гидротурбин и механической части генераторов» (РД34.31.602), выпущенная в 1970 г. Главэнергоремонт, т.к. эта инструкция была обязательна для всех организаций Минэнерго, а значения нормативов, приведенных в ней (табл. 2), близки аналогичным значениям в других источниках того времени.

Таблица 2

*Допустимые протечки масла через уплотнения одной лопасти поворотно-лопастной турбины в соответствии с РД34.31.602.*

Диаметр рабочего колеса, мм	Объем протечек через уплотнения 1 лопасти, л/сутки
< 3000	0,10
3000÷5000	0,15
5000÷7200	0,18
7200÷9300	0,20
≥ 9300	0,25

Для расчета нормы потерь нефтепродуктов  $N$  на гидротурбину за год (в тоннах/год) предлагается использовать формулу:

$$N = \frac{365 \cdot N_{л} \cdot z_{р.к.} \cdot \rho_{м}}{1000}, \quad (1)$$

где  $N_{л}$  — норма протечки масла через уплотнения одной лопасти гидротурбины в соответствии с табл. 2, л/сутки;  $z_{р.к.}$  — количество лопастей гидротурбины, шт.;  $\rho_{м}$  — плотность масла, используемого в гидротурбине, принимаемая равной 0,9 кг/л.

Рассчитанные таким образом нормы технологических протечек масла для турбин одной из крупных российских ГЭС представлены в табл.3. В таблице также указаны потери масла по эксплуатационным данным ГЭС за 2009 ÷ 2012 гг. В таблице выделены значения протечек масла, не превышающие технологический норматив.

Таблица 1

**Нормативные документы, регламентирующие допустимые протечки масла через уплотнения лопастей поворотно-лопастной турбины**

№	Год издания	Источник	Разработчик (автор)	Номы протечек через уплотнения лопастей ПЛ-турбины		При
				Диаметр рабочего колеса, мм	Объем протечек через уплотнения 1 лопасти, л/сут	
1	1961	Монтаж и ремонт гидротурбин (книга)	Фитерман Я.Ф. Государственное энергетическое издательство	1800÷3000	0,08	Испол практи
				3000÷6000	0,12	
				6000÷10000	0,15	
2	1964	Технические условия на сборку и балансировку рабочих колес поворотно-лопастных турбин №1394	ЛМЗ	1800÷3000	0,1	Испол практи
				3000÷6000	0,15	
				6000÷10000	0,2	
3	1970	РД 34.31.602 (СО 153-34.31.602) Инструкция по ремонту гидротурбин и механической части генераторов	Главэнергоремонт	≤3000	0,10	Для все заций 1 го, вып капита монты
				3000÷5000	0,15	
				5000÷7200	0,18	
				7200÷9300	0,20	
				≤9300	0,25	
4	1972	Уплотнения в гидротурбинах (книга)	Зубков И.А.	≥3000	0,10	Испол практи
				3000÷5000	0,15	
				5000÷7200	0,18	
				≥7200	0,20	

1	2	3	4	5	6
5	1977	ТУ 108.01.015-77 Турбина гидравлическая вертикальная поворотной лопастной для Нижнекамской и Чебоксарской ГЭС	ЛМЗ	6000÷10000	0,2
6	1987	УДК 621.315.615.2.(083.74) Индивидуальные нормы расхода турбинного масла на ремонтные и эксплуатационные нужды для гидроагрегатов	ПО по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей «Союзтехэнерго»	1÷5 5,1÷20 20,1÷40 40,1÷85 85,1÷220	0,7 1,58 1,99 2,38 2,67
7	2003	РД 153-34.2-31.401-2002 Типовые технические требования к гидротурбинному оборудованию, поставляемому заводами-изготовителями на ГЭС	ОРГЭС	Протечки масла через уплотнения лопастей не допускаются	Требов завода: изготол
8	2006	СТО 17330282.27.140.001-2006 Методики оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций.	НП Гидроэнергетика России	Протечки масла через уплотнения лопастей не допускаются	Требов службе экспл. ГЭС

**Данные по протечкам  
через лопасти турбин крупной ГЭС**

Диаметр рабочего колеса, D <sub>1</sub> , м	Количество лопастей, Z <sub>лоп</sub>	Норма на протечки масла через РК, т/год	Номер агрегата	Год пуска агрегата	Фактический объем потерь турбинного масла, т/год			
					2009 год	2010 год	2011 год	2012 год
9,0	4	0,263	1	1955	0,362	0,380	0,544	0,123
			2	1955	0,561	0,231	0,726	1,566
			3	1955	0,427	0,306	0,488	0,175
			4	1955	0,519	0,392	0,385	0,177
			5	1956	0,463	0,214	0,224	0,150
			6	1956	0,451	0,479	0,484	0,749
			7	1956	0,475	0,118	0,632	0,150
			8	1956	0,442	0,607	0,302	0,139

Броосается в глаза, что созданные в советское время рабочие колеса сегодня работают на порядок с меньшими потерями масла, чем 50 лет назад. По нашему мнению, это связано с надлежащим контролем за состоянием уплотнений, осуществляемым эксплуатирующими организациями, позволяющим снизить величину протечек масла до конструктивно обусловленного минимума.

Как видим, протечки масла укладываются или близки к нормативному допуску. Это свидетельствует, что технологические нормы протечек масла для ПЛ-турбин старого выпуска вполне технически обоснованы и при надлежащей культуре эксплуатации выполнимы.

Технологические нормы протечек масла были использованы при разработке предварительного национального стандарта «Охрана окружающей среды. Нормы потерь нефтепродуктов гидротурбинного оборудования в процессе эксплуатации. Метод расчета потерь турбинного масла в процессе эксплуатации гидротурбинного оборудования», введенного в действие с 01.01.2015 г.



## **ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВЫХ ТИПОВ ТУРБИННЫХ МАСЕЛ В ДЕЙСТВУЮЩИХ ГИДРОАГРЕГАТАХ**

*Иванченко И.П., кандидат техн.наук,  
Пуцын Н.В., инженер (ОАО «НПО ЦКТИ» ),  
Мулин И.Б., кандидат филос. наук (АО «НИИЭС» )*

В системах регулирования, а также в узлах трения отечественных гидротурбин долгие годы применяется минеральное турбинное масло Тп-30. В последнее время на рынке появляются новые марки турбинных масел, как отечественных, так и зарубежных производителей. Эти масла отличаются некоторыми улучшенными характеристиками, которые влияют на следующие рассмотренные критерии:

увеличение интервала замены масла и снижение затрат на его эксплуатацию за счет использования масел с повышенным сроком службы;

снижение негативного воздействия ГЭС на окружающую среду;

повышение к.п.д. турбины за счет использования масел с пониженной вязкостью.

Рассмотрим каждый из этих критериев в отдельности.

Срок службы масла определяется его качеством и температурным режимом работы. Рабочие температуры в узлах гидравлической турбины редко превышают 50°C, а в отдельных нагруженных узлах (сегменты подпятника) 70 – 80°C, это объясняет достаточно продолжительный срок службы масла. Исходя из многолетней практики, срок эксплуатации турбинного масла составляет 12 – 15 тысяч рабочих часов, а при надлежащем уходе и установленной оптимальной периодичности регенерации масла он может превысить 10 лет.

Среди разнообразных сортов турбинного масла на российском рынке особо выделяются следующие, уже работающие в отечественных гидротурбинах масла:

Тп-30, производимое по ГОСТ 9972-74 практически всеми нефтеперерабатывающими компаниями;

«Торнадо Т46», производимое российской компанией «ЛУКОЙЛ» и являющееся улучшенным аналогом масла Тп-30;

минеральное масло «Turbo T46», производимое по синтетической технологии зарубежной компанией «Shell».

Кислотная стабильность масла «Торнадо Т46» по международному стандарту ASTM D 943 составляет 3500 часов, в то время как кислотная стабильность масла Тп-30, по информации технического отдела «Лукойла», составляет 2000 часов. Кислотная стабильность масла «Turbo T46» по данным производителя — 10000 ч.

Срок службы масла Тп-30 с периодической регенерацией составляет 15 тысяч часов. Исходя из принимаемой линейной зависимости срока службы масла от его стабильности, срок службы масла «Торнадо Т46» составит 26,5 тысяч часов, срок службы масла «Turbo T46» составит 75 тысяч часов.

Для экономического расчета была выбрана одна из крупных ГЭС, оснащенная 8 поворотно-лопастными турбинами. Эксплуатационный период работы масла был выбран 75 тысяч часов. Оценка стоимости восполнения протечек масла через лопасти турбин проводилась на основании сведений о протечках за период эксплуатации с 2009 г. по 2012 г. с условием, что в дальнейшем объем протечек остается на том же уровне. Расчетные данные стоимости эксплуатации масел приведены в табл. 1, а диаграмма эксплуатации — на рис. 1.

Таким образом, стоимость использования улучшенного турбинного масла «Торнадо Т46» за период 75 тыс. часов оказалась на 67,5% выше, чем традиционного масла Тп-30. Стоимость же эксплуатации турбин на зарубежном масле «Turbo T46» дешевле эксплуатации масла Тп-30 на 47,3%.

Аналогичный анализ по той же методике был проведен для других действующих ГЭС, оснащенных как РО-турбинами, так и ПЛ-турбинами. Из этого анализа можно сделать общий вывод, что применение улучшенного масла «Торнадо Т46» дороже эксплуатации Тп-30 в среднем на 70 – 80% за счет высокой стоимости. Применение зарубежного масла Shell «Turbo T46» может дать потенциальную экономию в стоимости в среднем на 40 – 50% по сравнению с Тп-30.

Рассмотрим эксплуатацию турбинного масла с позиции снижения вредного влияния на экологию окружающей среды. Турбинное масло, используемое в поворотно-лопастных

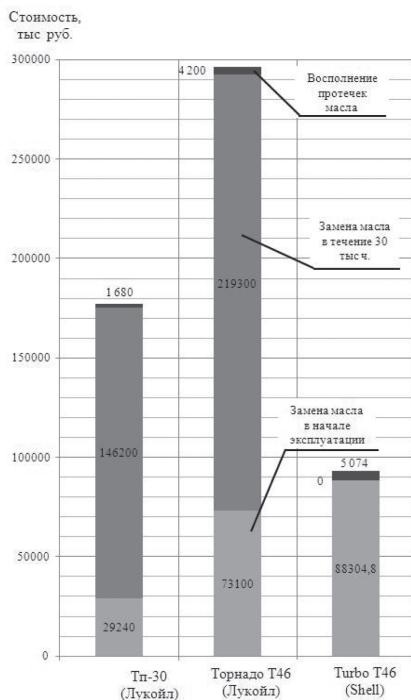
Таблица 1

Оценка стоимости эксплуатации масла на ГЭС

№ п/п	Позиция	Марки масел		
		Тп-30 (пр-во Лукойл)	Торнадо Т46 (пр-во Лукойл)	Turbo T46 (пр-во Shell)
<b>Стоимость заливки нового масла</b>				
1	Количество агрегатов, шт	8		
2	Объем масляной системы агрегата, т	73,1		
3	Стоимость 1 тонны нового масла, тыс. руб.	50	125	151
	<b>ИТОГО, тыс. руб.</b>	29240	73100	88305
<b>Эксплуатационные замены масла в течение рассматриваемого периода</b>				
4	Срок службы масла, ч	15000	26250	75000
5	Количество замен масла в течение периода 75 тыс. ч.	5	3	0
6	Общий объем меняемого масла за период 75 тыс. ч., т	366	219	0
7	Объем утечек за период 75 тыс. ч., т	33,6		
8	Стоимость эксплуатационной замены масла, тыс. руб.	146200	219300	0
9	Стоимость восполнения утечек масла, тыс. руб.	1680	4200	5074
	<b>ИТОГО, тыс. руб.</b>	<b>177120</b>	<b>296600</b>	<b>93378</b>

гидроагрегатах, периодически протекает через уплотнения лопастей в нижний бьеф, одновременно с этим присутствует процесс испарения масла из МНУ и вспомогательного оборудования. Эти процессы в настоящее время фиксируются, и ГЭС производят соответствующие выплаты.

Согласно действующему законодательству, величины испарения масла учитываются в соответствии с методическими указаниями [1], позволяющими рассчитать объем испарений масла за год. Формула расчета имеет эмпирический характер. В нее включен ряд опытных коэффициентов, принимаемых исходя из климатической зоны. Единственным показателем, относящимся непосредственно к ГЭС, является объем ее МНУ. Для расчета максимальных объемов испаренного масла из таб-



**Рис. 1.** Сравнительная диаграмма стоимости эксплуатации масел Тп-30 (Лукойл), «Торнадо Т46» (Лукойл) и «TurboТ46» (Shell)

лиц методики были выбраны максимальные коэффициенты. Расчеты для ряда крупных ГЭС показали, что учитываемое испарение масла в гидротурбинах не превышает 0,01% от общего объема масла в маслосистеме агрегата и ГЭС в целом. Таким образом, задача их фактического сокращения путем подбора марки масла с пониженной испаряемостью не является достаточно актуальной в виду незначительности объемов самих выбросов, а также невозможности учета такого сокращения с помощью принятой методики.

Протечки масла через уплотнения лопастей рабочих колес имеют несравнимо большие объемы. Как показал опыт эксплуатации, протечки масла были значительными практически на всех поворотно-лопастных турбинах. Так в 1950-е годы долив масла на Жигулевской ГЭС колебался от минимального — 2,2 т (агрегат 18) до максимального — 20,0 т (агрегат

1). При неисправных уплотнениях долив масла достигал на отдельных машинах 6 т в сутки. Такое положение дел с протечками масла в нижний бьеф в 50<sup>ые</sup> ч 60<sup>ые</sup> годы прошлого века имело место и на других крупных ГЭС [2], так как со стороны надзорных органов не было жестких экологических требований к работе поворотного-лопастных гидротурбин.

Сегодня мировое гидротурбостроение в борьбе с протечками масла в воду ориентируется на совершенствование конструкций уплотнений фланцев лопастей и создание экологически чистых рабочих колес, не содержащих масла в корпусе колеса. Применение биологически разлагаемых масел может рассматриваться как альтернатива указанным техническим решениям. В последние годы ряд зарубежных ГЭС начал переход на эксплуатацию оборудования на этом виде масла.

Под биоразлагаемостью масла понимают способность природных микроорганизмов переработать смазочный материал в конечные продукты, которые были бы безопасны для окружающей среды. К биоразлагаемым относят масла с разлагаемостью не менее 60% (у Тп-30 данный показатель не превышает 35%). Считается, что попадание биоразлагаемого масла в воду не наносит существенного вреда окружающей среде, его утечки не попадают под штрафные санкции.

Биологически разлагаемые масла могут иметь растительное происхождение или создаваться на основе синтетических масел.

Растительные масла производятся из сельскохозяйственных материалов, например, рапсового или подсолнечного масел. Такие масла обеспечивают низкий коэффициент трения, обладают противоизносными свойствами, превосходящими свойства минеральных масел. Однако возможность их применения ограничена из-за низкой окислительной стабильности. По этой причине применение растительных масел в гидротурбинах нецелесообразно, так как окислительная стабильность масла в присутствии воды является ключевым показателем, определяющим надежность работы подшипниковых узлов и, как следствие, турбины в целом.

Наиболее перспективными являются биологически разлагаемые масла на синтетической основе. Этот вид масел химически синтезируется из органических углеродов с введением

различных присадок, что несколько снижает биоразлагаемость такого масла. По окислительной стабильности подобные масла в 20 и более раз превосходят растительные.

Использование биологически разлагаемого масла в гидротехнике находится в начальной стадии и сдерживается его высокой стоимостью по сравнению с применяемыми сегодня минеральными маслами: биологически разлагаемые масла на синтетической основе стоят сегодня на порядок дороже, чем минеральные. Однако общая тенденция перехода гидротурбин на биологически разлагаемые масла является прогрессивной, подтверждением чему служит зарубежный опыт. В России биоразлагаемые масла в гидротурбинах не используются, хотя работы по созданию экологически чистых рабочих колес ведутся уже более 30 лет.

Сроки начала широкого использования биологически разлагаемых масел в гидротурбинах определяются соотношением штрафов за сброс минерального масла в воду рек и стоимостью биологически разлагаемого масла. Превышение размеров штрафов стоимости использования биоразлагаемого масла определит сроки начала перевода турбин на такие масла. В этой связи для крупных ГЭС может быть целесообразен перевод на биоразлагаемые масла только гидроагрегатов с поворотно-лопастными турбинами, допускающими потери масла в проточный тракт.

По прогнозу авторов, перевод ПЛ-гидротурбин с минерального масла на биологически разлагаемое может стать экономически целесообразным в период между 2030 годом (оптимистичный вариант) и 2040 годом (пессимистичный вариант). К этому времени желательно получить отечественный опыт эксплуатации гидротурбин с биоразлагаемыми маслами.

Что касается повышения к.п.д. гидроагрегата за счет использования масел с пониженной вязкостью, такие расчетные работы проводились в нашей стране ранее, но желаемого эффекта не было выявлено.

Вязкость определяет потери в опорных узлах на трение в масляном слое и является основной эксплуатационной характеристикой масла, от которой зависит режим работы опорных узлов гидротурбины и системы ее регулирования.

Следует заметить, что оценить влияние вязкости на к.п.д. натурной турбины опытным путем весьма сложно, так как точность замера к.п.д. составляет 2%. Расчетным путем также не удастся оценить изменение к.п.д. в зависимости от вязкости масла, так как отсутствуют апробированные расчетные схемы, подкрепленные экспериментальными результатами.

Вязкость современных марок масел принципиально не отличается от созданного ранее Тп-30: практически все турбинные масла обладают вязкостью 43 – 46 мм<sup>2</sup>/с, поэтому с этой точки зрения выбор более текучего масла не принесет видимого повышения к.п.д. агрегата, однако в свою очередь может значительно снизить надежность оборудования.

Следует заметить, что в подпятниках турбин масло исполняет роль не только смазки, но и способствует охлаждению сегментов подпятника. От вязкости турбинного масла зависит и его теплоемкость. В процессе эксплуатации в подпятниках, где наблюдается самый «высокотемпературный» режим (около 60 – 70°С) более вязкое масло препятствует также чрезмерному нагреву сегментов подпятников. Известно, что превышение рабочей температуры сегментов на 10° – 20°С, значительно снижает надежность оборудования.

Таким образом, повышение к.п.д. турбины за счет использования масел с пониженной вязкостью представляется мало достижимым, так как по параметру «вязкость» современные масла мало отличаются между собой и не имеют преимуществ по сравнению с традиционно применяемым маслом Тп-30.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Методические** указания по определению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу из резервуаров, утверждены Приказом Госкомэкология РФ №199 от 08.04.1998 г.
2. **Бабанов О.С.** Создание рабочего колеса поворотной-лопастной гидротурбины с изолированной зоной сервомотора. Автореферат. – Л., 1983

## РАЗДЕЛ 2 . БЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ ГИДРОУЗЛОВ И РУСЕЛ РЕК

### КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ МЕТОДИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО КОНТРОЛЮ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОХОДНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

*Мельник Г.В. (ОАО «Гипроречтранс»)*

15 апреля 2011 г. введены в действие «Методические рекомендации по контролю технического состояния и оценке безопасности судоходных гидротехнических сооружений» (далее по тексту МР), утвержденные Федеральным агентством морского и речного транспорта и согласованные Росстраницнадзором. Основные результаты, использованные при составлении «Методических рекомендаций», получены в ходе работы, выполненной ОАО «Гипроречтранс» в рамках государственного контракта № 09-1353 от 31.03.2003 г. [1].

Формат публикации не позволяет отразить все положения, использованные при разработке МР, изложить алгоритм контроля технического состояния и оценки безопасности судоходных гидротехнических сооружений (далее по тексту СГТС), используемый в МР, ответить на все вопросы, которые возникли в ходе применения этого документа. Полагаю, что читатель знаком с текстом МР и ранее действовавших «Методических рекомендаций по оценке технического состояния и уровня безопасности СГТС». Кроме того, основной алгоритм МР и ответы на дискуссионные вопросы читатель может найти в журнале «Гидротехника» (№4/25, 2011 г.,



№№ 1/26, 2/27, 3/28, 2012 г.) и отраслевых сборниках. Здесь я остановлюсь только на некоторых концептуальных положениях и наиболее дискуссионных моментах.

В настоящее время существуют несколько направлений оценки безопасности гидротехнических сооружений, которые нашли отражение в нормах АО «НИИЭС», Ростехнадзора, ФГУП «НИИ ВОДГЕО», ВНИИГ им. Веденеева.

Не вдаваясь в детали, отмечу, что в нормах АО «НИИЭС» по заявлению их разработчиков используется метод, рекомендованный Международной комиссией по большим плотинам (ICOLD). При этом для решения задачи свертки векторного критерия в скалярный предлагается формула, применение и вывод которой обосновываются ссылкой на использование теории нечетких множеств и соотношения, применяемые при вычислении значений «функций принадлежности» для суммы нечетких множеств.

Методики Ростехнадзора широко используют методы свертки векторного критерия в скалярный.

Методические рекомендации ФГУП «НИИ ВОДГЕО» используют подход, близкий к концепции ОАО «НИИЭС», однако методическая база ближе методам Ростехнадзора.

Концепция оценки безопасности ВНИИГ им. Веденеева исповедует использование методов теории надежности, которые, правда, судя по приводимым в большинстве публикаций примерам, сводятся к обычным вероятностным расчетам с использованием априорно заданных функций распределения и значений вероятности отказов.

Таким образом, перечисленные нормы имеют принципиальные отличия, поскольку в них применены различные концепции оценки безопасности. В противоположность нормам ВНИИГ им. Веденеева нормы указанных выше трех организаций условно можно объединить в одну группу, так как по большей части они абстрагируются от вероятностных расчетов или, по крайней мере, не используют частотное определение вероятности. Для них характерно использование балльных шкал и качественных оценок.

Со своей стороны специалисты ОАО «Гипроречтранс» придерживаются мнения о несовместимости вероятностных

расчетов с решением задач оценки безопасности гидротехнических сооружений. При этом основные возражения заключаются в следующем.

Из классического курса теории вероятностей известно, что теория вероятности изучает лишь такие случайные события, в отношении которых не только имеет смысл утверждение об их случайности, но и возможна объективная оценка доли случаев их появления. Это означает, что:

1. Теория вероятностей ограничивается изучением лишь тех событий, которые могут быть осуществлены неограниченное число раз, притом в неизменных условиях.

2. Теория вероятностей занимается лишь теми событиями, которые обладают устойчивостью частот. То есть при большом числе осуществления изучаемого события его частота близка к постоянной и лишь слегка изменяется от одной серии к другой.

3. Из первых двух требований следует, что теория вероятностей не занимается изучением уникальных событий, которые не допускают повторений и не могут быть воспроизведены в неизменных условиях, а также не обладают устойчивостью частот их появления.

Последнее утверждение полностью характеризует специфику гидротехнических объектов, которые, несомненно, относятся к классу уникальных, и определяет ограничения на применение методов теории вероятности при оценке их безопасности, что подтверждается многими авторитетными мнениями. В качестве примера можно привести мнение П.Л. Капицы относительно аварий на уникальных объектах, высказанное в лекции, прочитанной в Стокгольмском университете в 1976 г.: «Математические методы расчетов вероятности такого рода происшествий неприменимы» [2]. Приведем также мнение В.В. Болотина: «Наступление предельных состояний крупных технических объектов не может рассматриваться как массовое событие. При этом оказывается неприменимыми закон больших чисел и статистическое истолкование вероятности. Кроме того, мы почти нигде не располагаем настолько обширными статистическими материалами, чтобы с уверенностью судить о столь малых вероятностях

отказа, которыми должны обладать крупные технические объекты [3]. Здесь же стоит процитировать ведущих специалистов Ростехнадзора: «Рекомендуется с осторожностью относиться к применению количественных показателей риска в качестве критериев безопасности, учитывая сложность рассматриваемых объектов и большую неопределенность используемой для расчетов информации» [4].

Объем статистического материала для корректного выполнения вероятностных расчетов можно оценить на основании доказанного в математической статистике утверждения, что для уверенного разделения двух вероятностей, отличающихся менее чем на одну сотую, нужно произвести много тысяч испытаний [5]. И это притом, что при оценке безопасности гидротехнических сооружений обычно оперируют вероятностями  $10^{-3}$  –  $10^{-6}$ . Указанные ограничения распространяются именно на оценку безопасности объекта в целом и естественно не являются препятствием для применения статистических методов обработки результатов наблюдений и исследований. В связи с вышесказанным для оценки безопасности специалисты ОАО «Гипроречтранс» рекомендуют применение качественных методов анализа и качественных показателей — уровней, которые позволяют проводить ранжирование объектов посредством их расположения в виде последовательности по степени убывания безопасности объекта. Этот подход не противоречит Административному регламенту ... по государственной регистрации ГТС и ведению Российского регистра ГТС» (утв. 27.04.2009 г. № 117/66). В соответствии с этим документом (таблицы 2.1 – 2.24), оценка безопасности ГТС выполняется на основании качественной характеристики уровня безопасности. Классификация ГТС и чрезвычайных ситуаций по уровням выполняется в соответствии с качественными характеристиками таблицы 5 «Административного регламента ...».

Во всех случаях следует учитывать, что при существующем уровне статистической информации в ходе выполнения вероятностных расчетов сложных систем используются не более чем условные (иногда их называют инженерными, оперативными и т.п.), а не истинные вероятности, которые выражают не более чем степень уверенности в возможности ава-

рии [4]. Величины этих вероятностей, в том числе и их допускаемых значений, в различных документах отличаются на порядки [6 – 13]. Причем в результате подобных расчетов получаются не более чем ранжированные оценки возможности аварии на шкале (0; 1). Отсутствие достоверной и представительной статистической информации, а также в большинстве случаев наличие нестохастической природы неопределенности, характерной для аварий гидроузлов, делает практически невозможным при расчете показателей безопасности использование и расчет истинных вероятностей аварий или их частоты в год, которые обычно используются при страховании или при экспертизе безопасности органами ГО и ЧС. В данной ситуации допустимо не более чем экспертное предписание и нормативное утверждение каждому уровню безопасности ожидаемой частоты возникновения аварий в год. При этом необходимо использовать существующие в каждой отрасли традиции и накопленный к настоящему времени опыт оценок этой величины.

Бездумное использование вероятностных методов открывает дорогу «риск-манипуляторам», подмене реальных мер безопасности «виртуальным и «онаученным управлением риском» [14]. Изначально подход к оценке безопасности судоходных сооружений абстрагировался от оценок риска. Связано это было со многими причинами. Во-первых, как было указано выше, с невозможностью достоверно оценить вероятность (в ее частотной интерпретации) разрушения сооружения, имеющего определенные повреждения. А, во-вторых, тем, что в отраслях, где подход к оценке риска вроде бы устоялся, продолжается ожесточенная дискуссия о критериях приемлемого риска. В то же время при использовании действующих нормативных документов то и дело возникают абсурдные ситуации [14, 16].

Текст действующих МР содержит большое число пояснений. Тем не менее, считаю необходимым остановиться на некоторых принципиальных моментах. Обращу внимание на формулы для определения показателей интегральных признаков СГТС, технического состояния (ТС) и безопасности (БС). Определение этих показателей есть, по сути, решение задачи многокритериального оценивания объектов. Одним из наиболее обоснованных способов решения этой задачи является построение

математической модели объекта. Рассмотрим возможность построения такой модели для наших объектов.

Представим идеальный объект, который описывается несколькими признаками, отражающими интенсивность проявления нескольких свойств объекта. Допустим, что все свойства, а соответственно признаки, существенны и одинаково важны. При этом интенсивность проявления свойств объекта проявляется следующим образом: при увеличении значения признака свойство объекта ухудшаются. Идеализацию объекта можно завершить предположением, что размерность признаков одинакова (или, что они безразмерны), и при их измерении применяется одинаковая шкала. Однако обычно, и это является весьма эффективным приемом, при образовании интегрального признака оперируют нормированными значениями признаков, с которыми и будем дальше работать.

Назовем «элементарным состоянием» объекта такое его состояние, когда значения всех признаков, кроме одного, минимальны (их нормированные значения равны нулю). Оставшийся же признак является переменным, он может принимать любое значение между минимальным и максимальным. Множество всех элементарных состояний образует пространство элементарных состояний. Очевидно, что их число равно числу выбранных нами признаков. Под термином «состояние» в предлагаемой схеме будем понимать сумму (объединение) какого-либо множества элементарных состояний. Все рассматриваемые в схеме состояния, как элементарные, так и их объединения, образуют множество событий.

Примем в качестве аксиом следующие непротиворечивые допущения. Во-первых, при достижении признаком его максимального значения, а, следовательно, его нормированного значения единицы, элементарное состояние объекта по этому признаку является неработоспособным. При этом, поскольку все характеризующие признаками свойства являются существенными, состояние объекта так же является неработоспособным (происходит отказ объекта), даже если все остальные признаки имеют минимальные значения. Во-вторых, при достижении переменным признаком его минимального значения элементарное состояние объекта по этому

признаку является работоспособным, точнее сказать исправным. При этом, поскольку все остальные признаки по определению уже имеют минимальные значения, состояние объекта также является работоспособным (исправным). Нормированные значения признаков ( $J$ ), с одной стороны, описывают состояние объекта ( $A$ ), а с другой — являются его функцией  $J(A)$ . Назовем нормированные значения признаков «частными признаками элементарного состояния» объекта. При этом функция  $J(A)$ , с учетом принятых выше допущений, обладает следующими характерными свойствами:

$$1) J(I) = 1; \quad 2) J(\emptyset) = 0; \quad 3) 0 \leq J(A) \leq 1,$$

где  $J(I)$  — частный признак неработоспособного элементарного состояния объекта ( $I$ );  $J(\emptyset)$  — частный признак работоспособного элементарного состояния объекта ( $\emptyset$ );  $J(A)$  — частный признак частично работоспособного элементарного состояния объекта ( $A$ ).

Приведенное выше определение частного признака элементарного состояния объекта практически полностью совпадает с аксиоматическим определением вероятности А.Н. Колмогорова на основе теории множеств. Необходимо заметить, что в данном случае это определение сформулировано в несколько адаптированном виде. Кроме того, поскольку рассматриваемые здесь элементарные состояния совместны, нет необходимости формулировать последнее свойство, называемое «аксиомой сложения», так как оно относится только к несовместным состояниям.

Самым важным следствием, которое мы можем извлечь из совпадения определения частного признака элементарного состояния объекта с аксиоматическим определением вероятности, является возможность применения хорошо разработанной алгебры вероятностей, что позволяет по частным признакам элементарных состояний найти признак других состояний, являющихся объединением элементарных. Другими словами, по значениям частных признаков можно определить интегральный признак состояния, под которым, как было определено выше, мы понимаем сумму (объединение) элементарных состояний. С этой целью используем

структуру выражения для сложения вероятности ( $n$ ) независимых событий и получаем:

$$J = J\left(\sum_{k=1}^n A_k\right) = 1 - \prod_{k=1}^n [1 - J(A_k)], \quad (1)$$

где  $J(A_k)$  — частный признак элементарного состояния;

$J = J\left(\sum_{i=1}^n A_i\right)$  — интегральный признак состояния объекта.

Подставив вместо  $J(A_k)$  его выражение, равное

$J(A_k) = (J_i - J_{\min}) / (J_{\max} - J_{\min})$ , получаем выражение:

$$J = 1 - \prod_{i=1}^n \left[ 1 - (J_i - J_{\min}) / (J_{\max} - J_{\min}) \right] = 1 - \frac{\prod_{i=1}^n (J_{\max} - J_i)}{(J_{\max} - J_{\min})^n}. \quad (2)$$

Для перевода интегрального признака состояния объекта, рассчитанного в нормированных значениях, в размерность первоначально выбранной шкалы признаков умножим ( $J$ ) на величину выбранного нормирующего делителя, то есть  $(J_{\max} - J_{\min})$ , получим выражение:

$$J^* = J_{\max} - J_{\min} - \frac{\prod_{i=1}^n (J_{\max} - J_i)}{(J_{\max} - J_{\min})^{n-1}}, \quad (3)$$

где  $J^*$  — значение интегрального признака состояния объекта в размерности первоначально выбранной шкалы измерения признаков.

Поскольку для выбранной нами шкалы измерений (см. далее)  $J_{\max} - J_{\min} = 1$ , а для того, чтобы расчет был верен для любого интервала шкалы, к правой части формулы надо прибавить  $J_{\min}$ , приходим к выражению:

$$J = J_{\max} - \prod_{k=1}^n (J_{\max} - J_i). \quad (4)$$

Именно эта формула и послужила основой для вычисления показателей ТС и БС. Можно отметить, что формулы (3) и (4) имеют много общего с формулой (2.1) «Методики оценки уров-

ня безопасности гидротехнических сооружений» (ОАО «НИИ-ЭС», Москва, 2004). В тоже время имеется и ряд отличий (см. далее). Интересно также отметить, что формула (1) совпадает с формулой для определения вероятности отказа основного соединения в теории надежности, а также с формулой одного из пространственных методов свертки векторного критерия в скалярный, а именно дополнительной мультипликативной свертки.

Дальнейший анализ структуры исследуемой проблемы приводит к необходимости использования при оценке состояния объекта не только признаков существенных свойств, но и ряда других. Результаты анализа показали, что в этом случае необходимо использовать так называемые коэффициенты значимости. Такой же подход возможен и в случае оценки интегрального признака состояния с позиции нечетких множеств. В этом случае вводится оператор увеличения нечеткости, представляющий собой совокупность коэффициентов значимости всех параметров, описывающих состояние объекта.

Итак, мы имеем математическую модель, позволяющую определить величину интегрального признака состояния объекта на основе обобщения информации по всем его частным признакам. Причем эта модель не противоречит наиболее общему математическому описанию объекта с позиций теоретико-множественного подхода, и обоснованно может служить базой для определения вида технического состояния и оценки безопасности гидротехнических сооружений.

Перейдем теперь непосредственно к тексту МР и дадим некоторые пояснения к заложенному в них алгоритму. Исходя из сказанного выше, основой алгоритма являются четыре положения.

1. В соответствии с МР выполняется качественная оценка безопасности судоходных гидротехнических сооружений, т.е. определяется уровень их безопасности, что, как было отмечено выше, не противоречит «Административному регламенту ... по государственной регистрации ГТС и ведению Росийского регистра ГТС».

2. Определение вида технического состояния объекта<sup>1</sup> и оценка его безопасности, то есть определение уровня безопасности, соответствующего этому состоянию, выполняются по



результатам определения интегральных признаков технического состояния объекта (ТС) и безопасности (БС).

3. Определение величины интегрального признака выполняется с использованием формулы (4).

4. В соответствии с действующими нормативными документами контроль технического состояния и оценка технического состояния выполняются на основе анализа сценариев аварий с использованием критериев безопасности.

Отметим, что реализовать в чистом виде второе положение не удалось. Причиной этому были субъективные обстоятельства, которые, надо сказать, имели свое обоснование. То есть, фактически в МР был отражен, как мне кажется, не совсем верный подход, когда одному виду состояния объекта могут соответствовать разные уровни безопасности.

Поясню сложившуюся ситуацию. Учет всей совокупности признаков, определяющих состояние объекта, в общем виде не представляет трудностей. Три множества однозначно задают текущее состояние объекта: множество входных сигналов, переменных внутреннего состояния, переменных внешних воздействий. Первое множество включает в себя управляющие воздействия и характеризует систему эксплуатации, второе — внутреннее состояние элементов, компонентов и подсистем объекта, третье — внешние воздействия. В то же время для эксплуатационников весьма важным является выделить в отдельную подгруппу те признаки, определяющие состояние объекта, за которые они несут непосредственную ответственность. Кроме того, по установившейся традиции почему-то считается, что эксплуатация не оказывает влияние на состояние объекта, на него влияют только внешние воздействия на объект, которые приводят, например, к снижению прочности, снижению сопротивления изоляции, конструктивным повреждениям и т.п. Таким образом, сложилось весьма ограниченное представление о состоянии объекта, для которого был принят термин «техническое состояние».

В итоге, сначала по некоторой совокупности признаков производилось определение вида технического состояния

---

<sup>1</sup> В соответствии с ГОСТ 20911-89 определение вида технического состояния обозначается термином «контроль технического состояния»

объекта, а затем с учетом оставшихся признаков производилась оценка его безопасности. При этом получается, что одному виду технического состояния объекта могут соответствовать разные уровни безопасности. Положение могло быть исправлено введением в документ термина «эксплуатационное состояние», используемого в некоторых технических приложениях. Однако консенсус по этому вопросу достигнут не был. В то же время необходимо отметить, что все сказанное выше не отразилось на итоговых оценках, хотя и усложнило общий алгоритм документа.

Для контроля технического состояния и оценки безопасности объектов в МР используется порядковая критериальная шкала, которая существенно отличается от шкалы, принятой в «Методических рекомендациях по оценке технического состояния и уровня безопасности СГТС», утвержденных 30.12.03. Шкала того документа имела пять интервалов 1 – 2; 2 – 3; 3 – 4; 4 – 5; 5 – 6. При этом началу отсчета соответствовал бал равный 1, а предельным значениям — следующие баллы: предельно-допустимое значение (ПДЗ) – 3; ограниченно-допустимое значение (ОДЗ) – 4; критическое значение (КЗ) – 5. Интервал 1 – 3 соответствовал работоспособному техническому состоянию и (или) нормальному уровню безопасности, интервал 3 – 4 соответствовал ограниченно работоспособному техническому состоянию и (или) пониженному уровню безопасности, интервал 4 – 5 соответствовал предаварийному техническому состоянию и (или) неудовлетворительному уровню безопасности, интервал 5 – 6 соответствовал аварийному техническому состоянию и (или) опасному уровню безопасности.

Выбор именно пяти интервалов для контроля технического состояния и оценке безопасности объектов вполне обоснован. Из психологии известно, что способность человека производить качественные разграничения, представлена пятью основными определениями. Можно, например, привести одно из них, в наибольшей мере удовлетворяющее оценке признака или состояния объекта: очень хорошо, хорошо, удовлетворительно, плохо, очень плохо. Для большей точности, если существует такая возможность, можно принять и компромиссные решения между соседними определениями.

Эти определения можно сопоставить с определениями видов технического состояния и уровней безопасности (табл.).

*Таблица*

<b>Качественные разграничения</b>	<b>Вид технического состояния</b>	<b>Уровень безопасности</b>
Очень хорошо	Исправное	Нормальный
Хорошо	Работоспособное	
Удовлетворительно	Ограничено работоспособное	Пониженный
Плохо	Предаварийное	Неудовлетворительный
Очень плохо	Аварийное	

Однако в предыдущем документе все же существовали некоторые неточности. Так, в соответствии с ГОСТ 27.002-89 и ГОСТ 20911-89, есть еще понятие «исправное техническое состояние», которое в рассматриваемом документе отсутствовало. Естественно, его было необходимо добавить. Исправному техническому состоянию, в отличие от других видов технического состояния, соответствует не интервальная, а точечная оценка, поскольку по определению термина «исправное состояние» (ГОСТ 27.002-89) при любом отклонении от требований технической документации сооружение сразу же переходит в другое техническое состояние. По этой причине при условии сохранения преемственности численных обозначений предельно допустимых значений ПДЗ, ОДЗ и КЗ (которые в новом документе обозначены как К1, К2, К3), интервал 1 – 2 на шкале пришлось удалить и за начало отсчета принять балл, равный 2, который теперь соответствует «исправному техническому состоянию». Кроме того, за ненадобностью исключен балл, равный 6. Он не имеет никакого определения, поскольку не соответствует ни одному из предельно допустимых значений. Для определения аварийного технического состояния и опасного уровня безопасности на шкале достаточно задать интервал  $\geq 5$  и ограничивать его баллом 6 нет необходимости.

Необходимо дать дополнительное пояснение к формулам определения показателей ТС и БС, используемым в МР. Структура формул в отличие от той, что присутствует в предыдущем документе, позволяет исключить произвольность выбора балла, который является началом отсчета критери-

альной шкалы. Принципиальным также является удаление в новом документе из формул для ТС и БС знаменателя. Вернее принципиальным является не само удаление, а та причина, которая привела к видоизменению формулы.

Те, кто работал с предыдущим документом, помнят, что при попадании оценок того или иного признака в интервал шкалы 4 – 6,  $J_{\min}$  и  $J_{\max}$  принимались равными соответственно 4 и 6. Это обосновывалось предположением, что совокупность оценок признаков, расположенных в интервале 4 – 5, которые поодиночке характеризовали техническое состояние как предаварийное, могли перевести объект в аварийное техническое состояние. Однако такой подход противоречит концепции смены состояний, на которой в настоящей публикации подробно не останавливаюсь. В соответствии с этой концепцией возможные состояния сложных систем обычно разбиваются на некоторое число классов (видов). Концепция смены состояний сложных систем исходит из конечного числа возможных классов (видов) состояний систем, т.е. их дискретного поведения. Эти утверждения можно проиллюстрировать классическим примером падения шарика со ступеньки на ступеньку (рис. 1): падение шарика на соседнюю нижнюю ступеньку ассоциируется со сменой его состояния.

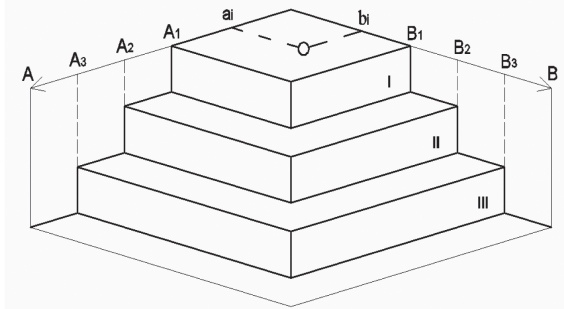


Рис. 1. Иллюстрация смены состояния систем

Как видно из рисунка, состояние шарика на плоскости характеризуется двумя признаками: А и В. При этом, как бы близко шарик не приблизился к предельным значениям признаков  $A_1$  и  $B_1$ , он никогда не упадет на следующую ступеньку (вторую), то есть не изменит свое состояние, пока значения призна-

ков не превысят значения  $A_1$  и  $B_1$ . Тем более он никогда не сможет попасть на третью ступеньку, пока значения признаков не превысят предельных значений  $A_2$  и  $B_2$ . Этот пример хорошо иллюстрирует два основных положения. Объект никогда не изменит своего состояния, пока хотя бы один из признаков, характеризующих его значимые свойства (то есть свойства, определяющие вид технического состояния объекта), не переведет его в это состояние. Кроме того возможна только последовательная смена состояний объекта, «перескакивание» через состояния невозможно. Из всего сказанного следует, что при выбранной критериальной шкале значение  $(J_{\min} - J_{\max}) = 1$ , так что знаменатель в формуле (2) ликвидируется сам собой.

В заключение хотелось бы остановиться на п. 5.39 МР и Приложении Д этого документа, в которых определен порядок оценки верхней границы расчетной вероятности возникновения аварии на судоходных гидротехнических сооружениях. Данный раздел был включен в документ, несмотря на всю критику использования вероятностных расчетов при решении задач оценки безопасности гидротехнических сооружений. Вызвано это было субъективными причинами. Во-первых, у эксплуатационников эти цифры часто требуют органы ГО и ЧС. Во-вторых, к сожалению, эти цифры используются при определении величины ущерба в результате гидродинамической аварии.

В тоже время необходимо отметить, что здесь авторы документа не отошли от своей принципиальной позиции, которая заключается в том, что тому или иному уровню безопасности можно дать не более чем экспертное предписание расчетной вероятности возникновения аварии (термин «расчетная вероятность» принят СНиП 33-01-2003). Нормальному уровню безопасности были приписаны значения, полученные из СНиП 33-01-2003, а для определения характера зависимости, представленной в Приложении Д, использованы данные из [17]. Кроме того, в документе использованы не истинные, а условные вероятности, которыми на самом деле и являются цифры Приложения Д. Это подтверждается тем, что значения расчетной вероятности, приведенные в СНиП 33-01-2003, получены для плотин по результатам вероятностных расчетов (с использованием ряда гипотез и упрощаю-

щих процедур) обобщенного риска реализации предельных состояний первой группы для периода постоянной и временной эксплуатации [17]. Нельзя не отметить, что использование в СНиП 33-01-2003 термина «расчетная вероятность» с размерностью 1/год некорректно. Однако обсуждение этого вопроса выходит далеко за рамки настоящей публикации. Более подробно с этой темой можно ознакомиться в [4].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Отчет** «Методические указания к порядку определения допустимого уровня риска аварий судоходных гидротехнических сооружений» (гос. контракт № 09-1353 от 31.03.2003 г., Тема № 58 «Разработка порядка определения допустимого уровня риска аварий СГТС»). – М.: ОАО «Гипроречтранс», 2004.
2. **Капица П.Л.** Эксперимент, теория, практика (Глобальные проблемы и энергия – лекция, прочитанная в Стокгольмском университете, 1977). – М.: Наука, 1976.
3. **Машиностроение.** Энциклопедия. Том IV-3. Надежность машин (Раздел 1.5.4.). – М.: Машиностроение, 1998.
4. **Гражданкин А.И., Лисанов М.В., Печеркин А.С.** К вопросу об использовании вероятностных оценок риска для анализа безопасности опасных производственных объектов (Сборник материалов семинара Госгортехнадзора России «Об опыте декларирования промышленной безопасности и развитии методов оценки риска опасных производственных объектов. Материалы семинара Госгортехнадзора России, ГУП «НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России»). – М., 2002.
5. **Гнеденко Б.В.** Курс теории вероятности: Учебник. 7-е изд., исправл. – М.: Эдитория УРСС, 2001.
6. **Руководство** по обеспечению надежности железобетонных конструкций предприятий черной металлургии при их реконструкции – Харьковский Промстройинипроект – НИИЖБ, Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1982.
7. **Рекомендации** по оценке надежности строительных конструкций по внешним признакам. – М.: ЦНИИ Промзданий Госстроя СССР, 1995.
8. **Методика** оценки и сертификации инженерной безопасности зданий и сооружений. – М.: ВНИИ ГОиЧС, 2003.
9. **РД 03-418-01** Методические рекомендации по проведению анализа риска опасных производственных объектов. – М.: ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2001.
10. **Лисанов М.В., Лыков С.М., Печеркин А.С., Сидоров В.И.** Оценка опасности установок первичной переработки нефти при декла-

рировании промышленной безопасности («Безопасность труда в промышленности», № 8, 1999).

11. **Александровская Л.Н., Афанасьев А.П., Лисов А.А.** Современные методы обеспечения безопасности сложных технических систем. Учебник. – М.: Логос, 2001.

12. **Германский** стандарт автомобильного союза VDA.

13. **Военный** стандарт США MIL-STD 1629A.

14. **Гражданкин А.И.** Неприемлемые показатели и критерии допустимого риска // Промышленная безопасность: доклад на четырнадцатом научном семинаре. 19.05.2008.

15. **Лисанов М.В., Сумской С.И.** Отзыв специалистов НТЦ «Промышленная безопасность» на методические документы МЧС России по оценке риска чрезвычайных ситуаций (Приложение к письму НТЦ «Промышленная безопасность» от 8.04.2008 № 5-20).

16. **Лисанов М.В., Буйновский С.Н.** О критериях приемлемого риска аварий на опасных производственных объектах химического и нефтегазового комплекса // Безопасность труда в промышленности. 2009. – № 3.

17. **Стефанишин Д.В.** Оценка нормативной безопасности плотин по критериям риска. «Гидротехническое строительство». – № 2, 1997.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ВНЕШНИМ ЛИСТОВЫМ АРМИРОВАНИЕМ**

*Николаев В.Б., доктор техн. наук, Рубин О.Д., доктор техн. наук, Лисичкин С.Е., доктор техн. наук, Балагуров В.Б., Климов Е.А., Белов А.А., Барышников К.М. (АО «НИИЭС»)*

Сталежелезобетонные конструкции, имеющие внешнее армирование из гладкой листовой стали, представляют собой особый класс железобетонных конструкций. В таких конструкциях помимо обычной стержневой рабочей арматуры, окруженной бетоном и имеющей полноценное сцепление с бетоном, имеется внешняя листовая арматура, прикрепляемая к бетонной поверхности растянутой грани конструкции.

Внешнее листовое армирование целесообразно устанавливать при усилении или ремонте железобетонных конструкций для повышения несущей способности. Также роль внешнего листового армирования может выполнять защитная (в

том числе герметизирующая) металлическая облицовка бетонной поверхности.

Сталежелезобетонные конструкции с внешним листовым армированием находят применение в сооружениях энергетических объектов, в том числе таких, как атомные, гидро и теплоэлектростанции, а также в морском гидротехническом строительстве.

Особенности сталежелезобетонных конструкций обуславливают различное сцепление внутренней стержневой арматуры и внешней листовой арматуры с бетоном, а следовательно различное распределение растягивающих усилий между стальными элементами конструкции. Другая важная особенность заключается в том, что внутренняя стержневая арматура и внешняя листовая арматура имеют различные прочностные характеристики (при этом сопротивление арматурной стали может быть значительно выше, чем листовой).

В целях исследования напряженно-деформированного состояния (а также прочности и жесткости) сталежелезобетонных балочных конструкций в зависимости от сцепления внешней листовой арматуры с бетоном в лабораторных условиях ОАО «НИИ энергетических сооружений» были проведены экспериментальные исследования сталежелезобетонных моделей конструкций энергетических сооружений.

Программа экспериментальных исследований разрабатывалась с учетом опыта исследований железобетонных и сталежелезобетонных конструкций энергетических сооружений, включая данные исследований сцепления стальных элементов с бетоном.

Для решения поставленных задач были изготовлены сталежелезобетонные балки-модели длиной 125 см, высотой — 20 см и шириной — 8 см из бетона класса В25. В качестве внутренней рабочей арматуры был принят стержень периодического профиля диаметром 12 мм класса А500С; внешнее листовое армирование выполнено из стального листа толщиной 2 мм и шириной 6 см из стали СтЗсп.

Листовая арматура прикреплялась к нижней растянутой грани балок-моделей стержневыми анкерами диаметром 3 мм и длиной 5 см. При этом к одной из балок-моделей листовая



арматура прикреплялась по всей длине балки-модели. К другой балке-модели листовая арматура прикреплялась только на опорных участках, а в средней части (в зоне «чистого изгиба») анкеровка листовой арматуры не производилась.

Схема внутреннего и внешнего армирования сталежелезобетонных балок-моделей представлены на рис. 1.

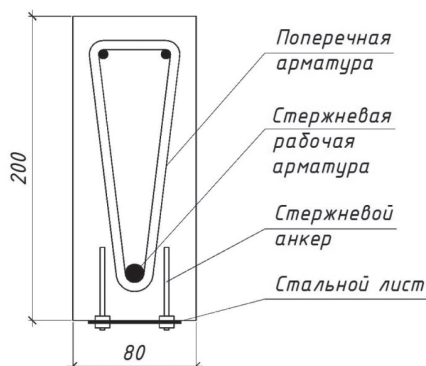


Рис. 1. Схема армирования сталежелезобетонных балок-моделей

Испытания балок-моделей выполнялись на действие «чистого» изгиба. Модели устанавливались горизонтально на двух опорах: одна из опор неподвижная (ножевая), другая подвижная (катковая). Вертикальная нагрузка от гидродомкрата передавалась в двух точках посредством распределительной траверсы; таким образом, создавалась зона действия «чистого» изгиба (рис. 2).

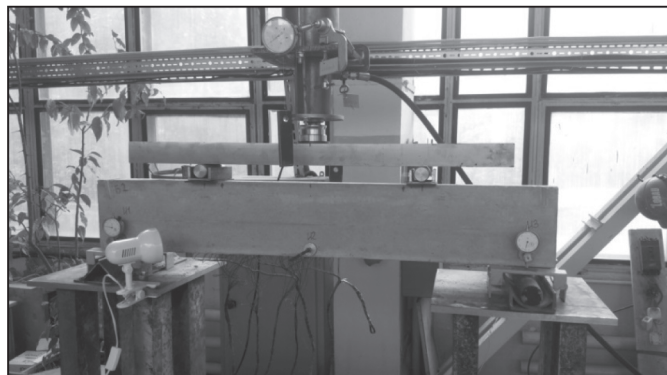
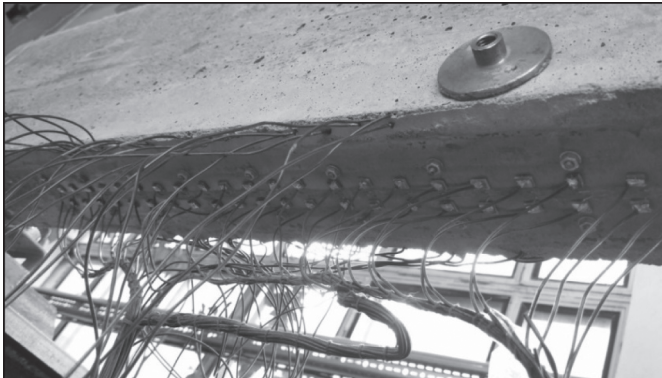


Рис. 2. Испытательный стенд

Опытные балки-модели оснащались контрольно-измерительной аппаратурой. Для измерения величины прогибов балок-моделей на опорах и в пролете устанавливались индикаторы часового типа с двух сторон моделей (по два – на каждой из опор и по два – в пролете). Для измерения величины относительных деформаций стержневой и листовой арматуры устанавливались тензорезисторы с базой 10 мм (рис. 3). В этих целях в арматурных стержнях вытачивалась специальная канавка глубиной 2 мм и шириной 4 мм. В стержневой и в листовой арматуре тензорезисторы размещались друг над другом. Ширина раскрытия трещин в моделях измерялась посредством установленных на трещинах индикаторов часового типа ИЧ-10, а также визуально с применением микроскопа отсчетного МПБ2.

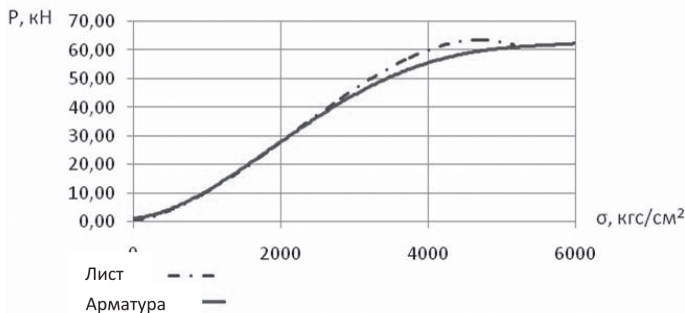


**Рис. 3.** Размещение тензорезисторов на стальном листе

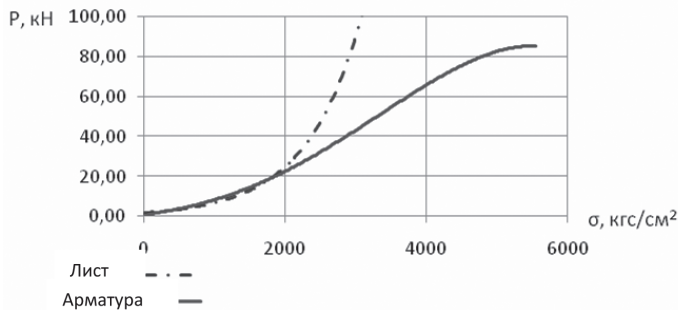
В соответствии с методикой испытаний железобетонных конструкций нагрузка прикладывалась ступенями по 10% от величины прогнозируемой разрушающей нагрузки. При достижении 80% от расчетной разрушающей нагрузки ступени уменьшались до 5%. В ходе испытаний контролировались следующие величины: характер образования трещин и ширина их раскрытия; прогибы; относительные деформации арматурных элементов; разрушающая нагрузка.

Результаты экспериментальных исследований показали значительное влияние нарушения сцепления внешней листовой арматуры с бетоном на напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных конструкций.

Так, нарушение сцепления существенно влияет на распределение напряжений между стержневой и листовой арматурой. В первой балке-модели (анкеровка листовой арматуры по всей длине балки) напряжения во внутренней стержневой арматуре и во внешней листовой арматуре примерно одинаковы (рис. 4). Во второй балке-модели (в зоне «чистого изгиба» анкеровка листовой арматуры не производилась) напряжения во внутренней стержневой арматуре существенно выше, чем во внешней листовой арматуре (рис. 5).



**Рис. 4.** Напряжения в стержневой и листовой арматуре в сечении с трещиной в области тензорезисторов №11 в балке №1 при анкеровке листовой арматуры по всей длине балки



**Рис. 5.** Напряжения в стержневой и листовой арматуре в сечении с трещиной по показаниям тензорезисторов №7 в балке №2 без анкеровки листовой арматуры в зоне «чистого изгиба»

Также зафиксировано снижение жесткости и трещиностойкости конструкций при нарушении сцепления внешней листовой арматуры с бетоном. На рис. 6 представлено сопоставление величины прогибов балок-моделей. Видно, что прогиб

второй балки-модели (при нарушении сцепления внешней листовой арматуры с бетоном) превышает прогиб первой балки-модели. На рис. 7 представлено сопоставление ширины раскрытия трещин в балках-моделях. Видно, что ширина раскрытия трещины во второй балке-модели (при нарушении сцепления внешней листовой арматуры с бетоном) превышает ширину раскрытия трещины в первой балке-модели.

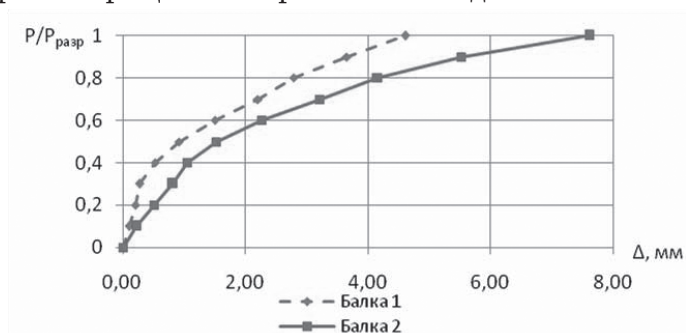


Рис. 6. Сопоставление величины прогибов балок-моделей №1 и №2 в относительных единицах (относительно разрушающей нагрузки)

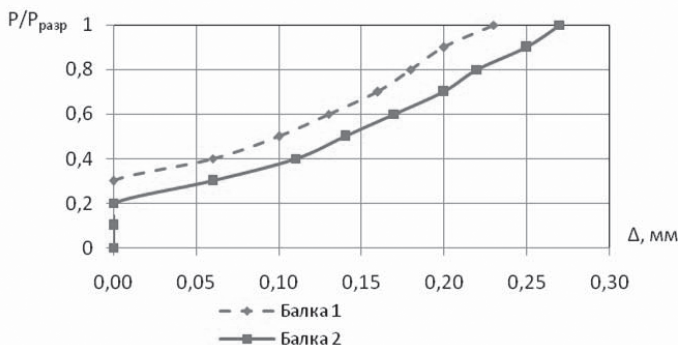


Рис. 7. Сопоставление ширины раскрытия трещин по трещиномерам с индикатором часового типа в балках №1 и №2 в относительных единицах (относительно разрушающей нагрузки)

Таким образом, в результате проведенных исследований экспериментально обосновано влияние нарушения сцепления внешней листовой арматуры с бетоном на напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных конструкций.

**ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ  
РЕКИ АМУДАРЬИ**

*Базаров Д.Р., доктор техн. наук, Хидиров С.К.,  
Каххоров У.А., Дранун Д., инженеры  
(Ташкентский институт Ирригации и Мелиорации)*

Для защиты берегов и дна русла реки от деформационных процессов и управления движением наносов на поймах рек устраиваются защитные сооружения. Эти сооружения должны обеспечивать правильное направление движения взвешенных и влекомых наносов, движущихся в водном потоке [2]. При их размещении необходимо обеспечить плавность входа пойменного водного потока в зону стеснения, равномерное распределение расхода и наиболее близкое к прямолинейному направление водного потока с тем, чтобы предотвратить деформации в стесненном сечении русла реки, добиться плавного вытекания потока из зоны стеснения, устойчивости и неизменности русла в районе стеснения.

Особенностью р. Амударьи является то, что она протекает в исключительно легкоразмываемых грунтах. На пойме р. Амударьи и некоторых других рек Центральной Азии наблюдается уникальное опасное явление — «дейгиш», интенсивный местный размыв берега или дамбы воронкообразной формы. При возникновении дейгиша происходит чрезвычайно быстрый размыв берегов и переформирование меандрирующего русла реки. Так, по данным [8], «по точным инструментальным ежедневным наблюдениям только за один июль 1932 года ... была уничтожена полоса берега в окрестностях города Туркуль в Каракалпакской автономной республике 500 метров шириной!». В 1947 г. город на своем первоначальном месте был смыт полностью и перенесен на новое место.

Для условий реки Амударьи, русло которой проходит на легкоразмываемых грунтах, к главным задачам регулирования можно причислить строительство защитно-регуляционных сооружений, обеспечивающих защиту населенных пунктов от наводнений, сохранение населенных пунктов и поливных сельскохозяйственных земель, защиту от дейгиша берегов реки,

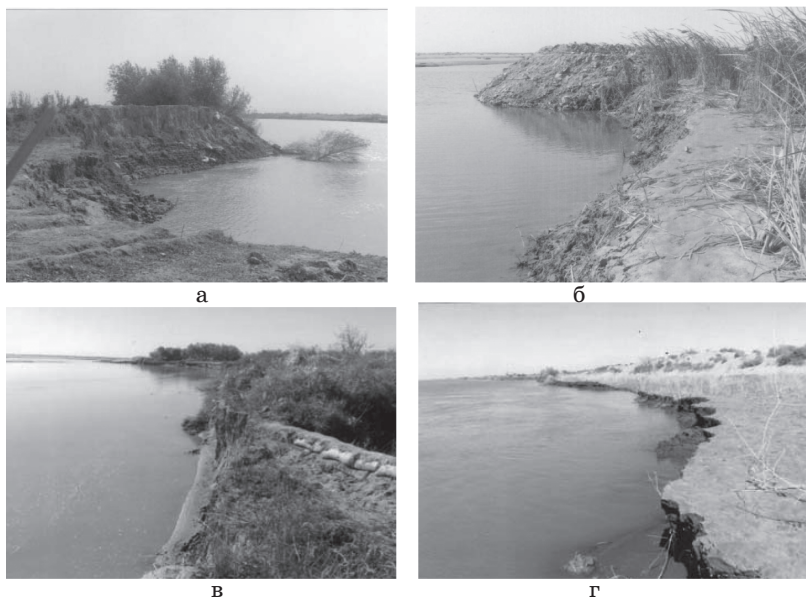
обеспечение гарантированного водоотбора при бесплотинном водозаборе в условиях наличия дефицита водных ресурсов в связи с резким изменением гидрологического режима реки [2].

Практика строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений в русле реки Амударьи показывает, что нарушения бытового режима реки резко изменяет интенсивность протекания необратимых русловых процессов и требует строительства огромного количества защитных сооружений на пойме реки, особенно в тех случаях, если осуществляется регулирование режима в водохранилищах в связи с резким изменением гидрологического режима реки [3, 4], и на динамику руслового потока влияет построенные гидротехнические сооружения.

В качестве примера можно привести пойменные дамбы, построенные на пойме русла реки Амударьи между гидроузлами Туямуюн и Тахиаташ на расстоянии 230 км. Для защиты берегов и поймы русла реки от деформационных процессов на этом участке построено более 120 берегозащитных сооружений различной конструкции в виде глухих и сквозных дамб, расположенных как симметрично, так и ассиметрично относительно динамической оси потока. Несмотря на многочисленность этих сооружений из-за резкого изменения естественного гидрологического режима реки, повлиявшего на режим эксплуатации гидроузлов, ошибок при строительстве, не всегда удачного выбора расстояний между ними и расположения в плане, неоптимального вида оголовков и т. д., проблема предотвращения деформации берегов реки остаётся актуальной. Согласно данным Управления эксплуатации дамб, ежегодно для восстановления разрушенных дамб в результате деформационных процессов выполняется 620 тыс. м<sup>3</sup> земляных работ на общую сумму около 24,8 млрд. сумов, что эквивалентно 112,727 млн. у. е. [5].

На рассматриваемом участке река Амударья протекает в аллювиальных отложениях древней дельты. Долина реки на участке от теснины Туямуюн до кишлака Карамышташ расширяется, достигая нескольких километров, склон её плавно сливается с прилегающей местностью. Долина выложена аллювиальными наносами, преимущественно только серыми песками, прикрытыми на равнине суглинками. Русло реки разде-

ляется на многочисленные протоки и рукава с временными и постоянными островами, т.е. имеет место пойменная многорукавность. На данном участке русло реки подвержено исключительно сильным деформациям: река блуждает в пределах своей поймы. В зависимости от режима регулирования уровень воды резко поднимается или наблюдается резкий спад. Такие резкие изменения гидрологического режима приводят к изменению гидравлических характеристик потока и чрезвычайно значительным русловым деформациям (рис. 1).

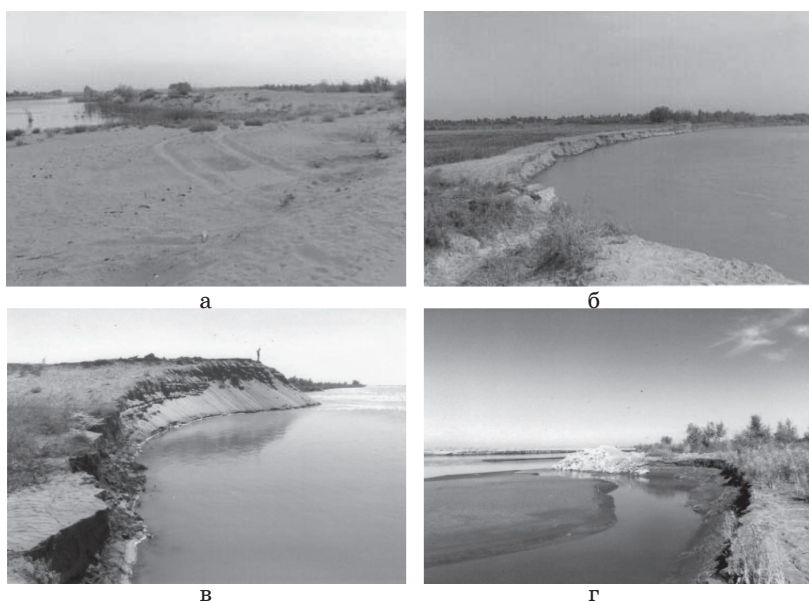


**Рис. 1.** Деформационные процессы за весенне - летний период на участке реки Амударьи между гидроузлами Туямуюн-Тахиаташ:

а — участок реки около шпоры № 30. Объем размытого левого берега —  $5560 \text{ м}^3$ , длина размытого участка — 30 м; б — участок реки около шпоры Рашидов Банкет. Объем размытого левого берега —  $8560 \text{ м}^3$ , длина размытого участка — 20 м; в — участок реки около населенных пунктов Банкет-Махсим. Объем размытого левого берега — 540 тыс.  $\text{м}^3$ ; длина размытого участка — 7930 м; г — размыв берега реки вблизи поселка Элликала

Отметим, что на этом участке реки сосредоточено наибольшее количество орошаемых сельскохозяйственных земель и населенных пунктов по обоим берегам реки, главным обра-

зом — на левом, где располагается Хорезмский оазис, территория с развитой зоной ирригационного земледелия и сравнительно большим количеством населенных пунктов. На рис. 2 представлены последствия аварийных размывов территорий, расположенных в этой местности, где непостоянство речного русла р. Амударьи создает исключительные затруднения для орошения, постоянно нарушая нормальный водозабор в оросительные каналы, как вследствие размывов, так и из-за необходимости наращивания берегов, создает угрозу затопления сельхозугодий и населенных пунктов [6].



**Рис. 2.** Размывы орошаемых земель, расположенных на пойме реки Амударьи: а — участок реки около шпоры № 48. Объем размывтого левого берега —  $9600 \text{ м}^3$ , длина размывтого участка —  $1030 \text{ м}$ ; б — дейгиш на участке реки около поселка Турткуль. Объем размывтого левого берега —  $320 \text{ тыс. м}^3$ , длина размывтого участка —  $6070 \text{ м}$ ; в — дейгиш на участке реки около шпоры №70. Объем размывтого левого берега —  $400\,000 \text{ м}^3$ , длина размывтого участка —  $4050 \text{ м}$ . В зоне повреждения располагались орошаемые сельхозугодья; г — дейгиш на участке реки около шпора №80. Объем размывтого левого берега —  $200 \text{ тыс. м}^3$ , длина размывтого участка —  $4013 \text{ м}$



В возникновении дейгиша прослеживается определенная последовательность. Вначале образуется один дейгиш, продукты размыва которого создают благоприятные условия для возникновения следующего дейгиша. Так цепь дейгишей «шагает» вдоль берега. Расстояние между дейгишами, т.е. «шаг», колеблется в больших пределах: от 3 – 7 до 15—40 м и более. Затем потоком размываются оставшиеся выступы между дейгишами, что приводит к общему расширению русла реки. На некоторых реках, развивающихся по типу русловой многоруканности, и протекающих в легкоразмываемых грунтах, например на р. Амударье, наблюдается внезапное разрушение берегов сразу на расстоянии по длине реки в сотни метров и даже километров. Скорость разрушения берега (смещение его бровки) может быть очень большой. В районе с. Ходжайли при низких уровнях воды были зафиксированы случаи смещения бровки берега р. Амударьи в плане около 1 м/сут, при высоких паводках эта скорость достигала 10 – 15 м/сут, а зимой при нескольких повышенных уровнях — 4 м/сут. Длина участков, на протяжении которых наблюдались столь значительные деформации, изменялась от 0,5 – 1,5 до 8 – 10 км. На участке р. Турткуль за 110 сут (с 4/У1 по 21/1Х 1936 г.) берег сместился вправо на 600 м. В 1937 – 1938 гг. за 30 – 40 мин была смыта полоса берега шириной 15 – 30 м. Сравнение разновременных съемок этого участка р. Амударьи длиной 50 км за различные годы наблюдения показало, что русло за 60 лет сместилось вправо в среднем на 6 км, а местами — до 30 км. При высоте берега 6 м в среднем это соответствовало смещению бровки на 100 м/год. По данным [9], размер ширины размыва достигает нескольких десятков метров на участках длиной до 500 м.

Для предотвращения этого нежелательного явления необходимо построить дополнительные берегозащитные сооружения в пойме реки или реконструировать уже существующее таким образом, чтобы была обеспечена необходимая прочность их конструкций. Решение вышеуказанной задачи требует детального изучения сущности гидравлических явлений и динамики водного потока вблизи вышеуказанных сооружений. Также требуется достаточно полная информация о динамике гидродинамической характеристики потока и мор-

фометрии пойменного русла Амударьи, отличающегося сложным характером протекания русловых процессов, необычным для рек в других ландшафтных зонах [7].

В настоящее время не существует общепринятых гидравлических методов для решения задачи обеспечения устойчивости русла р. Амударьи. Математическая модель процесса образования дейгиша должна учитывать необычное распределение наносов по глубине р. Амударьи и то, что дейгиш возникает, как правило, при спаде уровня воды в реке. Необходимо интенсифицировать гидравлические и гидрологические исследования русловых процессов для р. Амударьи, включая натурные наблюдения, гидравлические лабораторные опыты и разработку математической модели явления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Великанов М.А.** Русловой процесс (Основы теории). – М.: Госиздат. Физ-Мат. литературы, 1958.
2. **Базаров Д.Р.** Научное обоснование новых численных методов расчета русловых деформаций рек, русло которых сложены легко-размываемыми грунтами. Дисс. на соиск. уч. степ. д.т.н. – М., 2000.
3. **Сбор**, систематизация и анализ материалов исследования дейгиша и методов борьбы с этим явлением на реке Амударье. Научно-технический отчет отдела русел САНИИРИ за 1969 – 1970 гг. – Ташкент, 1970.
4. **Бакиев М.Р.** Закономерности растекания потока за глухой и сквозной шпорой. Дисс. на соиск. уч. степ. к. т.н. – Ташкент, 1974.
5. **Отчет.** Управление эксплуатации дамб нижнего течения реки Амударьи. – Бегуни., р. Узбекистан, 1999.
6. **План мероприятий** ремонтно-восстановительных работ защитно-регуляционных сооружений нижнего течения реки Амударьи на 2011 г. – Бегуни., р. Узбекистан, 2010.
7. **Базаров Д.Р., Норкулов Б.Э., Рузимуметова Д.М.** Изменение гидрологического режима реки при бесплотинном водозаборе (на примере водозабора АВМК) // Архитектура, урбанизм, дизайн. – Ташкент: Изд. ТАСИ, 2011. – №4.
8. **Федорович Б.А.** Лик пустыни. — М.: Госкультпросветиздат, 1950.
9. **Барышников Н.Б.** Русловые процессы. – Санкт-Петербург.: Изд. РГТМУ, 2008.

## УСТОЙЧИВОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ПРОДОЛЬНЫМ ПУЛЬСИРУЮЩИМ НАГРУЖЕНИЯМ

Ан Е.В. (Институт сейсмостойкости сооружений АН РУз)

В практике строительства подземных сооружений различного назначения, как правило, встречаются сложные системы трубопроводов и сооружений. Сложной называется система трубопроводов и сооружений, различным образом стыкуемых в сложных узлах, с учетом важнейших особенностей комплекса и характера строительства. Сложными узлами, в частности, являются различные смотровые колодцы, места разветвлений, поворотов, всевозможные варианты стыков, крепления и пр.

Рассмотрим трубопровод, расположенный в водонасыщенном грунте, площадь поперечного сечения которого равна  $F$ . Ось трубопровода в недеформированном состоянии совпадает с осью  $x$  декартовой системы координат  $(x, y, z)$ . Концам трубопровода соответствуют координаты  $x = 0$  и  $x = l$ . Если фронт волны движется параллельно плоскости  $(x, y)$ , то ось трубопровода будет изгибаться только в плоскости  $(x, z)$ . Компоненты перемещения точек оси трубопровода в направлении  $x$  и  $z$  обозначим через  $U(x, t)$  и  $W_1(x, t)$ . Для определения этих функций Кирхгофом была предложена система уравнений, применяемая в технической теории «больших прогибов» стержней [1, 2]:

$$\left. \begin{aligned} m_T \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - EF_T \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial W_1}{\partial x} \right)^2 \right] &= q_x \\ m_T \frac{\partial^2 W_1}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 W_1}{\partial x^4} - EF_T \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial W_1}{\partial x} \left[ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial W_1}{\partial x} \right)^2 \right] \right\} &= q_z \end{aligned} \right\},$$

(1)

Граничные условия:  $U = 0$  при  $x = 0$ ,  $U = U_0 + U_1 \cos \gamma t$  при  $x = l$ ;  $W_1 = 0$ ;  $\frac{\partial^2 W_1}{\partial x^2} = 0$  при  $x = 0$ ;  $l$ ,

где  $t, x$  — размерные время и координата точки оси трубопровода;  $EF_T, EJ$  — линейная и изгибная жесткости трубопровода;  $m_T = c_T F_T$  — погонная масса трубопровода;  $q_x, q_z$  — размерные продольная и поперечная компоненты погонных внешних сил, действующих на трубопровод.

При отсутствии осевой составляющей внешнего воздействия ( $q_x = 0$ ) систему (1) можно существенно упростить и свести к одному уравнению для прогиба  $W_1(x, t)$ , если принять гипотезу Кирхгоффа.

В работе [2] предложено выбирать  $q_z$  в следующем виде:

$$q_z = -m_T K_z W_1 - m_T \Lambda_z \frac{\partial W_1}{\partial t} + m_T B_z \frac{\partial^2 W_1}{\partial x^2} + m_T M_z \frac{\partial^3 W_1}{\partial x^2 \partial t}.$$

Тогда система уравнений (1) приобретает вид:

$$\begin{aligned} m_T \frac{\partial^2 W_1}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 W_1}{\partial x^4} - \frac{EF_T}{l} \left[ U[l, t] - U(0, t) + \frac{1}{2} \int_0^l \left( \frac{\partial W_1}{\partial x} \right)^2 dx \right] \frac{\partial^2 W_1}{\partial x^2} = \\ = -m_T K_z W_1 - m_T \Lambda_z \frac{\partial W_1}{\partial t} + m_T B_z \frac{\partial^2 W_1}{\partial x^2} + m_T M_z \frac{\partial^3 W_1}{\partial x^2 \partial t}. \end{aligned} \quad (2)$$

Один из концов трубопровода все время неподвижен  $U(0, t) = 0$ , а второй присоединен к массивному телу (сложный узел, гидротехническое сооружение и т.д.), основная собственная частота колебаний которого примерно вдвое превышает основную частоту поперечных колебаний трубопровода, т.е., положим, что  $U(l, t) = U_0 + U_1 \cos 2\omega t$ ,  $U_0 \geq 0, U_1 > 0$ , то единственной неизвестной в уравнении (2) оказывается функция  $W_1(x, t)$ : поперечное смещение оси трубопровода относительно окружающей его грунтовой среды.

Предположим также, что трубопровод имеет начальное искривление  $W_0$ .

Произведем замены:  $t_1 = \frac{t}{T_0}$ ,  $\xi = \frac{x}{l}$ ,  $V_1 = \frac{W_1}{R_u}$ ,  $V_0 = \frac{W_0}{R_u}$  и представим функции  $V_1$  и  $V_0$  в следующем виде:

$$V_1 = f_1 \sin \pi \xi, \quad V_0 = f_0 \sin \pi \xi.$$

Тогда уравнение (2) в безразмерном виде запишется:

$$\begin{aligned} & \frac{m_{\Gamma} R_u}{T_0^2} \frac{d^2 f_1}{dt_1^2} + \frac{E J R_u \pi^4}{l^4} (f_1 - f_0) + \frac{E F_{\Gamma} R_u \pi^2}{l^3} (U_0 + U_1 \cos 2\omega T_0 t_1) f_1 + \\ & + \frac{E F_{\Gamma} \pi^4 R_u^3}{4l^4} f_1^3 = -m_{\Gamma} R_u \left( K_z + \frac{\pi^2 B_z}{l^2} \right) (f_1 - f_0) - \frac{m_{\Gamma} R_u}{T_0} \left( \Lambda_z + \frac{\pi^2 M_z}{l^2} \right) \frac{df_1}{dt_1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Рассмотрим случай, когда,  $\Lambda_z + \frac{\pi^2 M_z}{l^2} \ll 1$ , т.е. массивная труба и вязкость малая.

Тогда уравнение (3) примет следующий вид:

$$\frac{d^2 f_1}{dt_1^2} + \varepsilon A_1 \frac{df_1}{dt_1} + (B_1^2 + \varepsilon C_1 \cos 2\omega T_0 t_1) f_1 + \varepsilon f_1^3 = \delta_0,$$

где  $\varepsilon = \frac{E \pi^4 R_u^2 T_0^2}{4l^4 \rho_{\Gamma}}$ ;  $A_1 = \frac{4l^4 \rho_{\Gamma}}{E \pi^4 R_u^2 T_0} \left( \Lambda_z + \frac{\pi^2 M_z}{l^2} \right)$ ;

$$B_1^2 = \frac{E J \pi^4 T_0^2}{l^4 m_{\Gamma}} + \frac{E \pi^2 T_0^2}{l^3 \rho_{\Gamma}} U_0 + T_0^2 \left( K_z + \frac{\pi^2 B_z}{l^2} \right); \quad \frac{4l}{\pi^2 R_u} U_1 = C_1; \quad \delta_0 = K f_0.$$

Проведем аналогичные исследования, выполненные в [1, 3], с учетом и без учета начального прогиба.

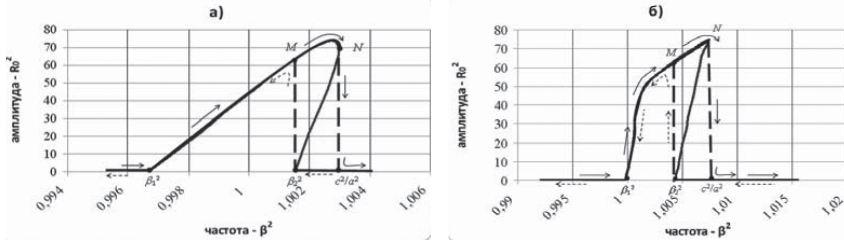
Получим амплитудно-частотную зависимость без учета начального прогиба:

$$\frac{3}{4} \varepsilon R_0^2 = (\beta^2 - 1) \pm \frac{1}{2} \sqrt{c^2 - 4a^2 \beta^2}.$$

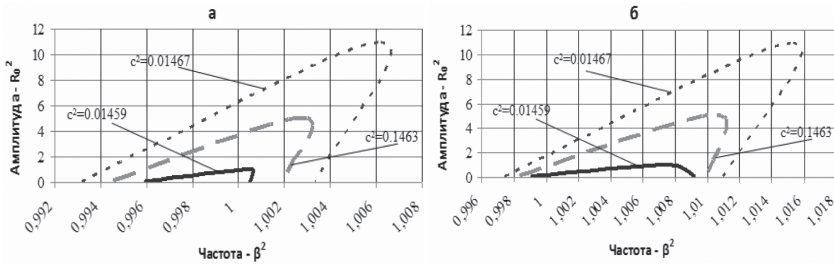
Данное уравнение совпадает с результатом, полученным Г. Каудерером и Г. Шмидтом [1, 3]. Теперь запишем уравнение зависимости частоты от амплитуды с учетом начального прогиба:

$$\beta^2 = 1 + \frac{3}{4} \varepsilon R_0^2 + \frac{9}{32} c^2 \pm \sqrt{\frac{c^2}{4} - a^2 + \frac{\delta_0^2}{R_0^2} \pm \frac{\delta_0}{R_0} \sqrt{c^2 + 2ac + \frac{\delta_0^2}{R_0^2}}}.$$

Построим амплитудно-частотные диаграммы для конкретных параметров, характеризующих взаимодействие трубопровода с водонасыщенным грунтом (рис. 1, 2).



**Рис. 1.** Амплитудно-частотная диаграмма параметрических колебаний: *a* – без учета начального прогиба; *б* – с учетом начального прогиба;  $l = 5\,000$ ;  $R = 10$ ;  $\vartheta = 1$ ;  $k_1 = 0,5$ ;  $T_0 = 0,01$ ;  $c^2 = 0,007298$



**Рис. 2.** Амплитудно-частотная диаграмма параметрических колебаний: *a* — без учета начального прогиба; *б* — с учетом начального прогиба;  $l = 3\,000$ ;  $R = 7$ ;  $\vartheta = 1$ ;  $k_1 = 0,5$ ;  $T_0 = 0,02$

Установлено, что при определенных соотношениях между параметрами, характеризующими взаимодействие трубопровода с водонасыщенным грунтом, возможно возникновение значительных поперечных колебаний трубопровода, которые могут привести к его разрушению.

Проведем анализ полученных результатов на примере нескольких графиков по аналогии с анализом, приведенным в книге Г. Каудерера [1].

На рис. 1, *a* (без учета правой части, т.е. нет начального прогиба) показано медленное изменение частоты параметрического возбуждения.

Жирные участки линий означают устойчивое состояние. При увеличении  $\beta$  состояние покоя остается устойчиво до достижения значения  $\beta = \beta_1$ . Начиная с этого значения частоты появляются параметрические колебания, амплитуда которых сначала возрастает, а затем при приближении к точке *N* амплитуда

литуда снова несколько уменьшается. Когда  $\beta$  достигает значения  $c/a$ , колебания прекращаются. При последующем увеличении  $\beta$  состояние покоя остается устойчивым. И если  $\beta$  уменьшается, состояние покоя остается устойчивым вплоть до достижения точки  $\beta_2$ . При этом значении частоты возникают колебания с конечной амплитудой ( $t.M$ ), которая затем уменьшается при приближении к  $\beta = \beta_1$ , достигая которую, станет равна нулю.

Рассматривая рис. 1, б (с учетом правой части, т.е. начального прогиба) проводим аналогичный анализ.

Амплитудно-частотные зависимости показывают, что как только частота возмущений совпадает с удвоенной собственной частотой, возникает параметрический резонанс. Анализ полученных результатов позволяет прийти к следующему заключению.

Как ожидалось, на устойчивость трубопровода влияют его жесткость и длина: чем больше  $l$ , тем менее устойчив трубопровод. Показано влияние воздействия  $c^2$ , при увеличении которого амплитуда возрастает. Таким образом, пороговое условие наступит при стремлении  $c^2$  к нулю: амплитуда будет равна нулю. Как видим из приведенных графиков, начальный прогиб влияет на область устойчивости амплитудно-частотной характеристики, но не влияет на величину безразмерной амплитуды, все происходит в районе 1.

Полученные результаты исследований динамической устойчивости подземных трубопроводов сравнивались с известными данными схожих систем без учета окружающей среды. Это служит подтверждением достоверности полученных результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каудерер Г. Нелинейная механика. – М.: ИЛ, 1961.
2. Рашидов Т.Р., Сибукаев Ш.М. Реологическая модель взаимодействия трубопровода с водонасыщенным грунтом (при поперечных движениях) // Проблемы механики. – Ташкент, 2009. – № 1.
3. Шмидт Г. Параметрические колебания. – М.: Мир, 1978.

## ВОДОСБРОСНЫЕ СООРУЖЕНИЯ ГИДРОУЗЛА КАК ИСТОЧНИК ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

*Куприянов В.П., кандидат техн. наук (ОАО НИИЭС)*

При турбулентном режиме движения воды, характерном для гидротехнических водосбросных сооружений, давление в любой точке потока изменяется во времени и имеет случайный характер. В результате сооружения и механическое оборудование при сбросе воды испытывают динамические воздействия от пульсаций гидродинамического давления со стороны пропускаемых через них потоков и возбуждение от колебаний грунта, возникающих при гашении энергии в нижнем бьефе.

Пульсационная нагрузка вызывает вибрацию конструкций и сооружений, создает переменное напряженное состояние, которое может привести к их усталостному разрушению. При значительных скоростях водного потока и образовании отрывных течений влияние пульсационной нагрузки на напряженно-деформированное состояние конструкции или сооружения становится столь существенным, что пренебрежение ею или ее недооценка могут привести к авариям, что неоднократно и наблюдалось на практике [1].

Закономерности вибрационных явлений, возникающих в процессе взаимодействия, определяются гидродинамическими характеристиками потока и характеристиками колеблющихся упругих конструкций. Они чрезвычайно сложно устанавливаются на стадии проектирования даже при наличии экспериментального обоснования сооружений, и, как правило, выявляются при проведении натурных испытаний [2].

Наиболее важным параметром, характеризующим динамические явления, является спектральная плотность — функция, описывающая распределение мощности процесса в зависимости от частоты. Если спектральная плотность нагрузки  $S(\omega)$  известна, то для линейных динамических систем спектр реакции  $S_R(\omega)$  определяется алгебраическими операциями с матрицами передаточных функций. В частности, для системы с одной степенью свободы [3]:



$$S_R(\omega) = |\Pi|^2 S(\omega), \quad (1)$$

где  $|\Pi|$  — модуль передаточной функции, связывающий амплитуду реакции  $R$  с амплитудой воздействия.

Из анализа уравнения (1) следует, что в случае возникновения негативных динамических процессов для их предотвращения могут рассматриваться различные подходы:

изменение упругих свойств конструкций. Установлено, что пульсации давления можно учитывать как статическую нагрузку в случаях, когда собственная частота  $f_0$  конструкции (с учетом присоединенной массы воды) больше или равна  $1/5$  частоты пульсации давления  $f_p$ , что, например, характерно для плит крепления нижнего бьефа и плит водопропускных трактов (быстротока) [3];

изменение условий передачи нагрузки. В частности, в случае возбуждения сооружения при колебании основания, возможно изменение динамических модулей упругости грунта на различных участках;

изменение частотного состава нагрузки. Достигается, например, изменением условий обтекания конструкций, изменением схемы гашения энергии в нижнем бьефе, изменением плотности сбросного потока в результате его аэрирования и т.д.

Ниже на примерах ряда конкретных гидроузлов описаны возникшие динамические проблемы, связанные с работой водосбросных сооружений, и рассмотрены способы их устранения.

**Ходжикентская ГЭС** на р. Чирчик в Узбекистане была пущена в эксплуатацию в 1976 году. ГЭС состоит из трех энергоблоков, каждый из которых включает турбину мощностью 55 МВт и два донных водосброса. Максимальный напор составляет 36,5 м, а максимальный расчетный расход с вероятностью превышения, равной 0,1%, оценен в 2040,0 м<sup>3</sup>/с.

Водобойный колодец в нижнем бьефе ГЭС разделен по ширине на три части продольными стенками. Каждая из этих частей соответствует одному энергоблоку и имеет ширину 17,0 м. Разделительные стенки состоят из двух секций общей длиной 67,35 м. Высота стенок изменяется от 21,0 м у низовой гра-

ни ГЭС до 5,0 м в конце стенок, толщина от 3,0 до 2,5 м. Разделительные стенки изготовлены из монолитного бетона с использованием железобетонной опалубки и консолью закреплены в монолитном днище колодца. Схема сооружений в нижнем бьефе гидроузла представлена на рис. 1.

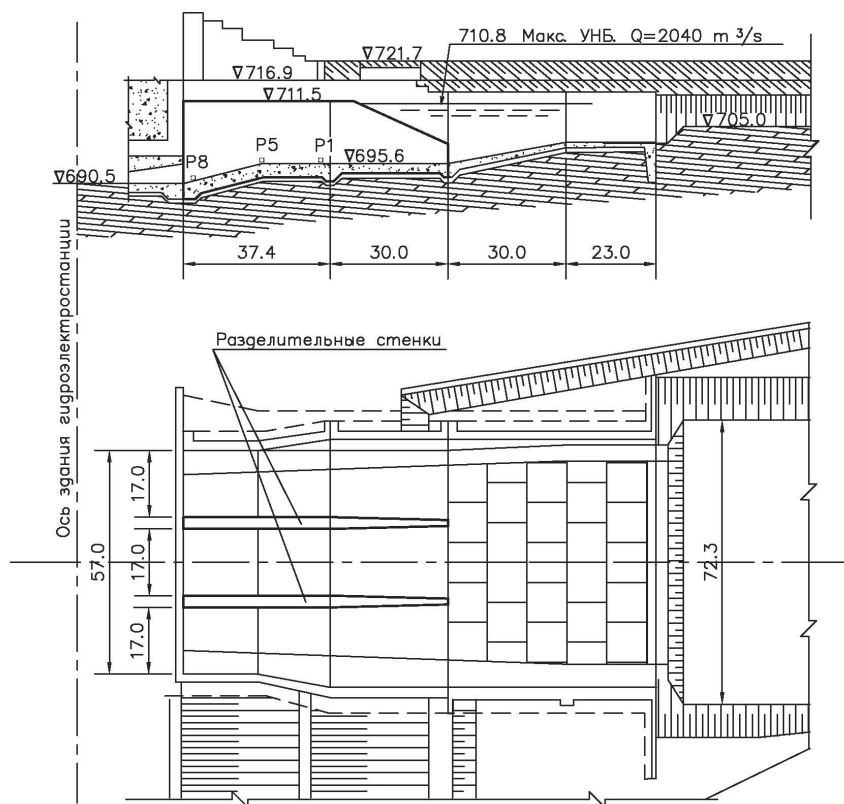


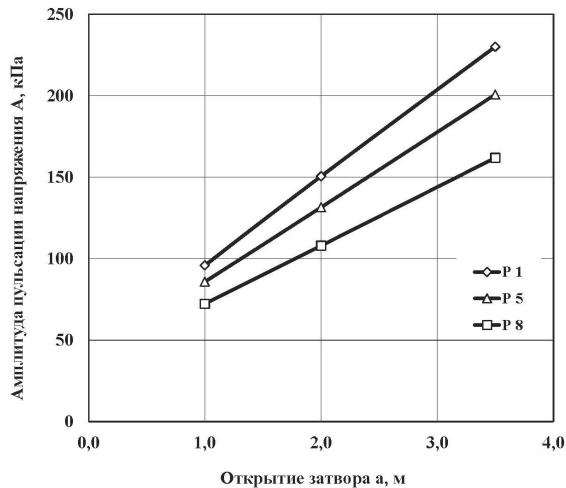
Рис. 1. Схема устройства отводящего канала за зданием Ходжикентской ГЭС

После пуска ГЭС в эксплуатацию было обнаружено, что при открытии затворов донных водосбросов всего на 0,2 от полного имели место интенсивные колебания разделительных стенок с амплитудой перемещения в их верхней части, превышающей  $6 \cdot 10^{-4}$  м при преобладающей частоте вибрации около 5,0 Гц, близкой к частоте собственных колебаний стенок.

При проектировании Ходжикентской ГЭС не было произведено оценок прочности разделительных стенок с учетом их возможных колебаний. Вместе с тем мировой гидротехнический опыт свидетельствует о том, что вибрация продольных стенок в нижних бьефах водосбросов под воздействием нестационарных гидродинамических нагрузок в зонах диссипации энергии может быть причиной падения таких стенок. Примерами тому служат аварии, имевшие место в водобойном колодце Тексарканского гидроузла в США и в отводящем канале Волгоградской ГЭС в России [3]. В связи с этим отмеченные на Ходжикентской ГЭС вибрации раздельных стенок потребовали проведения анализа их безопасности, что было выполнено в результате постановки соответствующих физических исследований на гидравлической модели и расчетов прочности с использованием результатов этих исследований [4].

Сведения о максимальных амплитудах пульсации напряжений в основании разделительной стенки, полученные с использованием описанных методов, приведены на рис. 2. Значения максимальных амплитуд оказались существенно зависимыми от условий в нижнем бьефе ГЭС: открытия затворов водосбросов и распределения расходов воды между частями, на которые разбит колодец разделительными стенками. При равномерном распределении расхода между этими частями амплитуды пульсаций напряжений в 1,5...1,7 раза больше, чем при резко неравномерном распределении, что связано с малой корреляцией пульсации давления на противоположные грани стенки. Однако при неравномерном распределении расходов возрастают напряжения в основании стенки, связанные со стационарными нагрузками на нее (с перепадом уровней воды на стенке). Так, при полном открытии водосбросов по одну сторону от стенки и закрытых водосбросах по другую сторону от нее напряжения у основания стенки от стационарной нагрузки достигают 5,7 МПа в начале стенки и 1,8 МПа в ее конце, а максимальная амплитуда пульсации напряжений составляет примерно 1,5 МПа. В среднем максимальные амплитуды пульсации напряжения при открытии водопропускных отверстий по одну сторону от стенки можно полагать в полтора раза меньшими, чем указано на рис. 2, где приведе-

ны сведения об этих величинах, соответствующих одинаковому открытию водосбросов по обе стенки и отключенных турбинах. При включенных турбинах и открытых водосбросах по обе стороны от стенки амплитуды напряжений примерно на 10% меньше, чем при отключенных турбинах.



**Рис. 2.** Максимальные амплитуды пульсации напряжений в основании разделительной стенки в зависимости от величины открытия затворов водосброса

На рис. 3 представлена спектральная плотность пульсации напряжений в основании стенки для ряда гидравлических режимов в нижнем бьефе ГЭС. Из графиков, приведенных на этом рисунке, следует, что преобладающая доля дисперсии пульсации напряжений (80...90%) при наиболее неблагоприятных режимах (при большом открытии водосбросов) приходится на узкий диапазон частот (до 5,0 Гц). На частотах, близких к частотам собственных колебаний стенки, дисперсия составляет 10...20%. То есть можно полагать, что в таких гидравлических режимах разделительная стенка подвержена в основном не резонансным (как это можно было полагать по результатам наблюдений в натуре при малом открытии затворов), а вынужденным колебаниям. Это обстоятельство подтверждается и характером функции распределения спектральной плотности пульсации давления на стенку, гра-

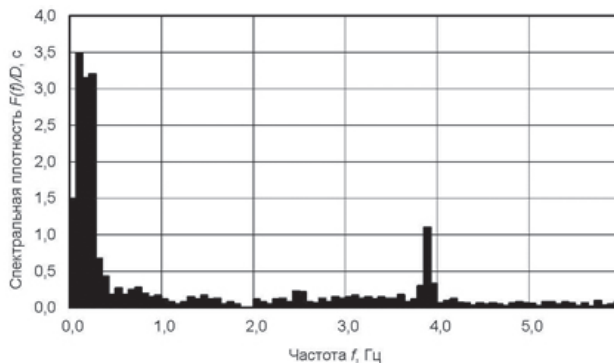


Рис. 3. Спектральная плотность пульсаций напряжений

фик которой приведен на рис. 4, по которому можно заключить, что основной вклад пульсационных нагрузок на стенку приходится на частоты до 0,5 Гц.

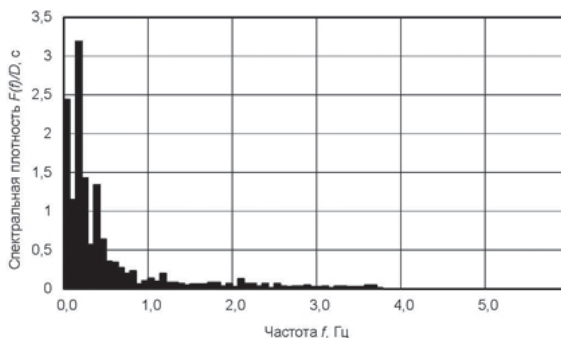


Рис. 4. Спектральная плотность пульсаций давления

Оценки прочности отдельных стенок, произведенные по результатам исследования их напряженного состояния под действием гидродинамических нагрузок, свидетельствуют о том, что сохранность стенок может быть обеспечена при открытии водосбросов не более, чем на 1,0 м, когда напряжения, определяемые стационарными нагрузками, не превышают 0,5 МПа, а амплитуда пульсации давления — 0,6 МПа. При пропуске расходов, близких к максимальным расчетным, можно ожидать опрокидывания стенок.

В связи с этим были рассмотрены мероприятия по повышению их надежности. При разработке этих мероприятий учитывались следующие обстоятельства:

реконструкция устройств в нижнем бьефе ГЭС должна быть выполнена без его осушения;

во время реконструкции нежелательна остановка ГЭС;  
в период реконструкции следует обеспечить пропуск паводков.

Этим требованиям соответствует использование распорных горизонтальных балок, расположенных выше максимальных уровней воды в нижнем бьефе, связывающих стенки между собой и с береговыми устоями. Предложено использовать балки в виде металлических труб, заполненных бетоном.

Применение распорных балок повысило частоту собственных колебаний отдельных стенок в воздухе в натуре примерно до 18,0 Гц, а в воде — до 14,0 Гц (примерно в 3,5 раза по сравнению с исходным конструктивным решением), так что отклик на собственной частоте колебаний (резонанс) практически не наблюдается. Размах колебания верхней части стенки при одинаковых гидравлических режимах по обе стороны от нее уменьшились почти в 6 раз. При этом включение турбин практически не сказывается на этих колебаниях. Амплитуды пульсации напряжения в основании отдельной стенки уменьшились в 2,5...3,0 раза. Ширина функции спектральной плотности не превышает 6,0 Гц, причем 85...90% дисперсии пульсации напряжений сосредоточено в диапазоне частот до 0,5 Гц.

Произведенные расчеты, основанные на данных выполненных исследований, показали, что при использовании распорных балок безопасность отдельных стенок обеспечивается. В связи с этим был выполнен проект реконструкции устройств нижнего бьефа, и в 1996 году он осуществлен на Ходжикентской ГЭС (рис. 5 на цветной вкладке).

**Саяно-Шушенская ГЭС** – крупнейшая гидроэлектростанция в России – построена в верхнем течении р.Енисей. Расчетный максимальный сбросной расход через гидроузел при ежегодной вероятности превышения 0,01% с гарантийной поправкой составляет 13 300 м<sup>3</sup>/с.

Для пропуска паводковых вод на Саяно-Шушенском гидроузле устроен эксплуатационный водосброс, состоящий из 11 водосбросных отверстий размером  $B \times H = 5,4 \times 8,2$  м, заглубленных ниже отметки НПУ на 61,0 м. При создании водосбро-

са на гидроузле был реализован принципиально новый, не имеющий аналогов в мировой практике, безнапорный водосброс с течением по потолку. Водосброс состоит из закрытого участка и сопрягающегося с ним открытого лотка, располагаемого на низовой грани плотины. Закрытый участок водосброса включает короткий горизонтальный напорный участок, где располагаются регулирующие затворы, и безнапорный криволинейный участок, в пределах которого осуществляется вертикальный поворот потока. В отрывную зону за затвором организован подвод воздуха через специальную аэрационную систему. Гашение энергии сбросного потока осуществляется в едином водобойном колодце.

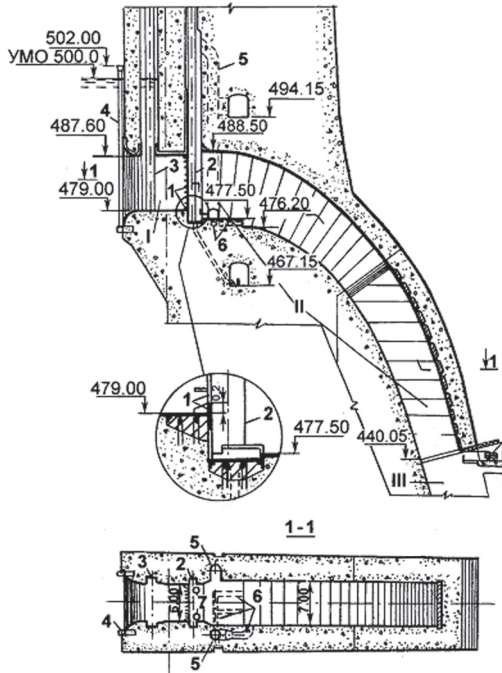
Конструкцией эксплуатационного водосброса предусмотрен подвод воздуха в затворную камеру из общей аэрационной шахты по трем каналам (рис. 6):

через нишу с низовой стороны рабочего затвора. Данный воздуховод имеет наибольшее поперечное сечение и обладает минимальным гидравлическим сопротивлением. Воздух, поступающий по данному каналу, сосредотачивается в основном над струей в верхней части затворной камеры;

через левый аэрационный воздуховод. Он предназначен для подвода воздуха в низовую часть затворной камеры непосредственно за перекрываемое затвором отверстие, оборудованное дефлектором;

через правый аэрационный воздуховод. Он соединяется с тремя каналами, расположенными в донном пороге затворной камеры. Данный аэрационный тракт имеет наибольшее гидравлическое сопротивление.

В соответствии с проектом эксплуатация водосбросов Саяно-Шушенского гидроузла предусматривалась при трех промежуточных открытиях затворов, равных соответственно 2,08 м, 3,015 м и 5,9 м, и полном открытии (8,2 м). Однако в процессе эксплуатации было установлено, что при открытии затворов на третьей ступени (5,9 м) в затворной камере возникают повышенное гидродинамическое воздействие потока, приводящее к повышенным вибрационным нагрузкам на конструкции и сооружения гидроузла. В частности, натурные испытания показали, что вибрации секций



**Рис. 6.** Водоприемник эксплуатационного водосброса Саяно-Шушенской ГЭС: I — напорный участок водосброса; II — закрытый безнапорный участок; III — открытый лоток; 1 — дефлектор; 2 — паз колесного (рабочего) затвора; 3 — паз аварийно-ремонтного затвора; 4 — паз ремонтного (прислонного) затвора; 5 — аэрационный трубопровод диаметром 1620 мм; 6 — каналы подачи воздуха под порог на отметке 477,50 м

плотины увеличиваются в 1,5...2,0 раза, по сравнению с режимом при полном открытии [5]. Значительные нагрузки испытывают элементы перекрытия машинного зала: измеренные здесь прогибы пролетных строений значительно превышали нормативный показатель [6]. Поэтому в инструкции по эксплуатации водосбросов данное открытие было исключено, и рекомендовано переходить со второй ступени открытия затворов на полное, минуя третью ступень. Однако при этом оказалось невозможным обеспечить приемлемые условия для гашения энергии в водобойном колодце, особенно при пропуске расходов в диапазоне 3700...7500 м<sup>3</sup>/с. Исследования гидравлических режимов в водобойном колодце водосброса показали, что



если со второй ступени промежуточного открытия переходить на полное, то за открытым пролетом не образуется гидравлический прыжок из-за недостаточности глубины воды в колодце, а высокоскоростная струя, пролетая колодец, вылетает за пределы водобойной стенки. Данное явление наблюдалось при любой очередности открытия затворов. В случае открытия затворов со второй ступени на третью, а затем с третьей ступени на полное, в водобойном колодце достигается затопление струй с образованием гидравлического прыжка. Поэтому, для достижения благоприятных гидравлических режимов в водобойном колодце необходимо обеспечить возможность пропусков расходов при третьей промежуточной ступени открытия затворов [7].

С целью изучения причин повышенного гидродинамического воздействия потока в затворной камере при частичном открытии затворов, вызывающего значительную вибрацию, и разработки конструктивных мероприятий по устранению или снижению негативных последствий этого явления, была построена фрагментная модель затворной камеры и закрытого участка водосброса в масштабе 1:25. Модель была оснащена плоским колесным затвором, изготовленным по специальной технологии с воспроизведением его гидроупругих свойств [8].

Результаты экспериментальных исследований эксплуатационного водосброса показали следующее:

в пределах затворной камеры над струей формируется пульсирующее пониженное (вакуумметрическое) давление, величина которого периодически изменяется от некоторого максимального значения, зависящего от режима работы водосброса, почти до нуля. Изменение вакуума непосредственно за затвором достигает максимальных значений порядка 20,0 кПа при степени открытия затвора  $n = 0,5 \dots 0,65$ . По мере увеличения открытия вакуум за затвором уменьшается. Под струей непосредственно за порогом изменение давления также носит пульсирующий характер, но оно существенно выше и колеблется в среднем в пределах атмосферного давления;

основная часть вовлекаемого воздуха поступает в верховую часть затворной камеры через нишу с низовой стороны затвора. Количество воздуха, поступающее в затворную камеру через левый воздуховод, выпускное сечение которого распо-

ложено на боковой стенке над донным порогом, незначительно и не превышает 10...15% от общего расхода воздуха. Через правый воздуховод во всем диапазоне открытий затвора воздух практически не поступает. Наибольший расход воздуха, вовлекаемого в водосброс, по данным измерений на модели составляет порядка 500,0 м<sup>3</sup>/с. Область наибольшей воздухововлекающей способности водосброса наблюдалась при открытиях затвора в диапазоне  $n = 0,5...0,8$ ;

наибольшие пульсации давления в точках потолка закрытого участка регистрировались при открытиях затвора в диапазоне от 0,5 до 0,75, достигая наибольших значений при  $n = 0,6$ . Определено, что при частичных открытиях менее 80% сопряжение потока с потолком закрытого участка водосброса носит явно выраженный ударный характер с возникновением значительных выбросов. При больших открытиях, близких к полному, происходит более плавное сопряжение потока, и уровень пульсаций существенно уменьшается. Пульсационный процесс в закрытом участке водосброса является низкочастотным с ведущими частотами порядка 0,1...0,2 Гц. Установлено что до 90% энергии пульсации приходится на диапазон частот от 0 до 8,0 Гц. Используя метод расчета временного ряда суммарной пульсационной нагрузки по значениям временных рядов пульсаций давления в точках, были определены стандарты суммарной пульсационной нагрузки. Полученные данные, показанные на рис. 7 а (на цветной вкладке), подтвердили сделанный ранее вывод об увеличении пульсационной нагрузки при промежуточных открытиях затвора. Так, например, при 60% - ном открытии величина пульсационной нагрузки оказывается в несколько раз больше, чем при полном открытии затвора. Если сравнить нагрузку, соответствующую второй (37%) и третьей (72%) ступеням открытия, то ее величина в последнем случае возрастает примерно в 2 раза. По-видимому, это основная причина, приводящая к повышенной вибрации сооружений ГЭС при эксплуатации водосброса при третьей ступени открытия;

частотный состав динамических напряжений (вибраций) секций затвора практически не зависит от степени открытия затвора. Диапазон ведущих частот составляет 0,4...0,5 Гц. Сопоставление экспериментальных спектров вибраций сек-

ций затворов с натурными данными, приведенными в отчете [5], показывают близкое совпадение. Отличие наблюдается в области низких частот менее 1 Гц, что объясняется существенным занижением амплитуд низкочастотных колебаний электродинамическими датчиками, используемыми в натуральных испытаниях. Взаимосвязь между пульсациями потока в затворной камере водосброса и вибрацией секций затвора (в форме резонанса) установлена не была;

при любом открытии затвора поток выходит в затворную камеру в виде свободной гидравлической струи со средней скоростью течения порядка 35,0 м/с (рис. 8 на цветной вкладке). За дефлектором, установленном в выпускном отверстии, происходит пространственное расширение струи и ее последующее соударение с потолком и боковыми стенками закрытого участка. Режим течения потока непосредственно за затвором — безнапорный. При этом вокруг струи формируется пониженное по сравнению с атмосферным (вакуумметрическое) давление. Процесс течения сопровождается значительным вовлечением воздуха. На захват воздуха в безнапорном сбросном сооружении могут влиять, по крайней мере, четыре фактора, имеющие различную физическую природу: локальный захват воздуха возмущенным потоком за затвором, связанный с конструкцией затвора и затворной камеры; захват воздуха раздробленным потоком воды; вовлечение воздуха внутрь потока воды — самоаэрация; движение воздуха над (или под) свободной поверхностью. Поток воды после смешения с воздухом «разбухает» и заполняет практически все поперечное сечение закрытого участка водосброса. Водовоздушная смесь, характеризующаяся переменной плотностью, движется далее по закрытому участку водосброса и попадает в открытый лоток. При этом над поверхностью безнапорного потока устанавливается нормальное атмосферное давление.

Таким образом, движение потока в пределах закрытого участка водосброса схематически можно представить, как состоящее из двух зон с напорным режимом течения (зоны I и III, см. рис. 8 на цветной вкладке), между которыми имеется безнапорная зона со свободной струей (зона II). При этом существенное влияние на условия течения в пределах обоих

напорных участков оказывает величина давления в пространстве со свободной струей непосредственно за затвором.

Экспериментальные исследования показали, что в пределах затворной камеры формируется пульсирующее вакуумметрическое давление, величина которого периодически изменяется от  $p_{max} = \rho g h_{\text{вак max}}$  до  $p_{min} = 0$ . Величина вакуумметрического понижения давления  $h_{\text{вак}}$  под и над струей имеет различные значения и зависит от степени открытия затвора. Причем над струей значение вакуумов существенно больше. Периодическая пульсация вакуумметрического давления определяет кинематику потока в пределах закрытого участка. В момент времени, когда над струей формируется максимальное вакуумметрическое давление  $h_{\text{вак max}}$ , скорость потока, вытекающего из-под затвора, составляет

$$v_{3 \text{ max}} = \varphi \sqrt{2g(z_1 + h_{\text{вак max}})}, \quad (2)$$

где  $\varphi$  — коэффициент скорости, при постоянном открытии затвора  $\varphi = \text{const}$ ;  $z_1$  — перепад между уровнем верхнего бьефа и горизонтальной осью, проведенной через центр тяжести открытого отверстия (см. рис. 8 на цветной вкладке);  $h_{\text{вак max}}$  — максимальное вакуумметрическое давление в метрах водяного столба.

Скорость потока на выходе из закрытого участка водосброса будет равна:

$$v_{\text{лот min}} = \varphi_1 \sqrt{v_3^2 + 2(g - a_{\text{вак}})z_2}, \quad (3)$$

где  $\varphi_1$  — коэффициент скорости закрытого участка водосброса;  $z_2$  — перепад между центром тяжести открытого отверстия и выходным сечением закрытого участка;  $a_{\text{вак}}$  — дополнительное ускорение, обусловленное разностью давлений во входном и выходном сечениях. В случае течения из области более низкого давления в область более высокого оно имеет отрицательное значение. Его физический смысл заключается в том, что формирующийся на участке течения градиент давления создает дополнительное сопротивление, т.е. вакуум как бы притормаживает движение.

После исчезновения вакуума за затвором, когда здесь устанавливается давление близкое к атмосферному, зависимо-

сти (2) и (3) принимают вид:

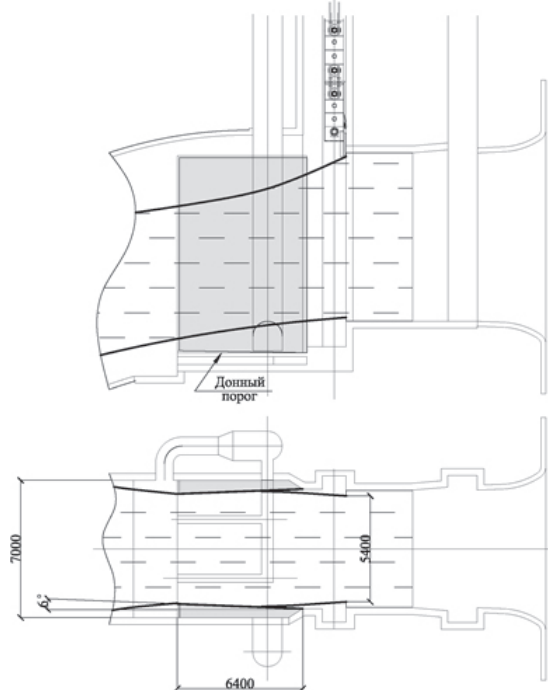
$$v_{3 \min} = \varphi \sqrt{2gz_1} \quad (4)$$

$$v_{\text{лот max}} = \varphi_1 \sqrt{v_3^2 + 2gz_2} \quad (5)$$

Из анализа вышеприведенных зависимостей следует, что при нарастании вакуумметрического давления за затвором поток вытекает из регулируемого отверстия с увеличивающейся скоростью, а в пределах закрытого участка водосброса скорость его течения, наоборот, замедляется. В этот момент в затворную камеру вовлекается также наибольшее количество воздуха. После уменьшения вакуума скорость течения потока через регулируемое отверстие становится меньше, а на закрытом участке — больше. Одновременно существенно сокращается объем поступающего в затворную камеру воздуха. Периодическое нарастание и срыв вакуума приводит к тому, что движение потока приобретает импульсный характер. Отсюда был сделан вывод, что стабилизация течения потока в пределах закрытого участка водосброса, и соответствующий ему минимальный уровень гидродинамических нагрузок, могут быть достигнуты при ликвидации явления пульсации вакуума за затвором.

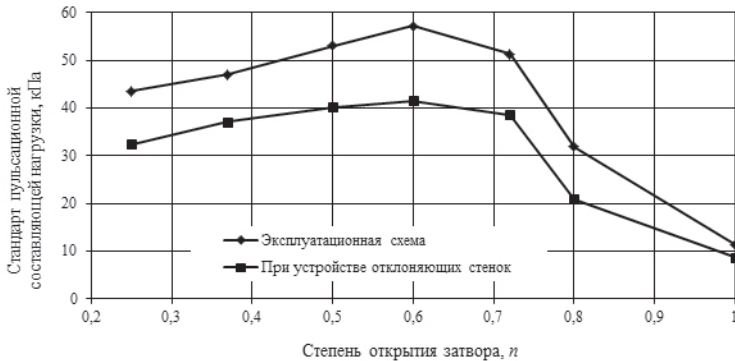
В условиях реального сооружения и с учетом конструктивных особенностей аэрационных трактов достичь этого оказалось возможным путем устройства в затворной камере отклоняющих элементов, устанавливаемых по всей длине донного порога на некотором удалении от боковых стенок затворной камеры. В этом случае в створе порога вокруг струи формируется воздушная кольцевая полость, объединяющая верхнюю часть затворной камеры с нижним подструйным пространством, формирующимся за порогом. Это наиболее простое и технологичное решение, позволяющее выровнять давление вокруг струи, ликвидировать пульсацию перепада давления и обеспечить стабилизацию режима течения потока в пределах закрытого участка водосброса. Рассмотрев различные варианты устройства отклоняющих стенок, на основании анализа результатов экспериментальных исследований установлено, что наиболее рациональным является их расположение

под углом  $6^\circ$  относительно боковых стенок закрытого участка (рис. 9). В этом случае полости за уступами, образуемые за отклоняющимися стенками, имеют достаточные размеры для сводного проникновения воздуха из верхней части затворной камеры в подструйное пространство.



**Рис. 9.** Схема установки боковых отклоняющих стенок в затворной камере

Исследования показали, что устройство отклоняющих стенок позволяет уменьшить пульсационную составляющую гидродинамической нагрузки в 1,5 раза в зависимости от режима работы водосброса (см. рис. 7 б на цветной вкладке, рис. 10). Снижение нагрузки происходит, с одной стороны, вследствие стабилизации струи, выходящей из-под затвора, а с другой — за счет некоторого повышения частоты пульсационных процессов, следствием чего является уменьшение значений коэффициентов осреднения при переходе от пульсаций давления в точке к суммарной нагрузке.



**Рис. 10.** Изменение стандартов осредненной пульсационной составляющей нагрузки, действующей на потолок закрытого участка водосброса, при различных открытиях затвора

В настоящее время СПКТБ «Ленгидросталь» разработан проект реконструкции затворной камеры, в котором реализовано данное конструктивное предложение.

**Жигулёвская ГЭС** — гидроэлектростанция на реке Волге в Самарской области, у городов Жигулёвск и Тольятти, введена в эксплуатацию в 1957 г. Она является второй по мощности и шестой ступенью Волжского каскада. Особенностью компоновки гидроузла является раздельное расположение на правом берегу здания ГЭС совмещенного типа и на левом берегу водосливной плотины, предназначенной для пропуска половодья (рис. 11 на цветной вкладке).

Бетонная водосливная плотина протяжением около 1 км состоит из 38 пролетов шириной по 20 м, перекрытых плоскими затворами (рис. 12 на цветной вкладке). На водобое плотины имеются устройства для гашения энергии в виде шашек против средних пролетов и растекателей — против крайних. К характерным особенностям плотины относятся: расположение на аллювиальных отложениях волжской поймы, относительно высокое положение плотины, значительные удельные расходы воды на рисберме, достигающие в расчетное половодье величин: средний —  $40 \text{ м}^2/\text{с}$ , локальный максимум — до  $52 \text{ м}^2/\text{с}$ .

При пропуске расходов воды через водосливную плотину Жигулевской гидроэлектростанции вибрация плит водобоя и плотины приводит к образованию и распространению упругих

поверхностных волн в основании плотины, вызывающие колебания жилых зданий г. Тольятти (Комсомольский район). Впервые вопрос о вибрации жилых зданий в Комсомольском районе г. Тольятти возник во время пропуска наибольшего после строительства ГЭС половодья 1979 г., когда уровень вибрации зданий стал наиболее ощутимым [9]. В ходе последующих натуральных исследований 1979 – 1980 гг. была установлена тесная связь между амплитудно-частотными характеристиками вибрации домов и источником вибрации — водосливной плотинной.

Установлено, что при пропуске расходов воды через плотинный водосброс основные гидродинамические нагрузки, связанные с воздействием турбулентного потока гидравлического прыжка, возникают на плитах водобоя за счет колебаний давления на поверхности плит. Изменения пульсации давления по длине водобоя таковы, что основная доля пульсационной нагрузки оказывается сосредоточенной на первой плите водобоя. Вследствие осреднения нагрузок по площади плиты спектр суммарной нагрузки имеет существенно более низкую преобладающую частоту, чем пульсация давления в точках. Плиты водобоя, лежащие на водонасыщенном грунте, являются острорезонансной системой и могут черпать энергию колебаний из относительно малых воздействий. Вследствие этих колебаний в грунте основания возникают и распространяются упругие поверхностные волны, которые вовлекают в колебания другие водобойные плиты, секции водосливной плотины, земляные сооружения и береговые массивы грунта. Вибрация плит водобоя и плотины приводит к образованию и распространению упругих поверхностных волн в основании плотины, вызывающие колебания жилых зданий г. Тольятти (Комсомольский район) [10].

С целью снижения нагрузки на водосливную плотину и для снижения уровня вибрации, было рекомендовано изменить порядок маневрирования затворами при пропуске паводков. Этот порядок в полной мере учтен в ныне действующей местной инструкции по пропуску паводков. Дополнительно, начиная с 2003 г., после длительного перерыва для пропуска части паводка стали использоваться донные водосбросы здания ГЭС, с одной стороны, обладающие недостаточной маневренностью и на-



дежностью гидромеханического оборудования, а с другой — приводящие к размывам нижнего бьефа и левого берега [9].

Возможности снизить уровень вибрации водосливной плотины и зданий в г.Тольятти за счет рационального изменения схемы пропуска половодья через створ гидроузла, пожалуй, полностью исчерпаны и оказались эффективными, однако, не в полной мере.

Основной причиной формирования колебаний является наличие сформировавшейся в данном районе динамической системы: водобой плотины – жилые здания с высоким коэффициентом динамичности. Решение указанной проблемы может быть найдено либо путем изменения упругих свойств (жесткости) непосредственно жилых зданий, либо путем изменения частотного состава возмущающей нагрузки, действующей на плиты водобоя. Последнее может быть достигнуто различными способами:

увеличение степени затопления гидравлического прыжка. В этом случае увеличиваются размеры вальца гидравлического прыжка и соответственно уменьшается скорость его вращения. Практически данное мероприятие позволит изменить частотный состав динамического воздействия на водобой не более чем на 20% в сторону уменьшения;

увеличение массы плит водобоя. Частота колебаний водобоя, как жесткого тела на упругом основании, обратно пропорционально в степени  $1/2$  его массе. Таким образом, чтобы уменьшить амплитуду вынужденных колебаний, например, в 2 раза, необходимо увеличить массу плит в 4 раза;

дробление потока на водобое с целью создания высокочастотных микровихрей. Это может быть достигнуто путем перевода половины сбросного потока из донного в поверхностный режим сопряжения, например, путем устройства на водосливной грани прорезных носков-трамплинов. В результате взаимодействия донного и поверхностного вальцов, вращающихся в противоположных направлениях, происходит дробление потока, а спектр динамической нагрузки смещается в область высоких частот и имеет более выраженные диссипативные свойства. Подобное решение реализовано на гидроузле Котешвар (Индия) [11], в проекте реконструкции Сурского

гидроузла, рекомендовано для водобойного колодца эксплуатационного водосброса Саяно-Шушенской ГЭС [7];

насыщение сбросного потока воздухом. Это может быть достигнуто путем устройства на водосливной грани трамплина аэратора. В результате перемешивания воды и воздуха сбросной поток приобретает упругие свойства, способствующие демпфированию пульсаций и соответственно уменьшению величины динамической нагрузки.

Из рассмотренных методов наиболее эффективным и практически осуществимым представляется путь изменения схемы сопряжения сбросного потока в пределах существующего водобоя в виде комбинации донного и поверхностного режимов. Поиск и оценка эффективности данного технического предложения должны быть выполнены на крупномасштабной гидравлической модели.

Вибрационные колебания, связанные с работой водосбросных сооружений, могут использоваться также и в положительных целях, например, для оценки текущего состояния системы «сооружение – основание».

Общеизвестно, что в процессе эксплуатации водосбросных сооружений на скальных основаниях первоначальные свойства последних изменяются, как правило, в сторону уменьшения несущей способности. Ухудшение свойств скальных оснований начинается с первых дней строительства, когда при разработке котлована под сооружение снимается слой ослабленных выветренных пород. При этом скальный массив разгружается и растрескивается. Далее по мере возведения сооружений и заполнения водохранилища основание проседает на большой площади. Вследствие этого в основании возникают растягивающие напряжения, развивается сеть вертикальных и горизонтальных трещин. На изменение физико-механических свойств оснований в процессе эксплуатации водосбросных сооружений существенное влияние оказывает сезонное колебание температур, воздействие микросейсм различного происхождения, в частности взрывы и удары, сбросы воды, работа машин, механизмов, в том числе гидроагрегатов ГЭС и др.

Согласно натурным наблюдениям, вибрационные нагрузки, сопровождающие нормальную эксплуатацию гидросооружений, вызывают изменение динамических свойств грун-

та основания и даже его структуры, разуплотнение контактной зоны, увеличение фильтрации в основании, повышение интенсивности вибрации, возникновение и развитие во времени резонансной раскачки массивных элементов сооружений и другие негативные эффекты [12].

Следовательно, для аргументированного прогноза долгосрочной эксплуатационной надежности водосбросных сооружений гидроузла, в том числе для прогноза поведения при пропуске экстремальных расходов, необходимо контролировать характеристики вибрации этих сооружений и изменение динамических характеристик системы «массивное сооружение – скальное основание».

Для контроля изменения во времени динамических характеристик системы «основание – сооружение» может применяться неразрушающий, так называемый, способ вибропросвечивания основания сооружений. Он основывается на известной зависимости между скоростью распространения упругих волн и физико-механическими свойствами среды, в которой они распространяются [13]:

$$E_{\text{дин}} = 2\rho(1 + \mu)k(\mu)v_R^2, \quad (6)$$

где  $E_{\text{дин}}$  — динамический модуль упругости грунта основания;  $\rho$  — плотность грунта основания;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $k(\mu)$  — функция коэффициента Пуассона;  $v_R$  — фазовая скорость распространения волн Релея.

При реализации указанного способа схему наблюдения строят так, чтобы регистрировать колебания сооружений, возбуждаемые упругими волнами, которые генерируются в основании. Приборы, например, виброизмерительные преобразователи для регистрации колебаний, устанавливают не на грунт, а непосредственно на сооружение. С их помощью регистрируют колебания сооружений как твердого тела на упругом основании и определяют скорости распространения упругих волн в основании сооружений, например волн Релея —  $v_R$  [14].

Неразрушающий способ вибропросвечивания скального основания прошел всесторонние испытания и использован при проведении исследований на Волховской, Братской, Красноярской, Усть-Илимской и Чарвакской гидроэлектростанциях.

В качестве примера ниже приведены результаты исследований водосброса II-го яруса **Чарвакской ГЭС**, предназначенного для пропуска паводковых расходов и, при необходимости, для частичного опорожнения водохранилища. Он запроектирован на пропуск расходов до  $1600 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Водосброс состоит из двух участков: напорного туннеля и открытой трубы. Участок напорного туннеля диаметром  $9,0 \text{ м}$  и длиной около  $310 \text{ м}$  имеет нулевой уклон. Входной оголовок туннеля расположен на  $\nabla 812,00 \text{ м}$  ( $\nabla \text{НПУ} = 890,00 \text{ м}$ ). В конце напорного туннеля устроена двухпролетная затворная камера, оборудованная двумя рядами затворов — плоскими аварийно-ремонтными и сегментными рабочими. За камерой по грунту основания уложена с уклоном  $i = 0,277$  открытая железобетонная труба длиной около  $200 \text{ м}$ , состоящая из 7 секций. Она имеет прямоугольное сечение и разделена внутренней стенкой на два водовода сечением  $8,0 \times 5,0$  каждый. Режим течения потока на участке открытой трубы безнапорный. Отметка дна в выходном сечении открытой трубы составляет  $\nabla 753,78 \text{ м}$ . К последней секции «открытой» трубы примыкает железобетонный отводящий лоток. Длина лотка —  $238,0 \text{ м}$ , ширина по дну —  $15,0 \text{ м}$ , заложение откосов —  $1 : 0,5$ , уклон —  $0,003$ . Падение потока, выходящего из «открытой» трубы, происходит в пределах водобойной секции отводящего лотка, отметка дна которой —  $740,28 \text{ м}$ . Водобойная секция (бывшая затворная камера водосброса I-го яруса) имеет длину —  $62,0 \text{ м}$ , высоту вертикальных стен в среднем —  $20,0 \text{ м}$ , толщину дна — от  $2,0$  до  $6,0 \text{ м}$ . Масса этой секции около  $35\,000$  тонн. Это наиболее нагруженный элемент водосброса, генерирующий в основании упругие волны (рис. 13).

Основание в районе отводящего лотка водосброса сложено из каранкулитов, средняя плотность которых равна  $2350 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Натурные наблюдения выполнялись в период 1975...1989 гг. Вибрационными испытаниями были охвачены затворная камера водосброса, последняя секция «открытой» трубы; водобойная секция и секции отводящего лотка. Расположение основных точек измерения показано на рис. 13.

В процессе проведения натуральных исследований производилась регистрация виброперемещений при пропуске 4 гидрав-

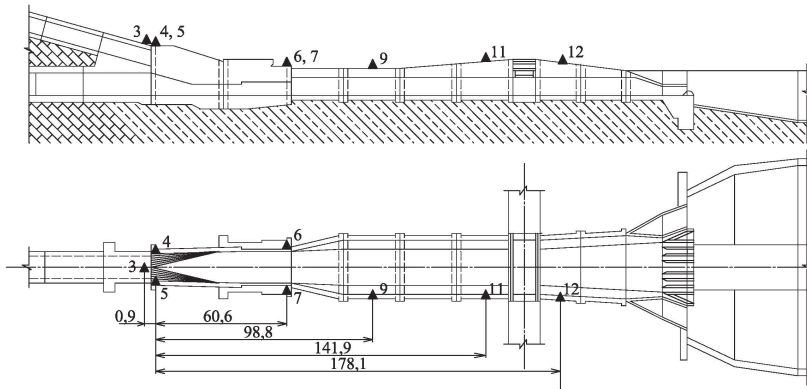


Рис. 13. Концевой участок эксплуатационного водосброса II-го яруса Чарвакской ГЭС. Точки измерения вибраций сооружения

лических режимов. Время запаздывания колебаний определялось по времени первого максимума  $\tau_{ij}$  взаимнокорреляционной функции колебаний, синхронно зарегистрированных в двух точках  $i$  и  $j$ . Применение такого способа дает хорошие результаты для процессов с явно выраженной синфазностью колебаний. По результатам измерений построен годограф, который связывает между собой времена запаздывания и расстояния от источника колебаний до точки наблюдения (рис. 14).

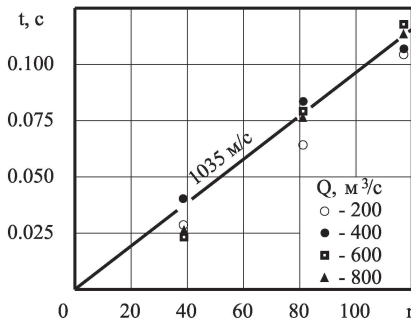
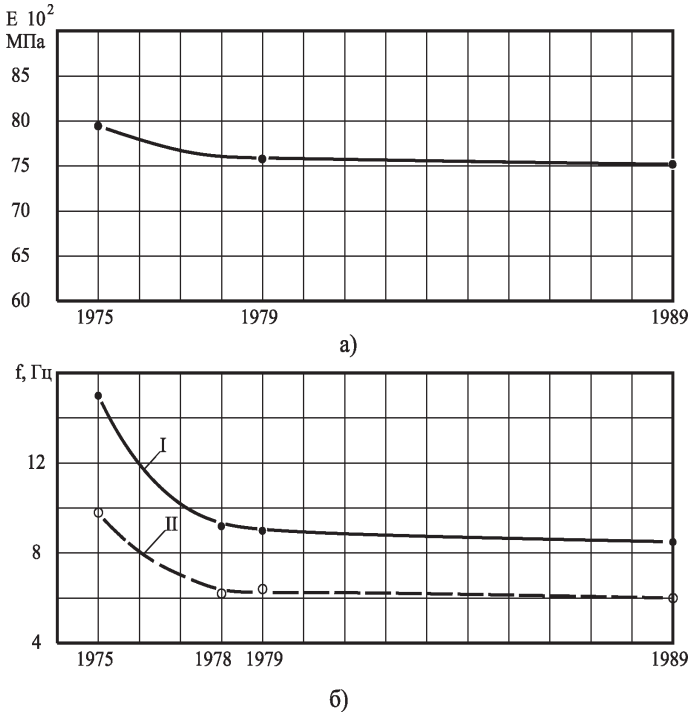


Рис. 14. Годограф упругих волн, распространяющихся в основании сооружения (измерения 1989 г.)

При известной скорости распространения упругих волн динамический модуль упругости грунта основания (рис. 15, а) определяется по зависимости (6). Косвенной характеристикой, позволяющей оценить изменения системы «основание – сооружение» является частотный состав вибрационных процессов (рис. 15, б)



**Рис. 15.** Изменение динамического модуля упругости основания (а) и средних частот нулей процесса вибрации сооружения (б):

- I — открытая труба, точка З, компонент z;
- II — водобойная секция, точка б, компонент z

Полученные результаты показывают, что за период эксплуатации, охваченный наблюдениями, динамические и вибрационные характеристики сооружений водосброса и его основания стабилизировались. Однако данный вывод не может являться окончательным, так как через водосброс в период наблюдений пропускалось не более 50% от величины расчетного расхода.

### Выводы

1. При работе водосбросных сооружений динамическое воздействие потока инициирует механические колебания конструктивных элементов проточного тракта и его основания. Возникающие при этом вибрационные процессы в значительной степени определяют надежность оборудования и безопасность эксплуатации гидроузла в целом. Выявление

механизмов возникновения вибраций является важнейшим этапом при проведении натурных наблюдений. В тоже время анализ гидродинамически возбуждаемых вибраций невозможен без описания процессов взаимодействия потока с обтекаемыми поверхностями механической колебательной системы. Такая информация в большинстве случаев может быть получена только на базе экспериментальных исследований.

2. Способность случайных гидродинамических нагрузок возбуждать и поддерживать вибрации определяется не только их абсолютными значениями, но и спектральным составом. Наибольшую опасность представляют резонансы в низкочастотной области, где, как правило, и располагаются собственные частоты сооружений. В случае возникновения негативных динамических процессов для их предотвращения могут рассматриваться различные подходы, предусматривающие либо изменение частотного состава нагрузки, либо изменение условий передачи нагрузки, либо изменение упругих свойств конструкций.

3. Вибрационные колебания, связанные с работой водосбросных сооружений, могут использоваться для оценки текущего состояния системы «сооружение – основание». Применение неразрушающего способа вибропросвечивания основания сооружений позволяет аргументированно прогнозировать долговременную эксплуатационную надежность водосбросных сооружений гидроузла.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Гидротехнические сооружения.** Часть 1 /Под ред. Л.Н. Расказова. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008.
2. **Рекомендации по натурным исследованиям и постоянным наблюдениям за вибрацией гидротехнических сооружений электростанций.** П 73-2000 / ВНИИГ, 2000.
3. **Лятхер В.М.** Турбулентность в гидросооружениях. – М.: Энергия, 1968.
4. **Kupriyanov V.P., Proudovsky A.M., Rodionov V.B., Voinov Y.P.** Estimation of safety of separating walls subjected to hydrodynamic loads within zones of energy dissipation //Proceedings of the International Symposium on New Trends and Guidelines on Dam Safety /Barcelona / Spain /17–19 June 1998.

- 5. Динамические** испытания сооружений водосбросного тракта, плотины и конструкций МАРХИ Машинного зала Саяно-Шушенской ГЭС. Технический отчет / СШГЭС. Черемушки, 1997.
- 6. Брызгалов В.И.** Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций. Производственное издание. – Красноярск, 1999.
- 7. Родионов В.Б., Куприянов В.П., Толошинов А.В.** Повышение безопасности Саяно-Шушенской ГЭС //Материалы научно-технической конференции. Гидроэнергетика. Новые разработки и технология. Санкт-Петербург: ВНИИГ им. В.Е. Веденеева, 2006. – Том 2.
- 8. Родионов В.Б., Куприянов В.П., Туманов И.В.** Гидродинамические исследования закрытого участка и затворной камеры эксплуатационного водосброса Саяно-Шушенской ГЭС //Материалы Четвертой научно-технической конференция. Гидроэнергетика. Новые разработки и технология. – Санкт-Петербург: ВНИИГ им. В.Е. Веденеева, 2009.
- 9. Симак С.В., Шумакова Е.М.** Гидрологические аспекты безопасности Жигулевской ГЭС и примыкающих к ней территорий //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 12. – №1(9), 2010.
- 10. Исследование** вибрации водосливной плотины с целью разработки новой схемы маневрирования затворами по снижению уровня вибрации водосливной плотины, грунтов, расположенных вблизи территорий и жилых зданий. Технический отчет /ОАО «НИИ-ЭС». – Волгоград – Москва, 2006.
- 11. Родионов В.Б., Куприянов В.П., Карпинская А.Г.** Выбор схемы устройства нижнего бьефа за водосливной плотиной гидроузла Котешвар //Изв. ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. – Т. 230. Ч.1, 1997.
- 12. Борзенко И.И.** Исследования колебаний и устойчивости массивных бетонных сооружений при динамических воздействиях. Диссертация на соиск. уч. степ. канд. техн. наук, 1976.
- 13. Методические** рекомендации по определению динамических свойств грунтов, скальных пород и местных строительных материалов: П 01-72/ВНИИГ. – Л.: Энергия, 1972.
- 14. Гончаров Л. А., Лентяев Л.Д., Семенков В.М.** Контроль поведения плотины и основания Красноярской ГЭС методом вибропросвечивания // Материалы конференций и совещаний. Натурные исследования как средство оперативного контроля безопасной работы гидротехнических сооружений. – Л.: Энергия, 1980.



**ГАШЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА НА  
ОТВОДЯЩЕМ ТРАКТЕ СТРОИТЕЛЬНОГО ТУННЕЛЯ № 3  
РОГУНСКОЙ ГЭС**

*Новикова И.С., кандидат технических наук,  
Максимович В.А., Федорков А.М., инженеры (АО «НИИЭС» )*

Объектом рассматриваемых исследований является строительный туннель № 3 (СТ-3), который появился в составе водосбросных сооружений в доработанном проекте Рогунской ГЭС [1] дополнительно к строительным туннелям СТ-1 и СТ-2 в связи с тем, что их пропускной способности не хватало для пропуска расчетного паводка при новых технических требованиях. Максимальный расход водосброса составляет  $3\ 500\ \text{м}^3/\text{с}$  при напоре на рабочие затворы 150 м и общем напоре на сооружение 200 м.

В проекте 2010 г. рассматривалась компоновка туннеля, включающая в себя глубинный водозабор, подводящий напорный туннель с поворотом в плане на  $53^\circ$ , камеру ремонтных затворов, камеру аварийно-ремонтных и рабочих затворов, безнапорный отводящий туннель с осевым потоком и концевой участок с трамплином (рис. 1 на цветной вкладке).

Строительный туннель № 3 (3-го яруса) должен пропускать меженные и паводковые расходы реки Вахш при наполнении водохранилища с УВБ=1 035,0 м до УВБ=1 185,0 м. В табл. 1 приведены расчетные расходы, которые должны проходить в паводок по р. Вахш в створе Рогунской ГЭС.

*Таблица 1*

Обеспеченность, %	<i>PMF</i>	0,01 с г.п.	0,01	0,1	0,5
$Q, \text{м}^3/\text{с}$	7500	5 990	5 810	4 520	3 910

Экспериментальные гидравлические исследования полной модели строительного туннеля СТ-3 в масштабе 1:80 проводились в лаборатории ОГИ АО «НИИЭС» (рис. 2 на цветной вкладке).

Проведенные исследования показали, что пропускная способность туннеля СТ-3 (рис. 3) зависит от режима течения на его начальном участке. При низких уровнях верхнего бьефа входной оголовок не затапливается, и пропускная способность тун-

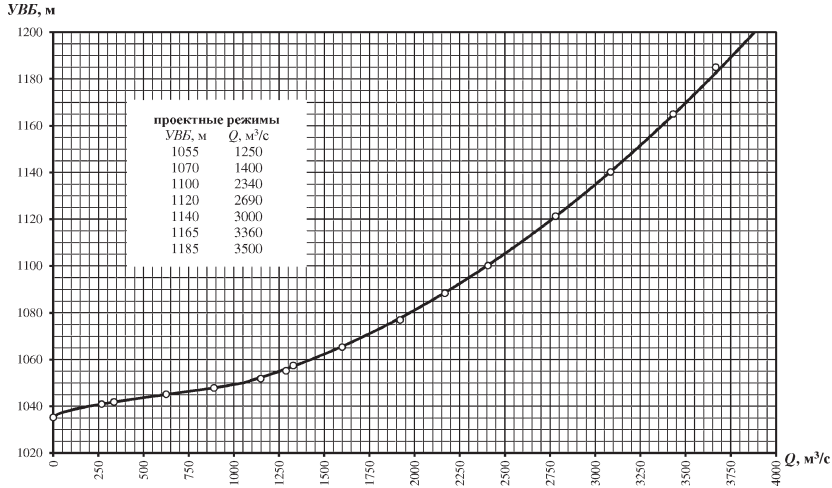


Рис. 3. Пропускная способность строительного туннеля СТ-3 (вариант с осевым потоком на отводящем безнапорном участке)

неля рассчитывается как для водослива с широким порогом шириной 14,0 м с модельным коэффициентом расхода  $m = 0,28$ .

После занaporивания входного оголовка при УВВ = 1 052...1 054 м весь подводящий участок туннеля до отверстий сегментных затворов работает в напорном режиме, и пропускаемый расход рассчитывается по формуле:

$$, \quad (1)$$

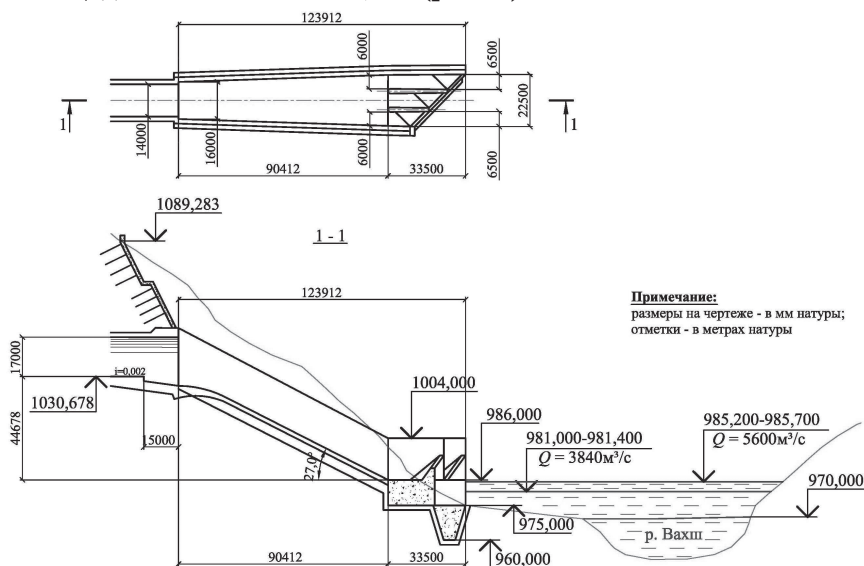
где  $\omega_3$  — площадь выходного сечения затворной камеры,  $\omega_3 = 4 \times 4,3 \times 5,2 = 89,44 \text{ м}^2$ ;  $\nabla_{\text{потолка}}$  — отметка потолка на выходе из затворной камеры, 1 038,48 м;  $\mu$  — коэффициент расхода водосброса, отнесенный к площади выходного сечения затворной камеры  $\omega_3$ , в напорном режиме по экспериментальным данным  $\mu = 0,77$ .

Гидравлические исследования традиционной компоновки водосброса с осевым потоком на отводящем безнапорном участке позволили оптимизировать конструкцию входного портала и затворных камер для пропуска расчетного расхода.

Сложности появились при создании приемлемого варианта сопряжения выходящего из туннеля потока с нижним бьефом реки Вахш.

На рис. 1 видно, что ось туннеля СТ-3 расположена под углом приблизительно  $80^\circ$  к направлению русла реки, в связи с чем сброс в реку потока с большими скоростями будет вызывать размыв и обрушение противоположного берега.

В соответствии с проектом, отводящий туннель с уклоном  $i = 0,002$  имел в выходном сечении отметку дна  $1\,030,68$  м; далее следовала аэрационная ступенька и расширяющийся быстроток с углом наклона к горизонту  $27,0^\circ$  до горизонтальной площадки с отметкой  $986,0$  м (рис. 4).



**Рис. 4.** Конструкция выходного портала строительного туннеля СТ-3 (вариант с осевым потоком на отводящем безнапорном участке, концевое сооружение прямое)

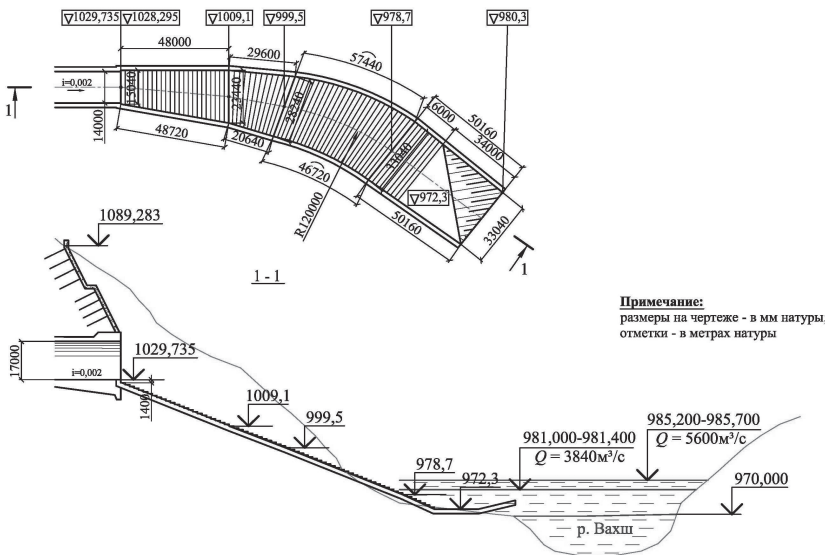
По данным исследований при максимальном расходе  $3\,500$  м<sup>3</sup>/с скорости на выходе из туннеля равнялись  $33,3$  м/с, а в конце быстроточа —  $44,7$  м/с.

Концевое сооружение было запроектировано аналогично конструкции быстроточа на ГЭС Корун [2; 3]. В конце быстроточа на модели устанавливались отклонители потока с наклонными гранями. Предполагалось, что они будут работать как трамплины, рассеивая и отклоняя струю сбрасываемого потока в русло реки. Однако на модели отклонители данного

типа, рассеивая струю, отклонить ее в русло не смогли. При расходе  $Q = 3\,500\text{ м}^3/\text{с}$  поток, разделяясь на три струи, бил в противоположный берег, доставая по высоте до абсолютной отметки — 990 м (рис. 5 на цветной вкладке).

Расчетная глубина размыва скалы в месте падения струй — 32,3 м. Размывы такой глубины могут привести к обрушению левого берега реки Вахш.

Другой исследованный на модели вариант концевого сооружения имел поворот в плане в правую сторону и ступенчатую водосливную поверхность (рис. 6). Правый поворот концевого сооружения был сделан для того, чтобы направление потока, выходящего из водосброса, было ближе к оси речного русла, а ступенчатая поверхность была предназначена для уменьшения скоростей, увеличения аэрации и выравнивания удельных расходов потока по ширине сооружения.



**Рис. 6.** Конструкция выходного портала строительного туннеля СТ-3 (вариант с осевым потоком на отводящем безнапорном участке, конечное сооружение с поворотом)

Ступенчатый быстроток действительно позволил частично развернуть поток вдоль русла (рис. 7 на цветной вкладке) и на 30% снизить максимальные скорости сбрасываемого в

реку потока, однако они оставались больше допустимых и не исключали глубоких размывов левого берега и русла.

В ходе проведенных исследований водосброса СТ-3 при его традиционной компоновке приемлемого решения для выходного портала найдено не было.

На основании полученных результатов было решено рассмотреть принципиально новую конструкцию водосброса с гашением кинетической энергии высокоскоростного потока не в русле реки, а внутри отводящего туннеля [4].

В данном проекте этот принцип реализуется также, как и в проекте эксплуатационного водосброса № 1 Рогунской ГЭС с помощью формирования закрученного потока на отводящем участке туннеля. В отличие от эксплуатационного водосброса № 1, где вода в узел закрутки поступает из вертикальной шахты, вода в отводящий туннель СТ-3 подается из наклонной шахты через узел закрутки (рис. 8 на цветной вкладке и рис. 9).

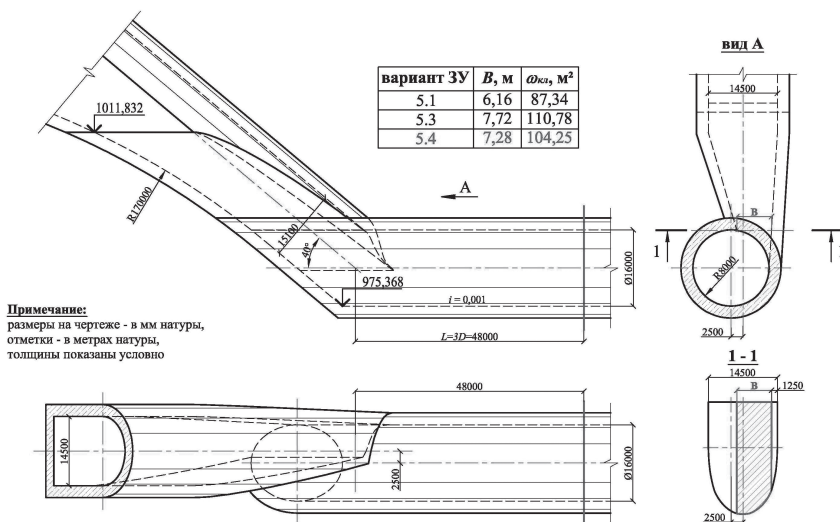


Рис. 9. Рекомендованная конструкция закручивающего устройства (ЗУ) строительного туннеля СТ-3 по варианту 5.4

Исследования показали, что в вертикальной шахте даже при расходах меньше  $500 \text{ м}^3/\text{с}$  устанавливается промежуточный бьеф, и он постепенно повышается при увеличении сбросных расходов.

В наклонной шахте промежуточный бьеф начинает формироваться только при расходах больше  $2\,000\text{ м}^3/\text{с}$  и зависит от площади ключевого сечения  $\omega_{\text{кл}}$  и геометрического параметра закрутки  $A$  [5]:

$$A = \frac{\pi e R}{\omega_{\text{кл}}} \cdot \sin \beta, \quad (2)$$

где  $e$  — эксцентриситет ключевого сечения относительно оси отводящего водовода;  $R$  — радиус начального цилиндрического участка отводящего водовода;  $\beta$  — угол между осями подводящего и отводящего водоводов.

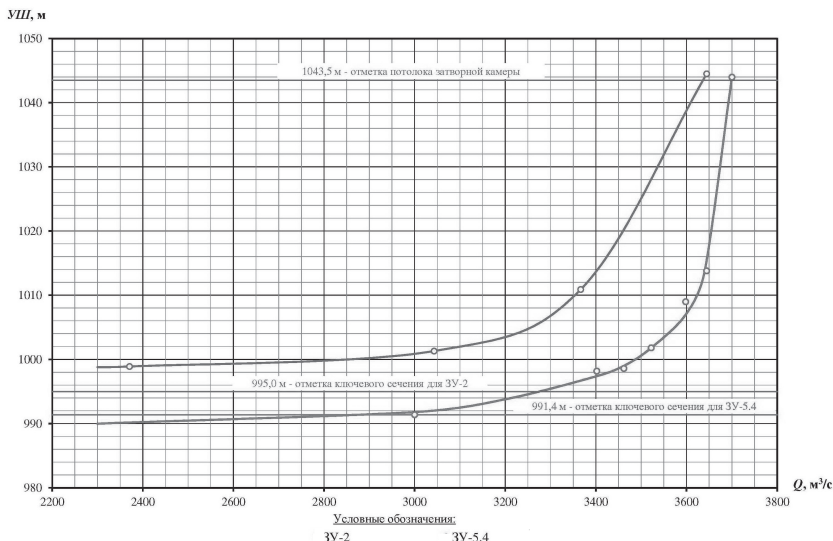
На разных этапах работы по теме рассматривались тангенциальные завихрители с различными характеристиками. В табл. 2 приведены характеристики исследованных вариантов узлов закрутки для строительного туннеля СТ-3.

*Таблица 2*

На рис.10 показано, как происходит нарастание уровня воды в шахте УШ при увеличении расхода для двух вариантов узла закрутки.

Из рисунка видно, что, начиная с некоторого расхода, нарастание уровня воды в шахте происходит очень быстро, а это может привести к непредвиденному затоплению затворной камеры, так как расстояние по высоте между порогом сегментного затвора и ключевым сечением для туннеля СТ-3 составляет всего 40 м. В связи с этим для дальнейшего проектирования рекомендуется вариант закрутки ЗУ-5.4 (см. рис. 9), при котором промежуточный уровень в шахте УШ не поднимался высоко и фиксировался на модели при максимальном расходе  $3\,500\text{ м}^3/\text{с}$  на отметке 1001 м.

Тангенциальный завихритель формирует в отводящем водоводе круглого сечения несимметричный вихревой поток с не-

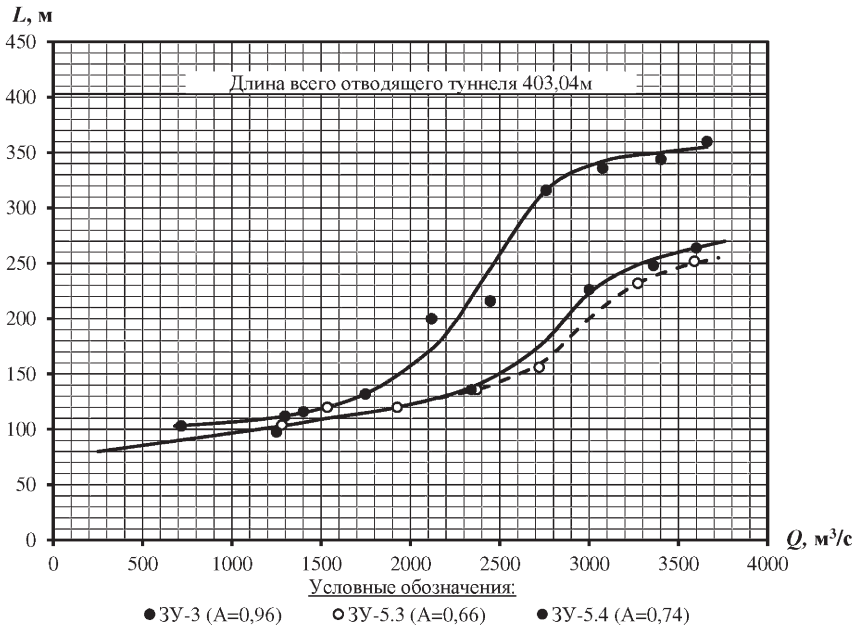
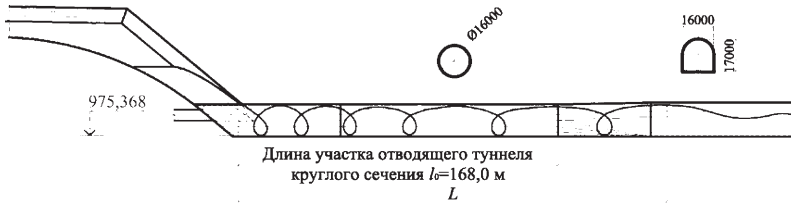


**Рис. 10.** Зависимость уровня воды в наклонной шахте УШ строительного туннеля СТ-3 от расхода воды  $Q$

заполненным водой вакуумным ядром. Чем больше параметр закрутки  $A$ , тем больше тангенциальные скорости на стенке водовода и меньше живое сечение потока воды в нем. Двигаясь по отводящему водоводу от закручивающего устройства, вихревой поток постепенно раскручивается. На некотором расстоянии от закручивающего устройства центробежные силы не могут удерживать поток по всему периметру поперечного сечения водовода. Происходит обрушение вихревого потока и переход его в осевой (рис. 11 на цветной вкладке). Длина участка с вихревым потоком зависит от начальной закрутки потока, сбросного расхода и формы сечения отводящего участка для туннеля СТ-3. Длина отводящего туннеля равна 402 м, что составляет  $25 d_m$  (где  $d_m = 16,0$  м — диаметр отводящего туннеля).

Для того, чтобы поток в туннеле успел раскрутиться, начальный параметр закрутки должен быть  $A \leq 1,0$  (рис. 12). При круглом сечении туннеля закрутка сохраняется дольше, при корытообразном сечении туннеля поток раскручивается быстрее (рис. 13).

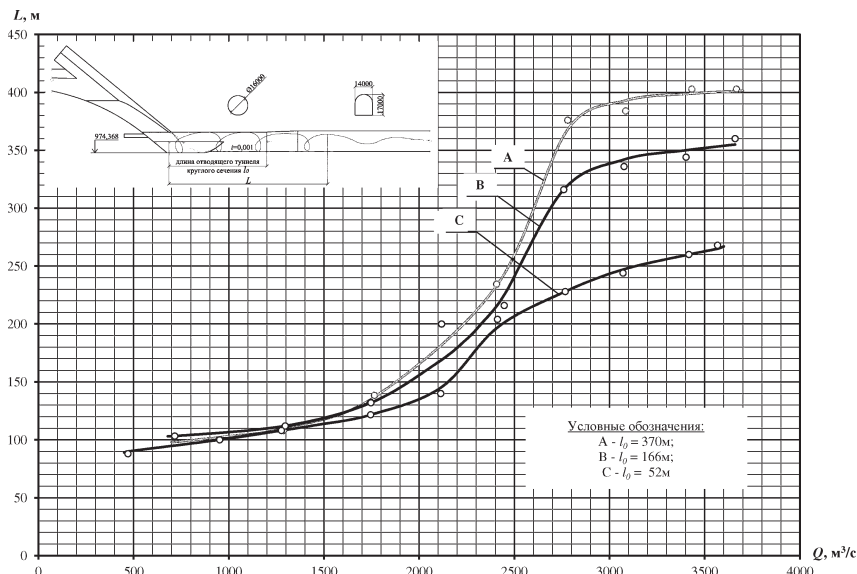
Исследования показали, что для туннеля круглого сечения (вариант А) уже при  $Q > 2\,800$  м³/с остаточная закрутка



**Рис. 12.** Зависимость длины участка с вихревым потоком  $L$  в отводящем туннеле СТ-3 от расхода воды  $Q$  и геометрического параметра закрутки  $A$

сохраняется до конца вплоть до бычка в водобойном колодце. Из-за этого вода в водобойный колодец практически поступает через один правый пролет. Раскрутка потока в туннеле корытообразного сечения (вариант С) происходит значительно интенсивней, поэтому первоначально было решено рекомендовать для дальнейших исследований этот вариант, при котором даже при расходе  $Q = 3\,500 \text{ м}^3/\text{с}$  осевой поток начинает выравниваться уже на длине 250 м от начала закрутки. Однако измерение давлений на облицовку туннеля показало, что переформирование потока на начальном участке в связи с





**Рис. 13.** Зависимость длины закрутки потока  $L$  от расхода воды  $Q$  для трех вариантов конструкции отводящего туннеля

изменением формы сечения приводит к образованию на поверхности зон с недопустимым отрицательным давлением до  $-4...-7 \text{ т/м}^2$ . Поэтому было решено удлинить участок с круглым поперечным сечением до 166 м (вариант В на рис. 13), что существенно уменьшило вакуумы за переходным участком.

На физической модели для рассматриваемых вариантов отводящего участка СТ-3 подробно рассматривались все проектные режимы течения и измерялись пьезометрические уровни по всей длине туннеля.

Особое внимание было обращено на наличие вакуумных зон и мероприятия по их ликвидации. Основным способом уменьшения вакуума в узле закрутки и на некоторых участках отводящего туннеля была подача воздуха в ядро закрученного потока.

Таким образом, для нормальной эксплуатации строительного туннеля СТ-3 его необходимо оборудовать аэрационной системой, обеспечивающей подачу воздуха в помещение аварийно-ремонтных и основных затворов, в пазы-аэраторы за сегментными затворами, в пазы-аэраторы перед наклонной

шахтой, а также в ядро вихревого потока в торце закручивающего устройства.

Поставленные на модели водосброса воздуховоды позволили ликвидировать вакуумы в затворной камере и наклонной шахте, а также уменьшить вакуумы в ядре вихревого потока и на стенках отводящего туннеля.

Измерения пульсаций давлений проводились на модели СТ-3 от камеры аварийно-ремонтных и рабочих затворов до конца отводящего туннеля. Записи пульсаций давлений проводились для нескольких характерных режимов с подачей и без подачи воздуха в ядро закрученного потока. Стандарты пульсаций гидродинамического давления и максимальные амплитуды в отводящем туннеле снижаются при подаче воздуха в ядро закрученного потока примерно в 2 раза. В закручивающем устройстве модели СТ-3 при пропуске расхода  $Q = 3\,500\text{ м}^3/\text{с}$  наблюдались стандарты пульсаций давления порядка 3% от действующего напора в ключевом сечении закручивающего устройства.

Туннель СТ-3 сбрасывает воду в реку Вахш с высоты 210 м, поэтому концевой участок водосброса является чрезвычайно ответственным сооружением. Он должен обеспечить приемлемые условия сопряжения вытекающего из водосброса потока воды с нижним бьефом, не допуская обрушения противоположного берега и подмыва водобойного колодца.

Замеренные на модели скорости на выходе из туннеля для варианта компоновки с закрученным потоком показали, что средние скорости потока на выходе из туннеля меняются от 18,8 м/с для расхода 1250 м<sup>3</sup>/с до 27 м/с для расхода 3500 м<sup>3</sup>/с.

По результатам проведенных исследований была разработана конструкция несимметричного водобойного колодца, ширина водосливного фронта которого на выходе в 3,9 раза больше, чем на входе (рис. 14). Соответственно при максимальном расходе 3 500 м<sup>3</sup>/с удельные расходы на водосливной стенке уменьшились до 58 м<sup>2</sup>/с, в то время как для компоновки с осевым потоком они были больше 100 м<sup>2</sup>/с.

На рис. 15 на цветной вкладке для максимального расхода приведены результаты измерений пьезометрических уровней и скоростей потока воды на входе и выходе из водобойного ко-

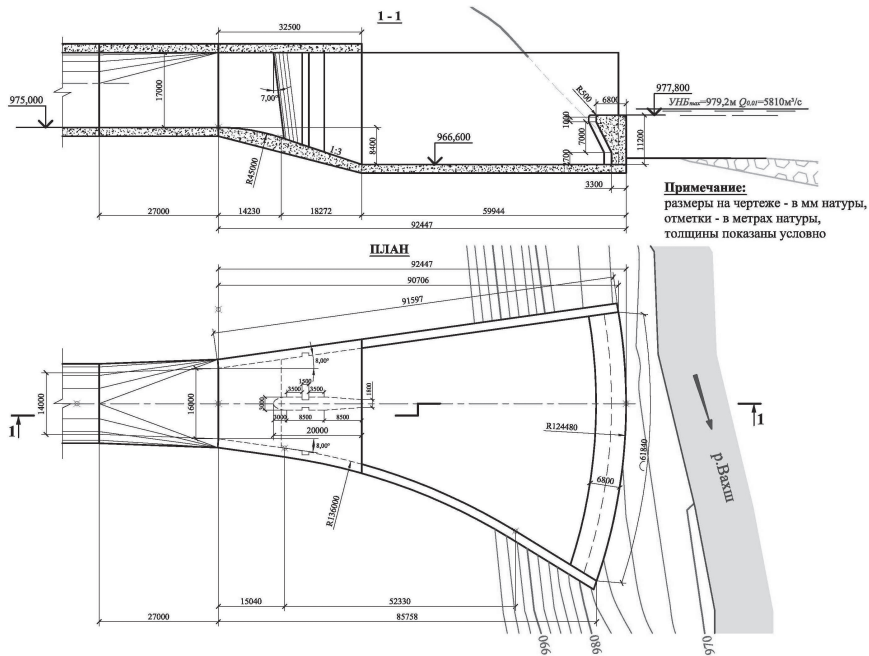


Рис. 14. Исследованная на модели конструкция несимметричного водобойного колодца с отметкой дна 966,6 м

лодца, а также в конце рисбермы за колодцем. Из рисунков видно, что в исследуемой конструкции скорости по длине водосливного фронта распределены достаточно равномерно, перекоп потока влево отсутствует. Максимальные скорости на выходе из колодца не превышают 9,5 м/с, а средние по створу – не больше 7,0 м/с. На рис. 16 приведена фотография режима течения потока на выходе из водобойного колодца в русло реки Вахш при проектном УВБ = 1 185 м.

Для обоих вариантов компоновки строительного туннеля №3 была проведена оценка способности гашения избыточной кинетической энергии потока в пределах водопроводящего тракта. В качестве створов для сравнения полных удельных энергий потока были взяты: створ отверстий сегментных затворов и створ на выходе из конечного сооружения в реку.

Коэффициент гашения энергии потока для традиционной компоновки с осевым потоком в отводящем туннеле СТ-3 с конечным сооружением в виде трамплина:



**Рис. 16.** Режим течения в реке Вахш при сбросе в нее расчетного расхода  $Q_{III} = 3\,500 \text{ м}^3/\text{с}$  из туннеля СТ-3: ( $УВБ = 1\,185 \text{ м}$ ;  $Q_{ГЭС} = 1\,500 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $УНБ = 977,8 \text{ м}$ )

$$\eta_1 = 1 - \frac{E_{\text{вых}}}{E_0} = 0,28. \quad (3)$$

Здесь  $E_0$  — полная удельная энергия потока в створе сегментных затворов, а  $E_{\text{вых}}$  — полная удельная энергия потока на выходе из быстротока в реку.

Коэффициент гашения энергии потока для варианта СТ-3 с наклонной шахтой и закручивающим устройством  $\eta_2 = 0,90 > \eta_1 = 0,28$ , что говорит о более эффективном гашении внутри водосброса избыточной кинетической энергии потока при его закрутке. При этом в отводящем туннеле с закрученным потоком гасится 69% энергии потока, выходящего из затворной камеры, а 21% гасится в водобойном колодце.

### Выводы

1. Альтернативный проект туннеля СТ-3, разработанный ОАО «Институт Гидропроект» совместно с АО «НИИЭС», реализует принципиально новый подход к проектированию высоконапорных водосбросных сооружений, который состоит в том, что гашение кинетической энергии потока должно происходить не в русле реки при сбросе туда потока с большими

скоростями, а внутри самого водосбросного тракта. В данном проекте этот принцип реализуется с помощью формирования закрученного потока в отводящем тракте туннеля.

2. Отводящий туннель за узлом закрутки рекомендуется выполнять переменного сечения: на длине 166 м за узлом закрутки — круглое сечение диаметром 16,0 м, далее следует переходной участок, а затем туннель корытообразного сечения шириной 14,0 м и высотой 17,0 м.

3. Исследования рекомендуемой компоновки туннеля СТ-3 показали, что максимальные средние скорости на выходе из туннеля при  $Q = 3\,500\text{ м}^3/\text{с}$  равны 27 м/с. То есть на участке от створа рабочих затворов до водобойного колодца внутри отводящего водовода гасится 69% начальной энергии потока.

4. Разработанная и исследованная на модели конструкция водобойного колодца с дном на отметке 958,0 м и водобойной стенкой на отметке 973,0 м позволяет погасить еще 21% от энергии потока, выходящего из затворной камеры. Максимальные скорости на выходе из колодца не превышают 9,5 м/с, а средние скорости в створе на водобойной стенке не больше 7,0 м/с.

5. Для нормальной эксплуатации туннеля СТ-3 его следует оборудовать аэрационной системой, обеспечивающей подачу воздуха в помещение аварийно-ремонтных и основных затворов, в пазы-аэраторы за сегментными затворами и пазы-аэраторы перед наклонной шахтой. Для ликвидации опасных вакуумов на отводящем участке туннеля необходимо подавать воздух в ядро закрученного потока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Рогунская ГЭС на реке Вахш в республике Таджикистан. Доработка проекта строительства ГЭС. Корректировка комплекса пуска первых агрегатов станции.** – М., ОАО «Институт Гидропроект», 2012.
2. **Войнов Ю.П., Куприянов В.П., Родионов В.Б.** Реконструкция водосброса ГЭС Корун // *Безопасность энергетических сооружений.* – М.: ОАО «НИИЭС», 1998.
3. **Новикова И.С., Максимович В.А., Федорков А.М.** Влияние конструкции концевое сооружения туннельного водосброса 3-го яруса Рогунской ГЭС на размывы русла и режимы сопряжения потоков в р. Вахш — НТК-7 // *Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии, Секция 2.* – С-Пб.: «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2013.

4. Галант М.А., Животовский Б.А., Новицова И.С., Родионов В.Б., Розанова Н.Н. Особенности вихревых туннельных водосбросов и гидравлические условия их работы //Гидротехническое строительство». – № 9, 1995.

5. НТО Гидравлические исследования строительного туннеля 3-го яруса и эксплуатационного водосброса № 2 Рогунской ГЭС в республике Таджикистан. Этап 13. Часть 1. «Гидравлические исследования строительного туннеля 3-го яруса». – М.: ОАО «НИИЭС», 2015.

### **РЕЗОНАНС В НАПОРНЫХ СИСТЕМАХ ГЭС С УРАВНИТЕЛЬНЫМИ РЕЗЕРВУАРАМИ**

*Берлин В.В., кандидат техн. наук, Муравьев О.А., доктор техн. наук, Голубев А.В., инженер (МГСУ, ООО «Белый уголь» )*

Рассмотрена реакция напорной системы с уравнительным резервуаром на периодические колебания пропускной способности турбины, вызываемые нестационарностью потока в отсасывающей трубе. Реакция напорной системы проявляется в колебаниях давления и расхода по длине водоводов. Показано, что в зависимости от соотношения длин турбинного и деривационного водоводов, а также типа уравнительного резервуара, напорная система может в разной степени усиливать или демпфировать колебания, проникающие в напорную деривацию.

В практике проектирования и строительства достаточно часто встречаются ГЭС с уравнительными резервуарами на подводящей деривации. В таких схемах уравнительный резервуар снижает гидравлический удар в напорной системе при переходных процессах сброса и набора нагрузки ГЭС.

В общих чертах картина работы узла примыкания резервуара такова: прямая волна, идущая от турбины, частично отражается от узла примыкания резервуара к деривации и не только возвращается к турбине с обратным знаком, а частично пройдет в деривационный водовод и в уравнительный резервуар, то есть возникает преломление волны гидроудара.

Для волны изменения давления, подходящей к резервуару со стороны турбины, коэффициент преломления  $s_T$  и коэффициент отражения  $r_T$  будут определяться выражениями [1]:

$$s_T = \frac{2F_{\text{турб}}/c_{\text{турб}}}{F_{\text{турб}}/c_{\text{турб}} + F_{\text{дерив}}/c_{\text{дерив}} + F_{\text{резер}}/c_{\text{резер}}}, \quad (1)$$

$$r_T = 1 - s_T, \quad (2)$$

где  $F_{\text{турб}}$ ,  $F_{\text{дерив}}$  и  $F_{\text{резер}}$  — площади сечений соответственно турбинного водовода, деривационного водовода и входного сечения резервуара;  $c_{\text{турб}}$ ,  $c_{\text{дерив}}$  и  $c_{\text{резер}}$  — скорости распространения волны изменения давления и скорости в каждом из ответвлений.

Выражения (1) и (2) показывают существенное влияние отношений площадей ответвлений, сходящихся в узле сопряжения резервуара с водоводами, на коэффициенты отражения и преломления волн. С ростом площади входного сечения резервуара и площади деривационного водовода коэффициент отражения возрастает. При большой входной площади резервуара коэффициент отражения близок к единице, и резервуар работает подобно бьефу с полным отражением волны.

В качестве исходной для анализа принята напорная система Зеленчукской ГЭС с длинами деривационного и турбинного водоводов 2458 и 980 м и уравнительным резервуаром с высотой столба жидкости в стояке в установившихся режимах около 70 м. В этой системе собственные частоты колебаний в турбинном водоводе  $f_{\text{турб}} = 0,3$  Гц, в деривации  $f_{\text{дерив}} = 1,12$  Гц, в уравнительном резервуаре  $f_{\text{рез}} = 3,3$  Гц, отношение  $f_{\text{турб}} / f_{\text{дерив}} = 2,5$ .

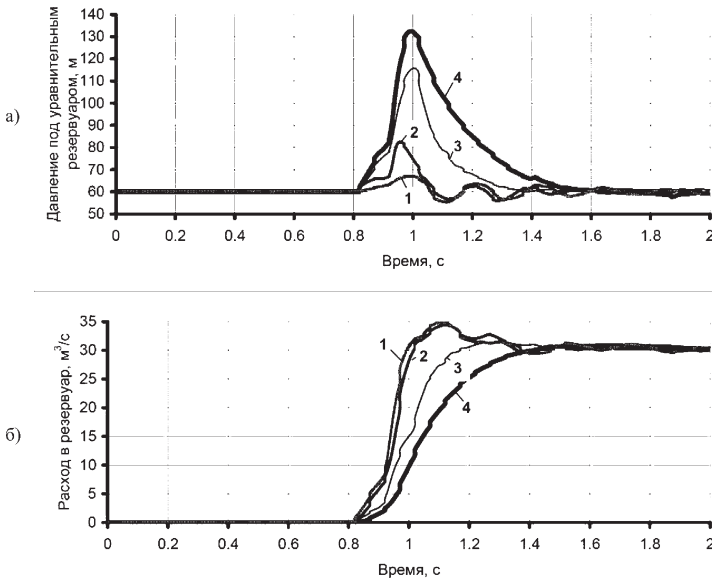
Напорная система рассматривалась с уравнительными резервуарами четырех типов. У уравнительного резервуара дифференциального типа с одинаковыми площадями сечений стояка, деривационного и турбинного водоводов и при равных скоростях волны коэффициент преломления составляет 0,89, а коэффициент отражения — 0,11. Такие же значения коэффициентов характеризуют и цилиндрический уравнительный резервуар с соединительным патрубком

У цилиндрического уравнительного резервуара без соединительного патрубка входная площадь будет равняться площади камеры резервуара. В расчетах принималось отноше-

ние площади сечения камеры резервуара к площади турбинного водовода  $F_{\text{камеры}}/F_{\text{Т.}} = 10$ . В условиях рассмотренной напорной системы при одинаковых значениях скорости волны гидроудара коэффициент преломления составил 0,23, а коэффициент отражения — 0,77.

У резервуара с дополнительным сопротивлением диаметр диафрагмы  $d_{\text{диафр}}$  принимался равным 0,3 от диаметра водоводов  $d_{\text{диафр}} = 0,3 D_{\text{водов}}$ . Соответственно коэффициенты преломления и отражения составили 0,957 и 0,043.

Динамические свойства колебательной системы определяются ее реакцией на два вида входных воздействий — единичный скачок и гармонические колебания. На рис. 1 показана реакция напорной системы с уравнительными резервуарами четырех различных типов на скачок — мгновенное изменение расхода турбины.



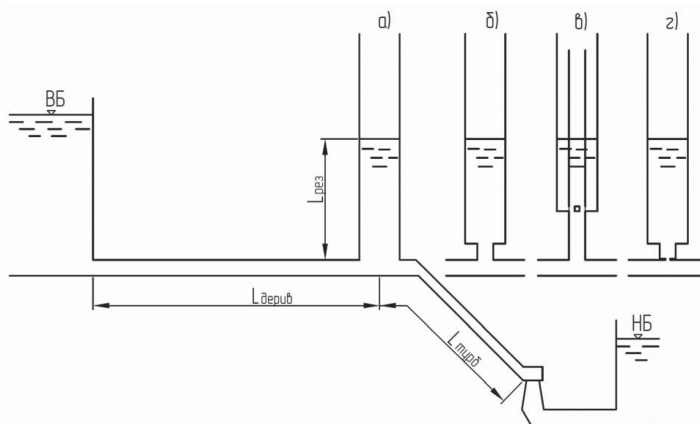
**Рис. 1.** Переходный процесс в узле сопряжения уравнительного резервуара с водоводами при единичном возмущении – скачке расхода у турбины: а) давление в узле под уравнительным резервуаром; б) расход в уравнительный резервуар; 1 — цилиндрический уравнительный резервуар; 2 — уравнительный резервуар с патрубком; 3 — дифференциальный уравнительный резервуар; 4 — уравнительный резервуар с дополнительным сопротивлением



Из рис. 1 видно, что при единичном скачке расхода резервуар с дополнительным сопротивлением допускает наибольший просок волны повышения давления в деривацию; немного меньше просок волны при дифференциальном резервуаре. В системе с цилиндрическим резервуаром просок незначительный и чуть больший при наличии входного патрубка.

Несмотря на то, что известны случаи резонансов при совпадении гармоник оборотной и жгутовой частот и как следствие — повышенных пульсаций давления в узловых сечениях по трассе [2], вопросам реакции на периодические возмущения уделяется меньше внимания.

В работе исследовалось поведение колебательной системы, состоящей из деривационного и турбинного водоводов и уравнительного резервуара (рис. 2) в условиях резонанса, когда частота возмущающего воздействия совпадает с собственной частотой составляющих напорной системы – турбинного водовода или уравнительного резервуара.



**Рис. 2.** Схема напорной системы с уравнительным резервуаром цилиндрическим (а), с соединительным патрубком (б), дифференциальным (в) с дополнительным сопротивлением (г)

Использовалась математическая модель, реализующая метод характеристик для решения волновых уравнений и учитывающая подробные характеристики водоводов, гидравлических сопротивлений, уравнительных резервуаров, гидротурбин [3].

Следует пояснить, почему в качестве возмущающего воздействия в основной серии расчетов принимались пульсации на собственной частоте турбинного водовода. В действительности жгутовые возмущения под рабочим колесом наблюдаются при разных частотах. Исследования их спектров показывают, что частота жгутовых возмущений в силу природы вихревого жгута обычно колеблется в небольшом диапазоне.

Анализ натуральных осциллограмм пульсаций давления в водоводе и отсасывающей трубе показывает, что при близости диапазона жгутовой частоты к собственной частоте турбинного водовода или ее гармоникам водовод поддерживает колебания на собственных частотах. Если же частота возмущений далека от собственных частот, то в водоводе происходят колебания на вынужденной частоте.

При первой серии расчетов в сечении у турбины генерировалось возмущающее воздействие в виде гармонических колебаний пропускной способности с амплитудой 1% от номинального расхода турбины и частотой  $f_{\text{возм}}$ , равной собственной частоте турбинного водовода  $f_{\text{турб}}$  в условиях частичного открытия направляющего аппарата.

При постоянной длине турбинного водовода  $L_{\text{турб}}$  длины деривации  $L_{\text{дерив}}$  принимались по соотношению  $L_{\text{дерив}} = n \cdot L_{\text{турб}}$ , где  $n = 1, 2, 3, 4$  и  $5$ , а при некоторых расчетах  $n$  принималось в диапазоне от 1 до 21. Соответственно собственные частоты деривации  $f_{\text{дерив}}$  принимали значения  $f_{\text{турб}}, 0,5f_{\text{турб}}, 0,333f_{\text{турб}}, 0,25f_{\text{турб}}, 0,2f_{\text{турб}}$  и т.д. То есть собственные частоты деривационного водовода задавались изменением его длины кратное длине турбинного водовода.

Расчеты проводились для четырех типов уравнильных резервуаров – дифференциального, с дополнительным сопротивлением, цилиндрического с соединительным патрубком и без него. При всех расчетах диаметры  $D$  водоводов, соединительного патрубка и стояка (у дифференциального резервуара) принимались равными, что близко к реальным конструкциям напорных систем. Диаметр диафрагмы в узле дополнительного сопротивления принимался  $d_{\text{диафр}} = 0,3D$ .

В табл. 1 и на рис. 3 показано распределение амплитуд пульсаций давления вдоль трассы турбинного и деривацион-

Таблица 1

**Максимальные амплитуды пульсаций давления в водоводах в % от напора турбины при  $f_{\text{возм}} = f_{\text{турб}} = 0,3$  Гц и различных соотношениях длин (и собственных частот) турбинного и деривационного водоводов**

$L_{\text{дерив}}/L_{\text{турб}}$	Максимальные амплитуды пульсаций давления в водоводах, % от напора турбины							
	Цилиндрический		С соединительным патрубком		Дифференциальный		С дополнительным сопротивлением	
	У турбины	В деривации	У турбины	В деривации	У турбины	В деривации	У турбины	В деривации
1	0,044	0,001	0,045	0,001	0,045	0,005	0,044	0,01
2	0,044	0,005	0,045	0,002	0,045	0,077	0,044	0,075
3	0,044	0,001	0,044	0,002	0,044	0,005	0,044	0,012
4	0,044	0,002	0,044	0,01	0,044	0,043	0,044	0,078
5	0,044	0,001	0,044	0,001	0,044	0,006	0,043	0,012

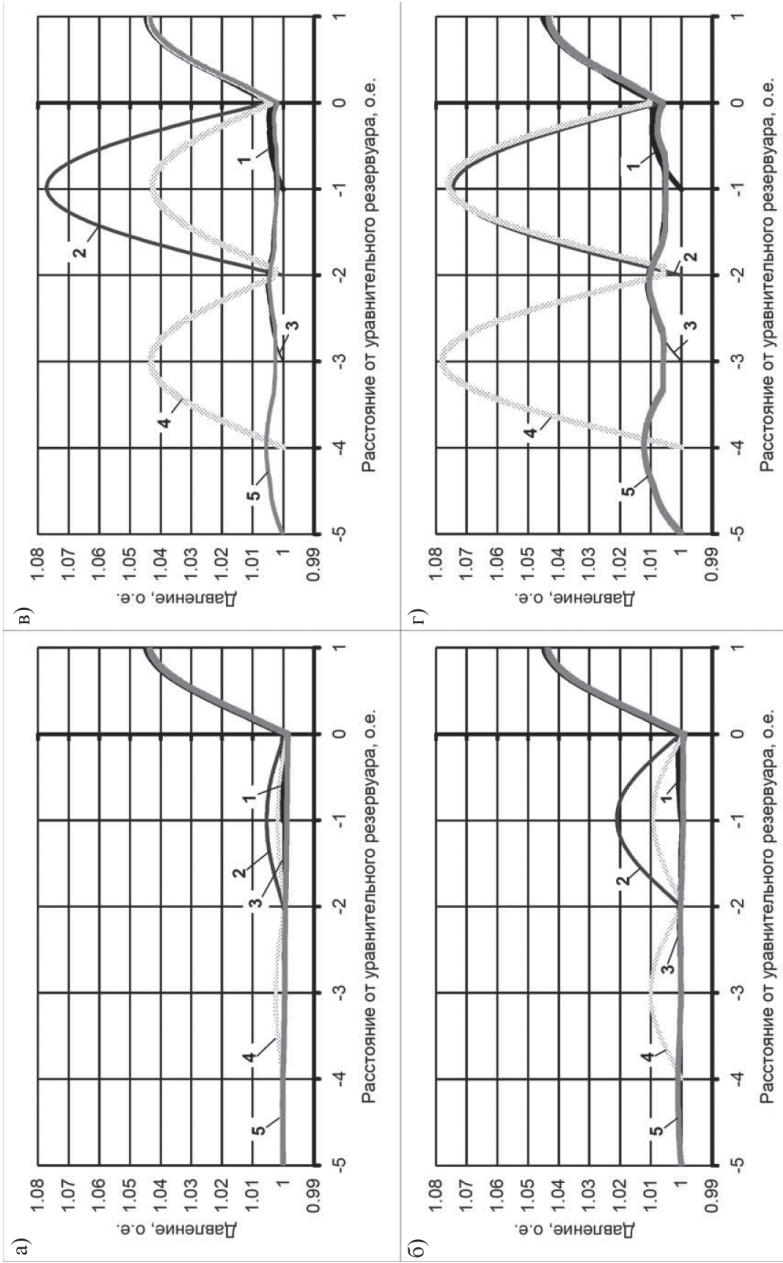
ного водоводов при  $f_{\text{возм}} = f_{\text{турб}} = 0,3$  Гц, различных длинах деривации и соответственно соотношениях собственных частот  $f_{\text{турб}}/f_{\text{дерив}} = 1, 2, 3, 4$  и  $5$ .

Картина распределения максимумов давления по длине в целом типична для подобных колебательных систем:

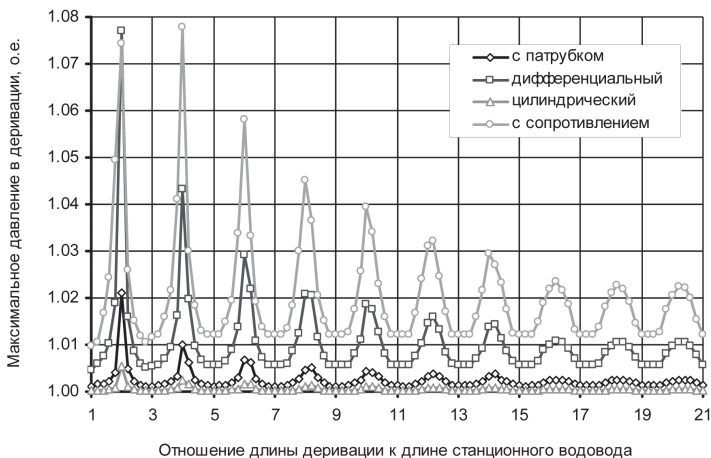
пульсации давления перед турбиной практически не зависят ни от конструкции уравнительного резервуара, ни от соотношения длин турбинного и деривационного водоводов;

в схемах с резервуарами дифференциальным и с дополнительным сопротивлением (диафрагмой) уровень пульсаций давления в деривации примерно одинаковый, но он значительно выше, чем при цилиндрическом резервуаре и резервуаре с патрубком.

На рис. 4 показаны максимальные амплитуды пульсаций давления при соотношениях  $L_{\text{дерив}}/L_{\text{турб}}$  от 1 до 21. Как видно: а) при нечетных значениях  $L_{\text{дерив}}/L_{\text{турб}}$  и в их окрестностях амплитуды пульсаций давления в деривации существенно ниже, чем при четных, и это следует учитывать при выборе расположения уравнительных резервуаров на трассе деривации; б) с ростом длины деривации более  $10L_{\text{турб}}$  максимумы амплитуд снижаются, а после  $16L_{\text{турб}}$  соотношение  $L_{\text{дерив}}/L_{\text{турб}}$  практичес-



**Рис. 3.** Эпюры максимумов давления по длине водоводов при частоте возмущений 0,3 Гц для схем с резервуарами цилиндрическим (а), с патрубком (б), дифференциальным (в), с дополнительным сопротивлением (г) при соотношениях частот  $f_{турб}/f_{дерив}$  ( $L_{дерив}/L_{турб}$ ) 1, 2, 3, 4 и 5

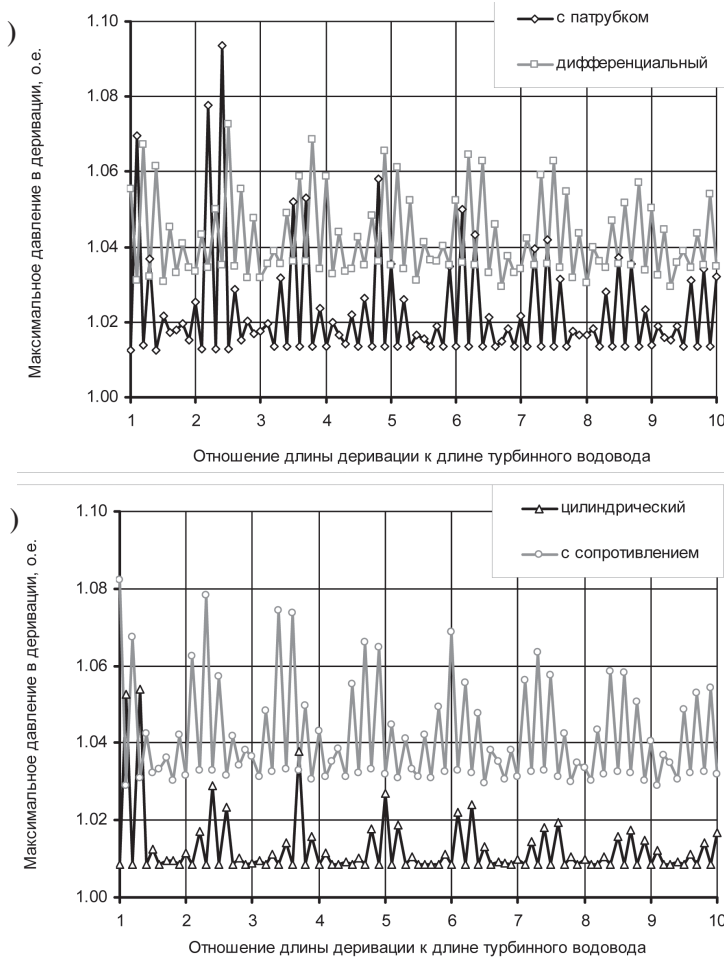


**Рис. 4.** Зависимость максимумов давления в деривации от соотношения между длинами деривационного и турбинного водоводов при частоте возмущения 0,3 Гц

ки перестает влиять на амплитуды пульсаций, значения которых стабилизируются в диапазоне от нуля до 0,022.

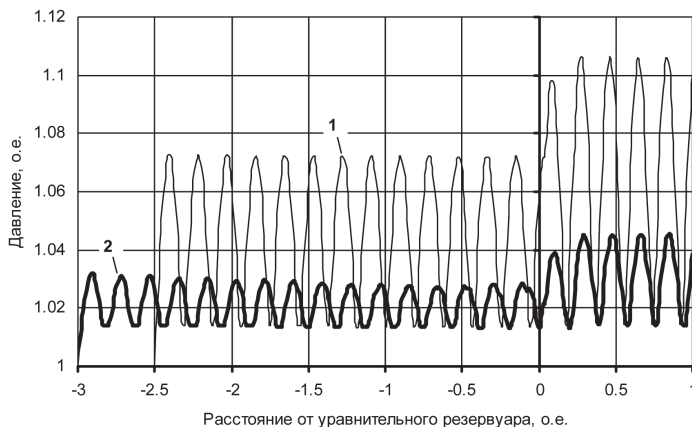
В реальных конструкциях высота стояка или собственно резервуара такова, что собственные частоты составляют 1...5 Гц и могут резонировать с гармониками возмущений на оборотной или жгутовой частотах при работе турбины. Поэтому вторая серия расчетов имела целью исследовать поведение системы при возмущениях на собственной частоте уравнительного резервуара, которая для конкретной рассматриваемой схемы составила  $f_{\text{возм}} = f_{\text{ур}} = 3,3$  Гц.

На рис. 5 показаны максимальные давления в деривации. Частота возмущающего воздействия на порядок больше собственной частоты водоводов, поэтому максимумы попадают внутрь целых отношений длин деривации и турбинного водовода. Однако можно отметить некоторые соотношения длин, при которых пульсации являются наибольшими. Наибольшие колебания давления, как в деривации, так и в турбинном водоводе, наблюдаются в системах с резервуарами дифференциальным и с дополнительным сопротивлением, а при короткой деривации – в варианте резервуара с соединительным патрубком. На рис.6



**Рис. 5.** Зависимость максимумов давления в деривации от соотношения между длинами деривационного и турбинного водоводов при частоте возмущения 3,3 Гц дифференциальный и с патрубком уравнительные резервуары (а), цилиндрический и с дополнительным сопротивлением уравнительные резервуары (б)

представлены максимумы давления по длине водоводов при возмущении на частоте 3,3 Гц для существующей напорной системы Зеленчукской ГЭС с отношениями частот  $f_{\text{турб}}/f_{\text{дерив}} = 2,5$  и уравнительным резервуаром дифференциального типа.



**Рис. 6.** Эпюры максимумов давления по длине водоводов для схемы с дифференциальным резервуаром при частоте возмущений 3,3 Гц и соотношениях частот  $f_{\text{турб}}/f_{\text{дерив}}$  ( $L_{\text{дерив}}/L_{\text{турб}}$ ) 2,5 (1) и 3 (2)

Как следует из графиков на рис. 5 и рис. 6, существующее отношение  $f_{\text{турб}}/f_{\text{дерив}} = 2,5$  дает наибольшие пульсации давления в деривации. Некоторое смещение уравнивающего резервуара по трассе деривации с изменением отношения частот до  $f_{\text{турб}}/f_{\text{дерив}} = 3$  снижает амплитуду пульсаций на собственной частоте резервуара более чем в 2 раза.

### Выводы

1. Реакция напорной системы на колебания пропускной способности турбины проявляется в колебаниях давления и расхода по длине водоводов. В зависимости от соотношения длин турбинного и деривационного водоводов, а также типа уравнивающего резервуара напорная система может в разной степени усиливать или демпфировать колебания, проникающие в напорную деривацию.

2. При проектировании напорных систем ГЭС и ГАЭС с уравнивательными резервуарами всегда возникает вопрос о его наиболее рациональном расположении на трассе деривации. Обычно стремятся поставить резервуар ближе к зданию станции, но на достаточно высоких отметках, чтобы не увеличивать высоту конструкции. Проведенное исследование предлагает учитывать еще один фактор — соотношение длин час-

тей напорного водовода перед уравнильным резервуаром и после него. Это соотношение, а также тип и конструкция уравнильного резервуара могут оказывать демпфирующее или стимулирующее влияние на распространение в деривации низкочастотных пульсаций давления, возбуждаемых жгутовыми возмущениями потока под рабочим колесом турбин, обратной частотой и их гармониками.

3. При проектировании целесообразно определять реакцию напорной системы на колебания давления и расхода, вызываемые низкочастотными возмущениями различного происхождения, корректируя положение уравнильного резервуара на трассе и его конструкцию так, чтобы уменьшить негативное влияние нестационарности потока на облицовку водоводов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аронович Г.В., Картвелишвили Н.А., Любимцев Я.К. Удар и уравнильные резервуары. – М.: Наука, 1963.
2. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося движения в трубопроводах. Пер. с англ. – М.: Энергия, 1981.
3. Берлин В.В., Муравьев О.А. Переходные процессы на ГЭС с уравнильными резервуарами. – М.: Энергоатомиздат, 1991.



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Раздел 1. Экологическая безопасность гидротурбинного оборудования ГЭС .....</b>	<b>3</b>
<i>Иванченко И.П., Пуцын Н.В., Мулин И.Б.</i> Конструктивно обусловленные нормы протечек турбинного масла в проточный тракт гидроагрегатов ГЭС .....	3
<i>Иванченко И.П., Пуцын Н.В., Мулин И.Б.</i> Оценка целесообразности использования новых типов турбинных масел в действующих гидроагрегатах .....	9
<b>Раздел 2. Безопасность сооружений гидроузлов и русел рек .....</b>	<b>16</b>
<i>Мельник Г.В.</i> Концептуальные положения действующих Методических рекомендаций по контролю технического состояния и оценке безопасности судоходных гидротехнических сооружений ..	16
<i>Николаев В.Б., Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Балагуров В.Б., Климов Е.А., Белов А.А., Барышников К.М.</i> Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций с внешним листовым армированием .....	32
<i>Базаров Д.Р., Хидиров С.К., Каххоров У.А., Дранун Д.</i> Проблемы эксплуатации защитных сооружений реки Амударья .....	37
<i>Ан Е.В.</i> Устойчивость подземных трубопроводов при продольных пульсирующих нагрузениях .....	43
<i>Куприянов В.П.</i> Водобросные сооружения гидроузла как источник гидродинамических воздействий .....	48
<i>Новикова И.С., Максимович В.А., Федорков А.М.</i> Гашение энергии закрученного потока на отводящем тракте строительного туннеля №3 Рогунской ГЭС .....	74
<i>Берлин В.В., Муравьев О.А., Голубев А.В.</i> Резонанс в напорных системах ГЭС с уравнительными резервуарами .....	87



Рис. 5. Ходжикентская ГЭС  
(изображение получено с использованием Google Earth)

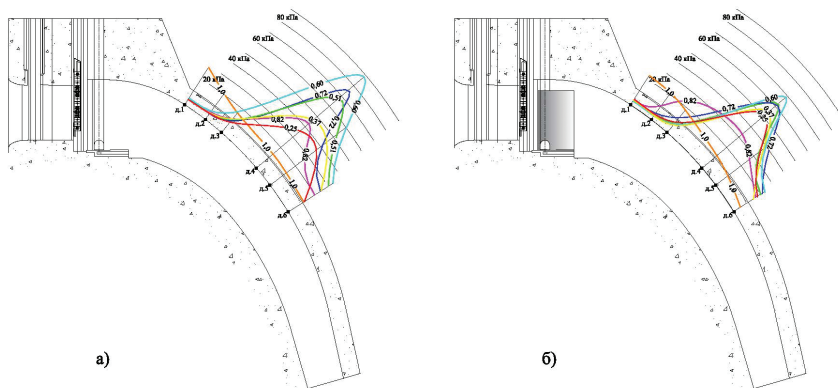
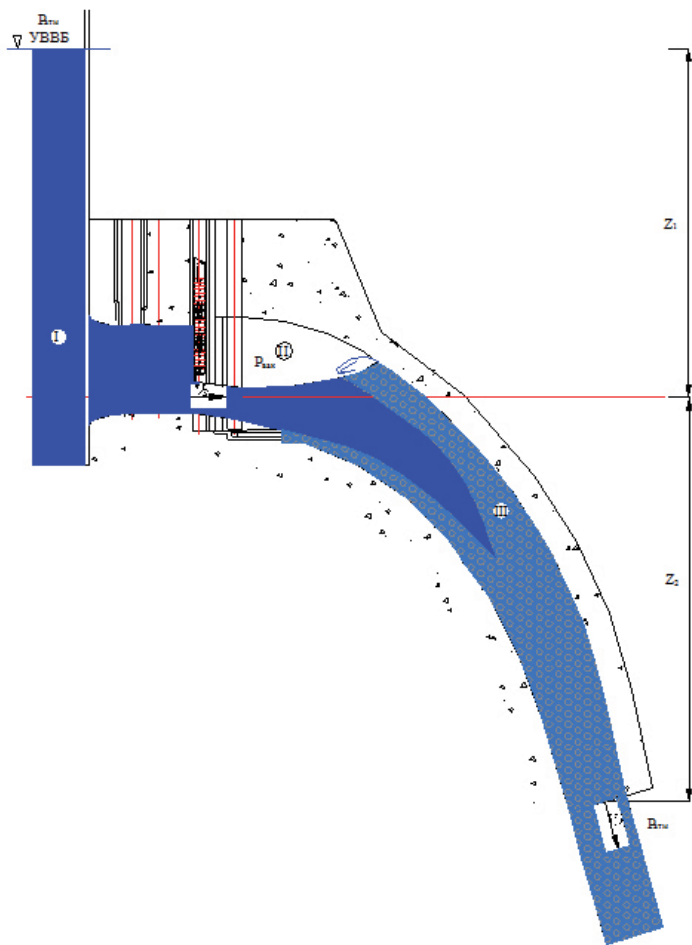


Рис. 7. Изменение стандартов пульсационной составляющей гидродинамического давления на потолок закрытого участка при различных открытиях затвора:  
а — эксплуатационная схема; б — при установке боковых отклоняющих стенок



**Рис. 8.** Гидравлическая схема течения потока в пределах закрытого участка водоброса: I — зона напорного течения водного потока; II — зона безнапорного течения; III — зона напорного течения водовоздушного потока



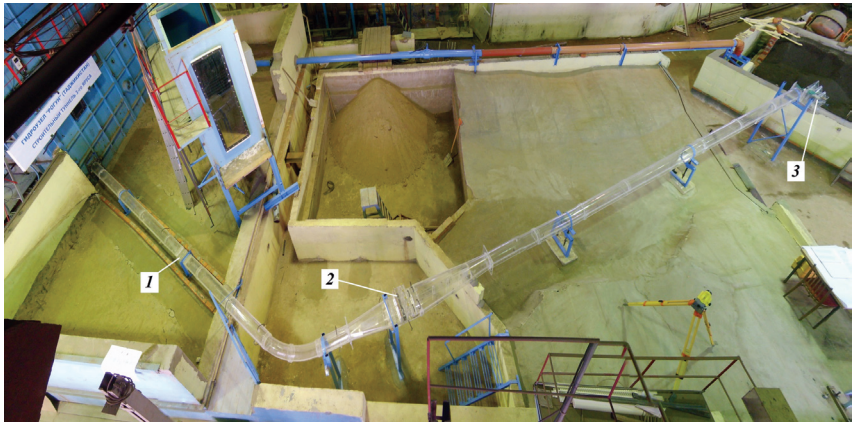
**Рис. 11.** Жигулевская ГЭС  
(изображение получено с использованием GoogleEarth)



**Рис. 12.** Водосливная плотина Жигулевской ГЭС



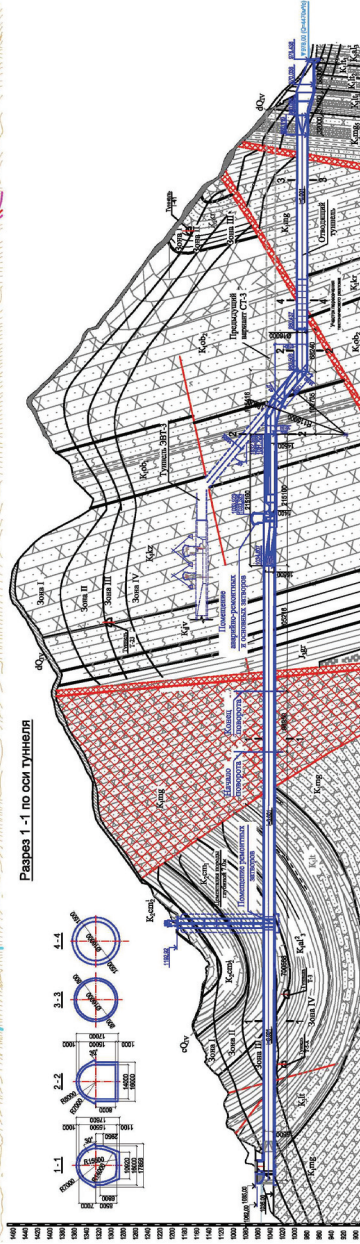
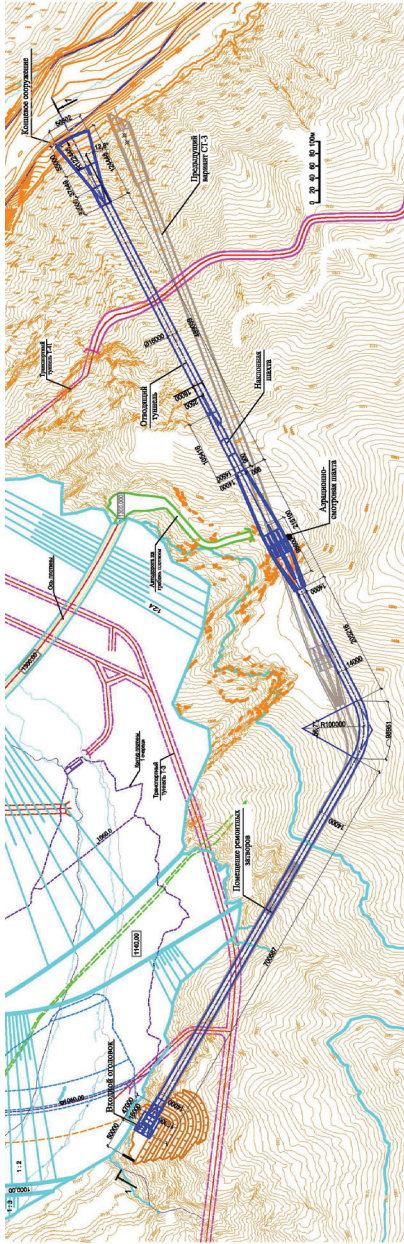
Рис. 1 Расположение строительного туннеля № 3 на генплане Рогунской ГЭС (вариант с осевым потоком на отводящем безнапорном участке)



**Рис. 2** Гидравлическая модель масштаба 1:80 строительного туннеля СТ-3 (вариант с осевым потоком на отводящем безнапорном участке):  
1 — камера ремонтных затворов; 2 — камера аварийно-ремонтных и основных затворов; 3 — конечное сооружение



**Рис. 5** Режим работы конечного сооружения (вариант с осевым потоком на отводящем безнапорном участке, конечное сооружение прямое) при пропуске расхода  $Q = 3\,500\text{ м}^3/\text{с}$



**Рис. 8.** Вариант строительного туннеля № 3 с закручивающим полог устройством, расширяющимся водобойным колодезем

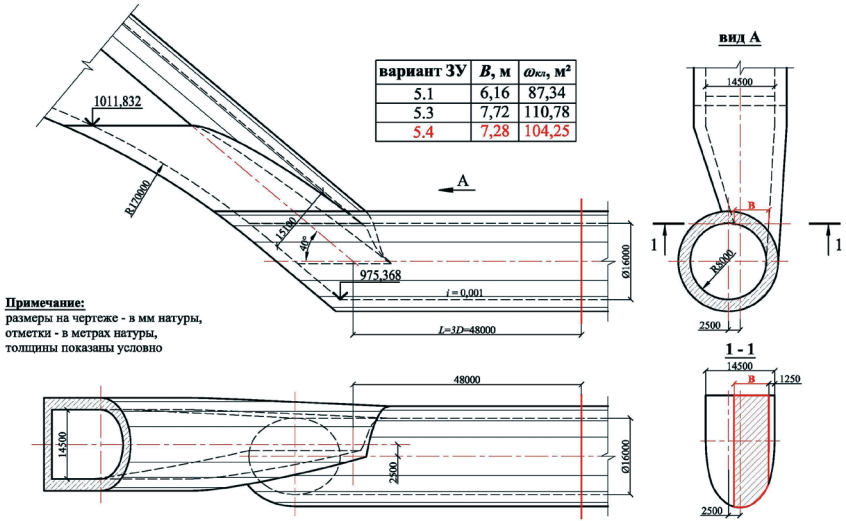


Рис. 9 Рекомендованная конструкция закручивающего устройства (ЗУ) строительного туннеля СТ-3 по варианту 5.4

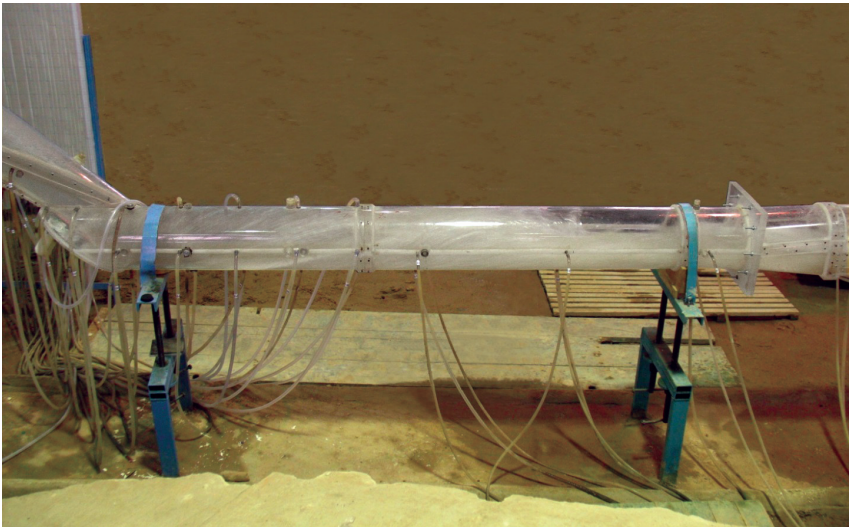
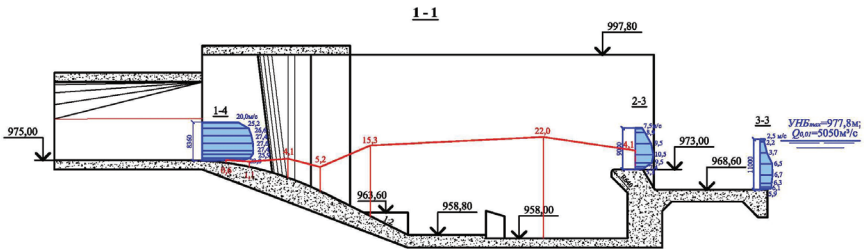


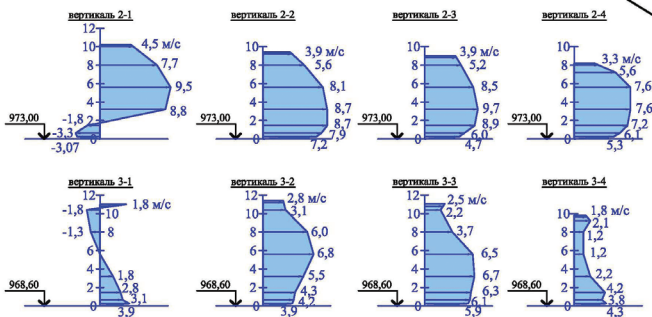
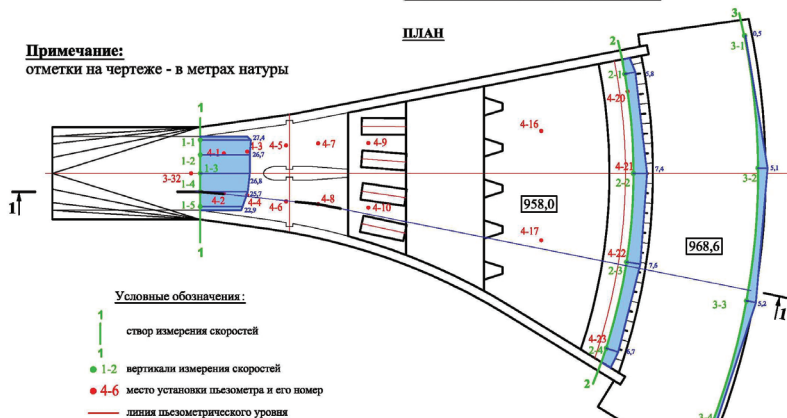
Рис. 11 Переход вихревого потока в осевой на модели строительного туннеля СТ-3





**Примечание:**  
отметки на чертеже - в метрах натуры

**ПЛАН**



**Рис. 15.** Распределение осредненных пьезометрических давлений и скоростей потока на входе и выходе из водобойного колодца с отметкой дна 658,0 м при  $Q = 3\ 500\ \text{м}^3/\text{с}$  и  $УНВ = 977,8\ \text{м}$