

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

ISSN 2413-8770

# **БЕЗОПАСНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ СБОРНИК

Выпуск 2 (22)

Москва 2016

УДК 621.311, 624.9, 550.8

Безопасность энергетических сооружений //Периодический научно-технический и производственный сборник. №2 (22).  
М.: АО «НИИЭС», 2016. 144 с.

ISSN 2413-8770

Учредитель и издатель:

АО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений»

Сборник зарегистрирован

в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации средства массовой информации:  
ПИ № ФС77-63268 от 6 октября 2015 г.

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

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

Выпускающий редактор — *А.Л. Золотов*

Адрес редакции:

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

Телефон: (499) 492-73-51 Факс: (499) 363 56 51

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

Подписано в печать \_\_\_\_\_

Формат 60x90 1/16

Бумага офс. №1. Печать офсетная.

Объем 9 п.л. Тираж 250 экз.

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Перо»

**ОБ УТОЧНЕНИИ ПОНЯТИЙ  
«БЕЗОПАСНОСТЬ» И «НАДЕЖНОСТЬ»  
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ  
В СИСТЕМЕ НОРМАТИВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЭС**

**CLARIFICATION OF THE BASIC CONCEPTS  
OF «SAFETY» AND «DEPENDABILITY» APPLIED  
TO HYDRAULIC STRUCTURES IN THE SYSTEM  
OF NORMATIVE SUPPORT OF THE FUNCTIONING  
HYDROELECTRIC POWER STATION**

*Бельшев В.С.* (АО «НИИЭС»)

Для поддержания условий стабильной работы гидроэлектростанций очевидна необходимость обеспечения высокой степени согласованности между нормативными документами, входящими в иерархическую структуру нормативного обеспечения функционирования гидротехнических сооружений. Одной из возможных мер для повышения их согласованности может послужить обновление (актуализация) установленной в сфере национальной стандартизации системы понятий в области гидротехники, включая уточнение определений базовых понятий «безопасность» и «надежность» гидротехнических сооружений.

Гидротехнические сооружения, безопасность, надежность, нормативные документы, гидроэлектрические станции, понятие, определение, система стандартизации, согласованность.

---

In order to maintain stability of working conditions of hydroelectric power stations there is an obvious need to ensure a high level of consistency among normative documents, included in the structure of regulatory framework for the operation of the hydraulic structures. One of the possible measures to increase their consistency may be the update (actualization) of hydraulic engineering system of concepts installed in the field of national standardization, including clarifying the basic definitions of «safety» and «dependability» applied to hydraulic structures.

Hydraulic structures, safety, dependability, normative documents, hydroelectric power stations, concepts, definition, system of standards, harmonization.

## **1 Актуальность**

Нормативное обеспечение устойчивого функционирования гидроэлектростанций играет не менее значимую роль, чем научно-техническое, финансовое и другие виды обеспечения.

В иерархическую структуру нормативного обеспечения функционирования гидротехнических сооружений входят:

- федеральные законы и технические регламенты,
- национальные стандарты,
- своды правил,
- стандарты организации.

Для поддержания условий стабильной работы гидроэнергетических объектов очевидна необходимость обеспечения высокой степени согласованности указанных нормативных документов между собой. Одной из возможных мер в данном направлении могло бы послужить обновление (актуализация) установленной в сфере национальной стандартизации системы понятий в области гидротехники, включая уточнение определений базовых понятий «безопасность» и «надежность» гидротехнических сооружений.

## **2 Об уточнении определения понятия «безопасность» сооружения**

### ***2.1 Примеры терминов и определений понятия «безопасность» сооружения***

2.1.1 В указанной сложной иерархической системе нормативных документов термины и определения безопасности зданий и сооружений в целом и гидротехнических сооружений в частности имеют некоторые различия:

- в ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» установлено понятие «безопасность гидротехнических сооружений», а в ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» применяется понятие «механическая безопасность»;
- в ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» безопасность ГТС определяется как свойство ГТС, а в соответствии с ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» механическая безопасность здания (сооружения) определяется как состояние сооружения;

– в ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» и в ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» понятие «механическая безопасность здания (сооружения)» определяется одинаково как «состояние строительных конструкций и основания здания или сооружения...». А в Техническом регламенте Таможенного союза «О безопасности зданий и сооружений, строительных материалов и изделий» (далее – ТР ТС) вводится, по сути, синонимичное понятие «безопасность механическая (здания или сооружения)», но определение которого охватывает более широкий круг вопросов, включающий «состояние здания или сооружения, строительных конструкций и основания, а также элементов систем инженерно-технического обеспечения...».

Также в упомянутых нормативных документах меняются характеристики понятия «механическая безопасность»:

– в ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» и ГОСТ 31937-2011 понятие «механическая безопасность здания (сооружения)» характеризуется «...отсутствием недопустимого риска, связанного с причинением вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни и здоровью животных и растений...»,

– а в ТР ТС понятие «безопасность механическая (здания или сооружения)» характеризуется «...возможностью предотвращения вреда жизни или здоровью человека, животных и растений, ущерба имуществу и окружающей среде...».

После утверждения ТР ТС нормативная база Российской Федерации должна быть приведена в соответствие с ним. Таким образом, парадигму определения и поддержания допустимого уровня (отсутствием недопустимого) риска причинения вреда, связанного с механической безопасностью здания и сооружения, заменит парадигма возможности предотвращения причинения вреда или ущерба жизни, здоровью и пр.

2.1.2 Вот еще несколько примеров других терминов по безопасности, используемых в действующих и разрабатываемых нормативных документах по гидроэлектростанциям и гидротехническим сооружениям:

– термин «безопасность гидротехнических сооружений» (см. ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений», ГОСТ Р 55615.2-2013 «Национальный стандарт Российской Федерации. Возобновляемая энергетика. Приливные электростанции. Часть 2. Сооружения приливных электростанций. Требования безопасности. Основные положения», СП 58.13330.2012 «Гидротехнические сооружения. Основные положения», проект ГОСТ Р «Гидравлические и гидроаккумулирующие электростанции. Гидротехнические сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения», СТО РусГидро 02.01.80-2012 «Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Правила эксплуатации. Нормы и требования»);

– термин «безопасность эксплуатации» (см. Проект ГОСТ Р «Гидравлические и гидроаккумулирующие электростанции. Нормы технологического проектирования. Основные положения», СТО РусГидро 01.01.78-2012 «Гидроэлектростанции. Нормы технологического проектирования»);

– термин «обеспечение безопасности гидротехнического сооружения» (см. Проект ГОСТ Р «Гидравлические и гидроаккумулирующие электростанции. Гидротехнические сооружения. Мониторинг и оценка технического состояния в процессе эксплуатации. Основные положения», Проект ГОСТ Р «Гидравлические и гидроаккумулирующие электростанции. Гидротехнические сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения»);

– термин «безопасность гидроэлектростанции в условиях аварийных и катастрофических ситуаций» (см. Проект ГОСТ Р «Гидравлические и гидроаккумулирующие электростанции. Нормы технологического проектирования. Основные положения», СТО РусГидро 01.01.78-2012 «Гидроэлектростанции. Нормы технологического проектирования»).

## ***2.2 Сравнительный анализ определений понятия «безопасность гидротехнических сооружений»***

2.2.1 Сравнение формулировок определения понятия «безопасность гидротехнических сооружений» показывает, что в разных документах они отличаются:

– в СП 58.13330.2012 «Гидротехнические сооружения. Основные положения», проект ГОСТ Р «Гидравлические и гидро-

аккумулирующие электростанции. Гидротехнические сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения» и СТО РусГидро 02.01.80-2012 «Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Правила эксплуатации. Нормы и требования» понятие «безопасность гидротехнических сооружений» используется в формулировке ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» и определяется как «свойство гидротехнических сооружений, позволяющее обеспечивать защиту жизни, здоровья и законных интересов людей, окружающей среды и хозяйственных объектов»;

– в ГОСТ Р 55615.2-2013 «Национальный стандарт Российской Федерации. Возобновляемая энергетика. Приливные электростанции. Часть 2. Сооружения приливных электростанций. Требования безопасности. Основные положения» и СТО РусГидро 03.01.104-2013 «Приливные электростанции. Сооружения приливных электростанций. Требования безопасности. Основные положения» понятие «безопасность гидротехнических сооружений» сформулировано так, как оно было сформулировано в СО 34.21.308-2005<sup>1</sup> «Гидротехника. Основные понятия. Термины и определения», и определяется как «свойство гидротехнического сооружения, определяющее его защищенность от внутренних и внешних угроз или опасностей и препятствующее возникновению на объекте источника техногенной опасности для жизни, здоровья и законных интересов людей, состояния окружающей среды, хозяйственных объектов и собственности».

2.2.2 Безопасность гидросооружения представляется сложным понятием, характеризующимся комплексом мер, которые реализуются на различных стадиях его жизненного цикла различными субъектами, выполняющими по отношению к сооружению различные функции (проектировщики, строители, эксплуатация, надзорные органы). Все это формирует некоторое разнообразие подходов и точек зрения к пониманию (трактовке) понятия безопасности. Вследствие чего одно и то же понятие «безопасность гидросооружения» в различных обстоятельствах и условиях и в различных нормативных документах может быть представлено

---

<sup>1</sup> Разработан ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева» при участии ОАО «Институт Гидропроект» и ОАО «Теплоэлектропроект». Введен в дополнение ГОСТ 19185-73 и ГОСТ 26966-86.

его разными составляющими (аспектами) и в различных сочетаниях (при надзоре, при расследовании причин инцидента, при задаче повышения безопасности ГТС и т.д.), т.е.:

- основные свойства, необходимые для выполнения гидротехническим сооружением своих функций, закладываются на стадии проектирования и строительства;

- на реальном объекте свойства уточняются (авторский и строительный надзор) и в дальнейшем уже поддерживаются на заданном нормативном уровне собственником и эксплуатирующей организацией;

- т.к. гидротехнические сооружения являются особо опасным объектом, за их безопасностью осуществляется надзор в соответствии с действующим законодательством государственными надзорными органами и генерирующей компанией;

- для страхования ответственности в соответствии с действующим законодательством осуществляется оценка возможного ущерба и вреда, который может быть причинен в результате аварии на ГТС и определяется риск такого события.

2.2.3 Определение понятия «безопасность гидротехнических сооружений» в ФЗ «О безопасности ГТС», по сути, охватывает все вышеназванные аспекты, что объективно необходимо для применения этого понятия в правовом поле.

Определение понятия «безопасность гидротехнических сооружений» в соответствии с СО 34.21.308-2005 представляется его базовой (физической) составляющей, т.к. все основные и главные технические решения по физико-механическим характеристикам и геометрическим параметрам, оснащенности КИА закладываются при проектировании на основании технического задания, результатов изысканий и возможностей строительства.

Основополагающим фактором в создании проектировщиком безопасных свойств гидросооружения является физика, а экономика, организационные аспекты, подходы надзорных органов и страховщиков носят безусловно важный, но вспомогательный характер.

Поэтому представляется целесообразным в документах по стандартизации, главным образом применяемых при проектировании и строительстве, а также в основополагающих общетехнических стандартах по безопасности (и ее отдельным аспектам)

использовать формулировку понятия «безопасность ГТС» в соответствии с СО 34.21.308-2005.

### ***2.3 О целесообразности использования определения понятия «безопасность гидротехнического сооружения» в соответствии с СО 34.21.308-2005***

Использование предлагаемого определения понятия «безопасность гидротехнического сооружения» (далее – Определение) представляется целесообразным исходя из следующих соображений:

1. Определение конкретизирует существенные характеристики безопасности гидросооружения как физической функции (что наиболее важно держать в поле своего зрения и внимания при создании сооружения), а именно:

- защиту сооружения от внутренних и внешних угроз (опасностей);
- предупреждение и снижение возможности возникновения техногенного источника аварии и недопущение разрушения сооружения.

2. Определение:

– отражает классификацию «групп опасных факторов» (в соответствии с п.7.1.3 ГОСТ 1.5-2001), что важно для обеспечения системности и комплексности документов по стандартизации;

– коррелируется с классификацией опасностей для гидросооружений в «Методике определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии гидротехнического сооружения (за исключением судоходных и портовых гидротехнических сооружений)», утвержденной приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 29 марта 2016 г. № 120.

3. Определение более точно отвечает принципам и методам стандартизации терминологии согласно РМГ 19-96 «Рекомендации по основным принципам и методам стандартизации терминологии» и Р 50.1.075-2011 «Рекомендации по стандартизации. Разработка стандартов на термины и определения».

4. Определение более четко представляет соотношение друг с другом понятий «безопасность» и «надежность» гидросооружения:

- надежность гидросооружения характеризуется его способностью выполнять функции в заданных условиях, а
- безопасность гидросооружения характеризуется его защищенностью от угроз (опасностей), недопущению возникновения источника техногенной аварии и разрушения сооружения.

5. Определение обеспечивает возможность более точной корреляции стандартов и сводов правил по безопасности гидросооружений с национальными стандартами (ГОСТ и ГОСТ Р), входящими в группу «Безопасность в чрезвычайных ситуациях».

6. Определение учитывает то, как определяется общетехническое понятие «безопасность» в межгосударственном стандарте ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения» (см. пояснения к определению термина «надежность»).

7. Определение обеспечивает возможность сохранения единой логики технических норм и требований, установленных в национальных стандартах Российской Федерации в области безопасности гидросооружений, путем снижения потенциальной возможности прямого влияния на определение этих понятий со стороны определений понятий «безопасность» и «надежность», установленных в международных стандартах, в частности в документах Международной электротехнической комиссии (МЭК) и Международной организации по стандартизации ИСО.

### **3 Об уточнении понятия «надежность гидротехнического сооружения»**

#### ***3.1 Примеры терминов и определений понятия «надежность» сооружения***

Одновременно с уточнением понятия «безопасность гидротехнического сооружения» в документах по стандартизации целесообразно уточнить и определение понятия «надежность гидротехнического сооружения».

Различий в формулировках определения надежности в нормативных документах не так много, как в случае с безопасностью, но все же они есть:

1) в проекте Технического регламента Таможенного союза «О безопасности зданий и сооружений, строительных материалов и изделий» определено, что **«надежность (в строительстве)** – способность здания или сооружения, строительной конструкции или ее части, а также внутренних инженерных систем, выполнять требуемые функции в течение расчетного срока службы. Надежность обычно выражается в вероятностных характеристиках и включает в себя безопасность, эксплуатационную пригодность и долговечность конструкций»;

2) в межгосударственном стандарте ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения» надежность определена как **«Свойство объекта сохранять во времени и установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Примечание. Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств»;**

3) в проекте ГОСТ Р «Гидравлические и гидроаккумулирующие электростанции. Гидротехнические сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения», СТО РусГидро 02.01.80-2012 «Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Правила эксплуатации. Нормы и требования», СТО РусГидро 03.01.104-2013 «Приливные электростанции. Сооружения приливных электростанций. Требования безопасности. Основные положения» понятие «надежность» определено как в СО 34.21.308-2005 «Гидротехника. Основные понятия. Термины и определения», из которого следует, что **«надежность гидротехнического сооружения: Интегральное свойство гидротехнического сооружения, характеризующее его способность выполнять требуемые функции при установленных режимах и условиях эксплуатации, технического обслуживания и ремонта в течение заданного периода времени, сохраняя при этом в установленных пределах значения всех параметров, определяющих эти функции».**

### ***3.2 О дополнении определения понятия «надежность гидротехнического сооружения» в соответствии с СО 34.21.308-2005***

Определение надежности в соответствии с СО 34.21.308-2005 отражает существенные характеристики этого понятия и дает наиболее целостное представление о его структуре, и в дальнейшем его применение в документах по стандартизации представляется наиболее целесообразным с учетом следующих уточнений:

– определение целесообразно дополнить примечанием, как это сделано для определения общетехнического понятия надежности в ГОСТ 27.002-89;

– в добавленном примечании указать, что помимо безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости понятие «надежность» может включать в себя также и безопасность.

И тогда терминологическая статья для понятия «надежность» будет выглядеть следующим образом:

**«надежность гидротехнического сооружения:** Интегральное свойство гидротехнического сооружения, характеризующее его способность выполнять требуемые функции при установленных режимах и условиях эксплуатации, технического обслуживания и ремонта в течение заданного периода времени, сохраняя при этом в установленных пределах значения всех параметров, определяющих эти функции.

**Примечание:** В зависимости от назначения гидротехнического сооружения и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость и безопасность или определенные сочетания этих свойств».

### ***3.3 О целесообразности использования дополненного определения понятия «надежность гидротехнического сооружения» в соответствии с СО 34.21.308-2005***

Целесообразность такого определения определяется из следующих соображений:

1. Представляется справедливым формулирование авторами СО 34.21.308-2005 надежности как интегрального<sup>2</sup> свойства (в ГОСТ 27.002-89 это свойство определено как комплексное), когда ни одна из ее составляющих не может быть исключена из поля

<sup>2</sup> В переводе с латыни: интегральный – неразрывно связанный, цельный, единый.

зрения при реальном (физическом) обеспечении надежности. Только целостное рассмотрение всей совокупности свойств может дать так называемый синергический эффект, а попытки оптимизировать отдельный аспект надежности без учета их единства представляются заведомо обреченными на неуспех.

2. Авторами СО 34.21.308-2005 указаны такие необходимые и существенные технические мероприятия, влияющие на надежность, как ремонт и техническое обслуживание, а также правильная эксплуатация (режим и условия) в течение всего жизненного цикла использования сооружения.

3. Определение интегрирует в себя классификацию ключевых свойств в соответствии с ГОСТ 27.002-89.

4. Определение обеспечивает взаимосвязь понятия «надежность» в документах по стандартизации с понятием «надежность» в ТР ТС.

5. Определение повышает гармонизацию понятия «надежность» с определением этого понятия в международной стандартизации (см. определение термина “dependability” в разделе 192 Международного электротехнического словаря ИЕС 60050)<sup>3</sup>.

6. Определение отражает взаимосвязь понятий «надежность» и «безопасность», что объективно необходимо сделать, т.к. безопасность представляется физическим ядром понятия «надежность», априори интегрально связанного со всеми другими составляющими надежности (безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость) и является ключом к рассмотрению каждого из них по отдельности или в различных сочетаниях. Без обеспечения безопасности рассмотрение любого аспекта надежности представляется бессмысленным.

7. Включение безопасности в определение «надежность» покрывает и понятие «живучесть» (см. ГОСТ 27.002-89), т.к. если

---

<sup>3</sup> ИЕС 60050 192

192-01-22\* Dependability ability to perform as and when required

Note 1 to entry: Dependability includes availability (192-01-23), reliability (192-01-24), recoverability (192-01-25), maintainability (192-01-27), and maintenance support performance (192-01-29), and, in some cases, other characteristics such as durability (192-01-21), **safety** and security.

Note 2 to entry: Dependability is used as a collective term for the time-related quality characteristics of an item.

в упомянутом ГОСТ понятия «надежность» и «безопасность» представляются «тесно связанными», то в предлагаемом определении они имеют вполне однозначную ясную связь и, значит, имеют между собой переходный аспект «живучесть».

#### 4 Выводы

На основании вышеизложенного представляется целесообразным:

1. Дополнить текст действующего государственного стандарта ГОСТ 19185-73 «Гидротехника. Основные понятия. Термины и определения» терминологическими статьями:

**«безопасность гидротехнического сооружения:** Свойство гидротехнического сооружения, определяющее его защищенность от внутренних и внешних угроз или опасностей и препятствующее возникновению на объекте источника техногенной опасности для жизни, здоровья и законных интересов людей, состояния окружающей среды, хозяйственных объектов и собственности»;

**«надежность гидротехнического сооружения:** Интегральное свойство гидротехнического сооружения, характеризующее его способность выполнять требуемые функции при установленных режимах и условиях эксплуатации, технического обслуживания и ремонта в течение заданного периода времени, сохраняя при этом в установленных пределах значения всех параметров, определяющих эти функции.

**Примечание:** В зависимости от назначения гидротехнического сооружения и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость и безопасность или определенные сочетания этих свойств»;

2. Не применять в документах по стандартизации другие определения данных терминов.

#### Литература

1. *Федеральный закон* «О безопасности гидротехнических сооружений» от 21.07.1997 № 117-ФЗ.
2. *Федеральный закон* «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 № 384-ФЗ.
3. *Федеральный закон* «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

4. *Постановление Правительства РФ* от 26.12.2014 № 1521 «Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
5. *Методика* определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии гидротехнического сооружения (за исключением судоходных и портовых гидротехнических сооружений)», утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 29 марта 2016 г. № 120.
6. *Приказ Росстандарта* от 30.03.2015 № 365 «Об утверждении перечня документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
7. *ГОСТ 1.5-2001*. Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению.
8. *ГОСТ 31937-2011*. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
9. *ГОСТ Р 55615.2-2013*. Национальный стандарт Российской Федерации. Возобновляемая энергетика. Приливные электростанции. Часть 2. Сооружения приливных электростанций. Требования безопасности. Основные положения.
10. *СП 58.13330.2012*. Гидротехнические сооружения. Основные положения.
11. *Перечень действующих стандартов* ОАО «РусГидро» <http://www.rushydro.ru/upload/iblock/de2/Perechen-dejstvujushih-standartov-OAO-RusGidro.pdf>
12. *СТО РусГидро 02.01.80-2012*. Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Правила эксплуатации. Нормы и требования.
13. *СТО РусГидро 01.01.78-2012*. Гидроэлектростанции. Нормы технологического проектирования.
14. *РМГ 19-96*. Рекомендации по основным принципам и методам стандартизации терминологии.
15. *Р 50.1.075-2011*. Рекомендации по стандартизации. Разработка стандартов на термины и определения.
16. *СО 34.21.308-2005*. Гидротехника. Основные понятия. Термины и определения.
17. *Технический регламент* Таможенного союза «О безопасности зданий и сооружений, строительных материалов и изделий» (проект).
18. *ГОСТ Р «Гидравлические и гидроаккумулирующие электростанции. Гидротехнические сооружения. Мониторинг и оценка технического состояния в процессе эксплуатации. Основные положения»* (проект).
19. *ГОСТ Р «Гидравлические и гидроаккумулирующие электростанции. Гидротехнические сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения»* (проект).
20. *ГОСТ Р «Гидравлические и гидроаккумулирующие электростанции. Нормы технологического проектирования. Основные положения»* (проект).

## **О ПОВЫШЕНИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАКЛАДНОЙ КИА**

### **INCREASING OF METROLOGICAL RELIABILITY OF DISTANT EMBEDDED TOOLS OF GAUGING EQUIPMENT**

*Коновалов И.К.* (АО «НИИЭС»)

В статье приводятся результаты исследований и анализ многолетней работы по повышению срока надежности закладной дистанционной КИА; описываются пути повышения конкурентоспособности отечественных СИП; предлагаются пути решения проблемы повышения сроков службы ранее установленных преобразователей.

Закладная дистанционная контрольно-измерительная аппаратура (КИА), метрологическая надежность, средство измерения (СИ), струнный измерительный преобразователь (СИП).

---

Results of research and analysis of multi-year work to improve the reliability of remote embedded tools of gauging equipment; metrological reliability; ways to enhance the competitiveness of native equipment; proposed solution to increase service life of previously installed transducers.

Remote embedded tools of gauging equipment, measuring tools, string metrical transducer.

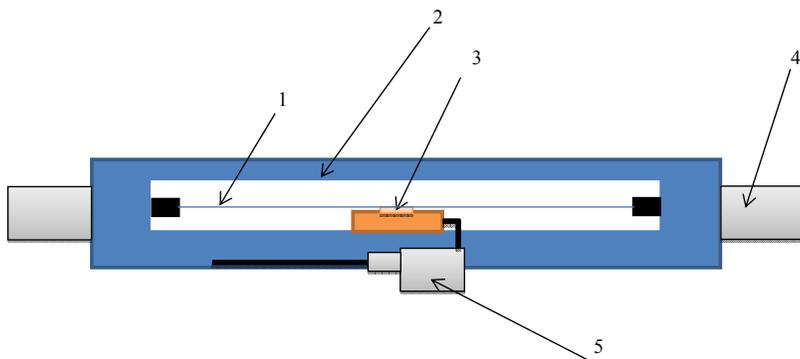
Закладная дистанционная контрольно-измерительная аппаратура (КИА) является основным средством измерения, применяемым в настоящее время для инструментальной оценки безопасности и технического состояния при строительстве и эксплуатации крупных энергетических объектов, в том числе ГЭС и ГАЭС. Основными типами этой КИА струнного типа являются следующие средства измерения:

- измерительный преобразователь силы арматурный (ПСАС);
- измерительный преобразователь линейных деформаций (ПЛДС);
- измерительный преобразователь линейных перемещений (ПЛПС);

- измерительный преобразователь температуры (ПТС);
- измерительный преобразователь гидростатического давления (ПДС) [1].

АО «НИИЭС» является разработчиком и изготовителем струнных измерительных преобразователей (СИП) подобной конструкции.

Принцип работы СИП основан на преобразовании входной физической величины (силы, деформации, перемещений, температуры, давления) в изменение частоты собственных затухающих колебаний струны (резонатора), которая является выходным информативным сигналом преобразований. Конструктивная схема измерительного преобразователя силы (ПСАС) представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Конструктивная схема ПСАС:

1 – резонатор (струна); 2 – упругий элемент; 3 – электромагнитная катушка; 4 – удлинители из периодической арматуры; 5 – кабельный ввод

К разработке преобразователей, позволяющих контролировать напряженно-деформированное состояние гидротехнических сооружений, институт приступил практически сразу после своего создания. В 1975 г. струнные преобразователи были переданы в промышленное производство на завод ПО «Союзэнергоавтоматика», расположенный в городе Днепропетровске, где изготовление СИП продолжалось вплоть до распада СССР в 90-х годах прошлого века.

Начиная с 1991 г. изготовление СИП было возвращено в институт и поручено выделившемуся из его состава отделу, преобразованному в ОАО «ДИГЭС». Затем в 2000 г. по решению РАО

«ЕЭС России» предприятие «ДИГЭС» вновь вошло в структуру института и в настоящее время носит название отдела средств диагностики.

За прошедшие годы разработанными и изготовленными в АО «НИИЭС» струнными преобразователями были оснащены многие крупные ГЭС и ГАЭС, как в нашей стране (Загорская ГАЭС, Богучанская ГЭС, Бурейская ГЭС), так и за рубежом. Нашли свое применение СИП и при контроле за состоянием конструкций атомных электростанций, а также других промышленных объектов.

Проблеме надежности СИП специалистами института всегда уделялось большое внимание. Под термином «надежность» в соответствии с определением [2] понимается свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнения требуемых функций в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность и сохранность. Применительно к средствам измерения, к которым относится СИП, надежность включает технические требования не только к сохранению его работоспособного состояния, но и к сохранению в заданных пределах погрешности измерений. Выход погрешности измерений за допустимые пределы приводит к метрологическому отказу СИП и невозможности его дальнейшей эксплуатации. Завод-изготовитель в технических характеристиках на СИП указывает срок его наработки до отказа, после истечения которого погрешность измерений может выйти за установленные пределы. В этом случае, в соответствии с требованиями [3], измерительная информация, полученная от СИП, не может быть использована в качестве показателей состояния оборудования при назначении критериев безопасности.

Более строгое представление о значении наступления метрологического отказа устанавливают метрологи. Например, важнейшей характеристикой качества измерений является их достоверность, которая характеризует доверие к результатам измерений и делит их на две категории: достоверные и недостоверные, в зависимости от того, известны или неизвестны вероятностные

характеристики их отклонений от истинных значений соответствующей величины. Результаты измерений, достоверность которых неизвестна, не представляют ценности и в ряде случаев могут служить источниками дезинформации [4]. Таким образом, измерительная информация, получаемая от СИП после наступления метрологического отказа, признается недостоверной, так как неизвестно значение погрешности измерений.

Первые исследования надежности СИП были проведены в АО «НИИЭС» одновременно с началом их серийного изготовления в 50-е годы прошлого столетия. Концепция этих исследований, в ходе которых в течение длительного периода времени изучался дрейф нулевого выходного сигнала СИП, находящегося под действием наибольшего значения входной физической величины (силы), полностью совпадает с современной трактовкой надежности СИП.

Таким образом, было определено, что смещение значений нулевого выходного сигнала приводит к возникновению аддитивной составляющей погрешности измерения и выходу нормированных значений погрешности измерений за допустимые пределы, то есть возникновение метрологического отказа [5]. В результате испытаний, проходивших в течение 2,5 лет, было установлено, что нулевое значение выходного сигнала СИП за время испытаний изменилось очень незначительно, в пределах нескольких Гц. Некоторый разброс этого значения авторы объяснили различиями температуры и атмосферного давления окружающей среды, влияющими на значение выходного сигнала. К сожалению, никаких количественных оценок показателей надежности этого СИП сделано не было.

Впервые количественная оценка показателя безотказности СИП была сделана при проведении контрольных испытаний на надежность, проведенных в рамках испытаний СИП при их передаче в промышленное производство на завод «Союзэнергоавтоматика». Испытания СИП были проведены в 1981 г. по ускоренной методике, разработанной сотрудником института к.т.н. Петрашень И.Р.

Сущность методики заключалась в следующем. Все явные отказы, по данным многолетних наблюдений СИП, распределяются во времени по экспоненциальному закону. Они возникают

от действия внешних сил, вибраций и температурных воздействий в течение первых месяцев после монтажа и проявляются в виде разгерметизации, нарушений электрической цепи и «залипания» струны на магнитной головке. Эти отказы могут быть спрогнозированы на срок службы по результатам испытаний в условиях одновременного действия максимальных значений всех возможных при эксплуатации видов нагрузок.

Все деградационные отказы СИП по данным многолетней эксплуатации и данным экспериментальных исследований возникают из-за релаксации механических напряжений измерительных преобразовательных элементов, в первую очередь струны. Они проявляются в дрейфе частоты выходного сигнала СИП, при постоянстве входной измеряемой величины, и развиваются по закону:

$$\Delta f_t = A \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

где,  $\Delta f_t$  – дрейф частоты за время  $t$ ;  $A$  и  $\tau$  – параметры, определенные по данным краткосрочных испытаний.

Параметры  $A$  и  $\tau$  определяют прогнозируемый дрейф частоты выходного сигнала, за период среднего времени наработки до отказа, соответствующей требованиям к надежности, установленной техническими условиями. Прогнозируемый дрейф сравнивают с допуском, соответствующим основной погрешности. На основании сравнения делают вывод о положительном или отрицательном результате испытания. По результатам проведенных контрольных испытаний СИП было установлено, что среднее время безотказной работы в виде среднего срока наработки до отказа равно 12 годам. Именно с этим показателем безотказности были изготовлены все заводские СИП.

Очередные испытания на безотказность СИП были проведены в ОАО «ДИГЭС» в 1995 г. Эти испытания были проведены в рамках утверждения типа средств измерений и включения их в Госреестр средств измерений, допущенных к применению в РФ.

Контрольные испытания на надежность также проводились по вышеописанной методике, на которую был выдан патент № 1089526 [6].

По результатам проведенных контрольных испытаний были утверждены показатели надежности СИП в виде среднего времени наработки до отказа, составившего 14 лет. Для объективной оценки достигнутого технического уровня отечественных СИП был сделан анализ уровня аналогичных преобразователей, изготовленных известными зарубежными фирмами «Telemac» Франция, «Maihak» ФРГ, «SinCo» Канада, «Geokon» США.

Эти фирмы поставляют на мировой рынок преобразователи, предназначенные для длительного мониторинга крупных инженерных сооружений. Сравнение этих СИП с отечественными показало, что номенклатура изготовленных в нашей стране типов преобразователей шире, чем за рубежом. Диапазоны измерений выходных физических величин в основном аналогичные, но для СИП, предназначенных для измерения линейных деформаций железобетонных конструкций, у зарубежного производителя диапазон шире.

Задекларированные зарубежными изготовителями значения погрешностей измерения СИП в несколько раз ниже, чем у отечественных аналогов. Однако это происходит из-за того, что в зарубежных СИП значения погрешности вычисляются и записываются в паспорта преобразователей непосредственно по результатам градуирования.

По правилам изготовления отечественных средств измерения вначале также вычисляется погрешность по результатам градуирования преобразователей. Однако затем к этой погрешности добавляется значение погрешности, вызванной дрейфом нулевого выходного сигнала СИП за весь срок эксплуатации СИП до наработки до отказа, то есть до наступления момента времени, указанного в паспортах на СИП, когда погрешность измерений станет больше нормированной.

Применяемая специалистами института методика ускоренных испытаний на надежность позволяет определить допустимые погрешности измерения СИП за среднее время наработки до отказа. При этом показатели надежности, которые обязаны обеспечивать отечественные производители, у зарубежных аналогов просто отсутствуют. Иногда зарубежные фирмы-изготовители указывают значение дрейфа нулевого выходного сигнала за год.

Часто в описании зарубежных СИП всего лишь указывается, что они предназначены для длительной эксплуатации.

Необходимо отметить, что у зарубежных СИП значительно выше эргономические показатели, то есть внешний вид, габариты, масса. Они выгодно отличаются от отечественных средств измерения простотой установки в сооружения и, зачастую, наличием в комплектации необходимых для монтажа аксессуаров.

В целом можно отметить, что по ряду объективных и субъективных причин зарубежные СИП, аналогичные по назначению отечественным, нередко имеют более высокие потребительские характеристики. К этому можно добавить, что в настоящее время на рынке начали появляться новые, весьма перспективные средства измерения, предназначенные для длительного мониторинга сооружений, например: оптоволоконные, магнитострикционные и другие.

Все это приводит к тому, что в сложившихся рыночных условиях отечественные СИП часто уступают зарубежным аналогам при выборе проектировщиками СИ, предназначенных для длительного мониторинга сооружений, в том числе ГЭС и ГАЭС. Вместе с тем мы считаем, что, учитывая огромный позитивный опыт использования СИП для мониторинга ГЭС и ГАЭС, накопленный российской школой проведения контрольных и натурных наблюдений за состоянием и безопасностью ГЭС и ГАЭС, потенциал применения отечественных СИП далеко не исчерпан. Поэтому в АО «НИИЭС» планируется продолжение работы по повышению потребительских характеристик отечественных СИП, в первую очередь их технических качеств и надежности.

В результате модернизации у новых моделей СИП были расширены некоторые диапазоны измеряемых физических величин и уменьшена погрешность измерений за счет учета погрешности измерений от изменения температуры окружающей среды. Дополнительно выведена опция измерения температуры окружающей среды и расширен рабочий диапазон температур от  $-30^{\circ}$  до  $+90^{\circ}$ .

Для повышения надежности, а именно среднего времени наработки до отказа, были проанализированы результаты длительных, до 10 лет, испытаний, дрейфа выходного сигнала СИП, нагруженных предельным значением входной физической величины [7]. Результаты этой работы успешно подтверждены в 2009 г.

государственными испытаниями модифицированных СИП с целью утверждения типов средств измерения и включения их в Росреестр средств измерений, допущенных к обращению в РФ. По результатам испытаний отечественных СИП был установлен средний срок наработки до отказа в 17 лет.

Еще одним направлением повышения конкурентоспособности отечественных преобразователей является решение проблемы продления сроков службы СИП, уже установленных на ГЭС и ГАЭС. Анализ состояния закладных дистанционных СИП, установленных на ГЭС и ГАЭС в предыдущие годы, показывает, что свыше 70% этой КИА исчерпали время среднего срока наработки до отказа, иными словами, для них уже наступил метрологический отказ.

Найти путь решения этой проблемы позволили проведенные в лабораторных условиях метрологические исследования дрейфа выходных сигналов СИП, нагруженных верхним пределом входной физической величины (силой). На основе анализа результатов испытаний удалось установить функциональную зависимость дрейфа выходного сигнала СИП от времени его эксплуатации. На этом основании можно нормировать изменения значения погрешности для СИП после истечения времени наработки до отказа. Обоснование этого подхода более подробно изложено в [8].

Этот принцип положен в основу сделанной в нашем институте НИОКР по созданию методики повышения сроков службы закладной струнной КИА по результатам контроля ее состояния на месте установки, на основе анализа базы данных показаний за время эксплуатации и банка данных завода изготовителя.

### **Выводы:**

1. Проведен анализ многолетней работы по повышению срока надежности закладной дистанционной КИА.
2. Намечены пути повышения конкурентоспособности отечественных СИП за счет дальнейшего повышения их технических характеристик и надежности.
3. Рекомендован путь решения проблемы по повышению сроков службы уже установленных СИП за счет нормирования погрешности измерения после наступления формального метрологического отказа.

## Литература

1. *СТО 7023842427.140.025-2009.* Гидроэлектростанции. Контрольно-измерительные системы и аппаратура гидротехнических сооружений. Метрологическое обеспечение и оценка технического состояния и работоспособности. Нормы и требования.
2. *ГОСТ Р 27.002-2009.* Надежность в технике. Термины и определения.
3. *СТО 17330282.27.140.021-2008.* Контрольно-измерительные системы и аппаратура гидротехнических сооружений ГЭС. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования.
4. *Бурдун Г.Д., Марков Б.Н.* Основы метрологии. – Издательство «Стандарт», М, 1972 г.
5. *Угинчус А.А., Бомбчинский В.П.* Контрольно измерительная аппаратура гидротехнических сооружений. – М. 1954 г. Госиздательство литературы по строительству и архитектуре.
6. *Патент SU 1089526А,* опубликован 30.04.1984 GOIR 31/28. Способ ускоренных испытаний на надежность струнных измерительных преобразователей. Авторы Хейфиц В.З., Радкевич Д.Б., О.В.Васылькив, Гогоберидзе М.И., Петрашень И.Р.
7. *Бритвин С.О., Кондрашов И.К.* Исследования и анализ показателей надежности технических средств, для диагностирования сооружений // Журнал «Гидротехническое строительство» № 10. 2001 г.
8. *Коновалов И.К., Пилюзин А.В.* Метрологическая надежность струнных датчиков // Журнал «Гидротехническое строительство», № 9, 2012 г.

**РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ  
ЗАКЛАДНЫХ НАПОРНЫХ ПЬЕЗОМЕТРОВ  
НЕПРЯМОЛИНЕЙНОЙ ФОРМЫ  
В ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗОНАХ ГТС**

**ELABORATION AND TESTING OF TECHNOLOGY  
FOR THE RECOVERY OF SENSITIVITY EMBEDDED  
NON-LINEAR SHAPED PRESSURE PIEZOMETERS  
IN THE RESPONSIBLE ZONES OF THE  
HYDROTECHNICAL STRUCTURES**

*Воронин С. Г.*, кандидат геол.-мин. наук,  
*Евдокимова И. В., Хрипакова Ю. В., Шевкин А. Л.*  
(АО «НИИЭС»)

На основе зарубежного и отечественного опыта разработана и успешно испытана технология восстановления чувствительности закладных напорных пьезометров непрямолинейной формы ствола в ответственных зонах гидротехнических сооружений гидроэлектростанций.

Напорный закладной пьезометр непрямолинейной формы, секвестрирующий реагент, вибрационная установка, чувствительность пьезометра, оголовок пьезометра, кольматант.

---

This article presents a technology of sensitivity recovery of embedded pressure piezometers with non-linear configuration located in vital areas of HPP based on the latest attempts in worldwide pipe cleaning experience.

Buried discharge piezometer with non-linear configuration, sequestering agent, ultrasonic device, sensitivity recovery, top of piezometer pipe, chemical sealant.

В настоящее время достоверными методами контроля фильтрационного режима и, в частности, противодействия на подошве контакта напорных гидротехнических сооружений с грунтовыми основаниями являются прямые методы измерения с применением контрольно-измерительной аппаратуры. В первую очередь, это установленные в ответственных участках оснований и ГТС закладные напорные пьезометры различной конструкции и дат-

чки давления с системой контроля, сбора и управления информацией. От технического состояния пьезометров, как следствие, напрямую зависит качество получаемой информации в рамках контроля безопасности ГТС.

Для напорных пьезометров непрямолинейной формы ствола, в которых наблюдается слабая чувствительность к колебанию уровня воды и когда невозможно произвести механическое разрушение отложений непосредственным воздействием какого-либо инструмента, наиболее подходящим является способ вибрационного воздействия на ствол и водную среду внутри него. Проведение гидродинамической обработки пьезометров непрямолинейной формы с применением различного рода растворяющих веществ обеспечивает разрушение кольматирующих отложений, нарушение структурных связей между водоносной породой и кольматантами и удаление разрушенных осадков в ходе промывки или прокачки.

Этот способ целесообразно применять для декольматации пьезометров, снизивших свою чувствительность вследствие зарастания фильтров и прилегающих к ним водоносных пород рыхлыми и пастообразными осадками, содержащими преимущественно необезвоженные гидроокислы железа. Повышение степени извлечения кольматирующих образований обеспечивается при последующем растворении их в реагентах. Твердые кольматирующие образования с поверхности фильтра и призабойной области разрушаются и эффективнее восстанавливаются структура и пористость водоносной породы при применении комбинированного способа обработки, сочетающего высокочастотное вибрационное воздействие на фильтр и прилегающий к нему пласт с последующим или одновременным растворением разрушенных и диспергированных кольматирующих образований в реагентах. При таком воздействии интенсифицируется массообмен между растворителями и кольматантами, под действием высокочастотных нагрузок реагенты более глубоко проникают за контур фильтра, а растворенные вещества лучше отводятся от зоны контакта [1].

Одной из основных причин кольматации фильтров и прифильтровых зон водоносного пласта является увеличение гидравлических сопротивлений и снижение притока воды в пьезометры. Различают три вида кольматации: механическую, химическую, биологическую [2].

Механическая кольматация наблюдается в сетчатых, щелевых, блочных фильтрах вследствие несоответствия проходных отверстий фильтров гранулометрическому составу водовмещающих пород. В результате механической кольматации водоприемные отверстия фильтров заклиниваются или перекрываются песком, глиной, гравием, в связи с чем удельный дебит пьезометров снижается на 20 – 30%. Снижению механической кольматации способствует создание фильтра из крупнозернистого песка и правильно выполненная гравийная обсыпка вокруг водоприемной части искусственного фильтра.

Химическая кольматация обусловлена нарушением химического состава подземных вод в результате изменения гидродинамических параметров фильтрационного потока. При уменьшении давления воды в ней уменьшается растворимость газов (в основном  $\text{CO}_2$ ), происходит их выделение и нарушается углекислотное равновесие.

Присутствие в воде катионов кальция и магния и нарушение углекислотного равновесия приводят к образованию труднорастворимых осадков  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$ . Интенсивно происходит выделение карбонатных осадков в зоне фильтров, при удалении от них интенсивность выпадения осадков уменьшается. В фильтрах, имеющих большие гидравлические сопротивления, возрастают потери давления, что приводит к более активному выделению из воды  $\text{CO}_2$  и увеличению количества карбонатных осадков. Этому также способствует турбулизация потока подземных вод и их перемешивание при прохождении через водоприемную часть фильтра. Заращение фильтров и прифильтровых зон карбонатными отложениями происходит в основном в пьезометрах, заложенных в известняках и доломитах, либо в иных породах, имеющих в составе легко растворяющиеся карбонатные минералы. Если кольматация происходит только карбонатными соединениями, то осадки по структуре близки к кристаллическим и имеют серовато-белый цвет. При их взаимодействии с соляной кислотой наблюдается интенсивное выделение углекислого газа.

Наиболее распространенными кольматирующими отложениями являются железистые осадки, которые выделяются при заборе подземных вод, содержащих закисное железо. Переход железа из закисного в окисное и выпадение в осадок происхо-

дит при наличии в воде растворенного кислорода. Этому также способствует выделение  $\text{CO}_2$  и повышение pH воды вследствие нарушения углекислотного равновесия. Гидрат оксида железа, имеющий студнеобразный вид, откладывается на поверхности фильтров и в поровом пространстве прифильтровых зон пласта. Интенсивность выпадения железистых осадков возрастает при неравномерном отборе воды из напорного пьезометра, использовании эрлифта или поступления воздуха через трещины бетонных конструкций, способствующих насыщению воды кислородом воздуха. Особенно активно происходит зарастание фильтров такими осадками при обнажении водоприемных отверстий и непосредственном контакте их с атмосферой. Железосодержащие осадки отличаются характерным желто-коричневым цветом, пачкают руки. Наличие их в подземных водах можно выявить визуально по осадкам на водоподъемных трубах.

Нарушение химического состава подземных вод эксплуатируемого пласта может происходить при взаимодействии с водами других водоносных горизонтов при недостаточной мощности разделяющего водоупора и отсутствии или плохой цементации затрубного пространства. В этом случае подземные воды нижних пластов могут обогащаться железом и кислородом, что ведет к осаждению нерастворимых карбонатных и железистых соединений. При смешивании жестких и мягких вод может увеличиться концентрация углекислоты, что вызывает образование карбонатных осадков.

На зарастание пьезометров большое влияние оказывает наличие в подземных водах сероводорода  $\text{H}_2\text{S}$ . Содержание гидросульфидов  $\text{H}_2\text{S}$  приводит к образованию труднорастворимых и непроницаемых сернистых отложений железа, меди, цинка в результате реакции подземных вод с материалом каркаса фильтра. Сульфиды металлов в виде корковидных наростов черного цвета образуют прочное пленочное покрытие на сетках, проволочных обмотках, каркасах фильтров и способствуют постепенному их разрушению. При взаимодействии с кислотой эти осадки бурно выделяют сероводород, весьма опасный для здоровья человека. Сернистые отложения металлов практически не откладываются в прифильтровых зонах водоносного пласта, и после замены фильтров дебиты таких пьезометров обычно близки к первоначальным.

При наличии в железосодержащих подземных водах кремнекислоты наблюдается образование труднорастворимых силикатных отложений с примесью закисного железа, придающего им бурую окраску. Такие осадки характеризуются высокой прочностью и практически нерастворимы в кислотах.

Относительно редко отлагаются осадки фосфатно-железистого состава. Выпадение фосфатов происходит при увеличении щелочности.

Помимо выпадения осадков накопление отложений может происходить в результате коррозии самого фильтра вследствие агрессивности подземной воды, обладающей свойством электролита. Этот процесс протекает наиболее активно при наличии различных металлов в конструкциях фильтров, внешних электрических воздействий и отсутствии надежной антикоррозионной защиты. Электрохимической коррозии в большей степени подвержены сетчатые фильтры, представляющие собой стальную перфорированную трубу, обмотанную стальной проволокой и медной сеткой. Электрохимические процессы могут быть значительно ослаблены путем изготовления каркасов фильтров из пластмасс или стальных труб с антикоррозионным покрытием, использования фильтрующей сетки из нержавеющей стали, применения вместо обмоточной проволоки шнуров из полимерных материалов.

Биологическая кольматация обусловлена жизнедеятельностью микроорганизмов. Наиболее активно бактерии размножаются у фильтров, где в основном скапливаются осадки, образовавшиеся под действием химических и электрохимических процессов. В результате жизнедеятельности бактерий (железобактерий) выделяется гидрат окиси железа, что способствует переводу закиси железа в нерастворимую окись, осаждающуюся на рабочей поверхности фильтров, внутренних стенках ствола и водоподъемном оборудовании. Присутствующие в подземных водах марганцевые бактерии используют энергию окисления закисных соединений и переводят их в малорастворимые окисные соединения. Интенсивная биологическая кольматация характерна для подземных вод с содержанием кислорода 5 мг/л и более, находящихся в первых от поверхности земли водоносных горизонтах. Бактерии обнаруживаются не только в водоносных пластах вбли-

зи поверхностных водоисточников, но и на больших глубинах в зонах, значительно удаленных от водотоков и водоемов.

Благоприятные условия для развития железобактерий имеются в большинстве гидрологических районов, поэтому для подавления их жизнедеятельности необходимо проводить периодически, не менее одного раза в 3-4 месяца, хлорирование пьезометров.

В большинстве случаев осадки, колюматирующие фильтры и прифильтровые зоны, являются многокомпонентными и могут содержать одновременно соли железа, марганца и их гидрооксиды, карбонаты кальция или магния, соединения кремнекислоты и сульфиды, а также песок и глину. Они осаждаются на поверхности фильтров и в порах прилегающих водоносных пород под действием силы тяжести или адсорбируются под действием сил поверхностного натяжения. Со временем осадки обезвоживаются и уплотняются. Отложения имеют рыхлопористую и конгломератовидную структуру и на различных стадиях образования характеризуются различной прочностью и активностью к вступлению в реакцию. В начальной стадии образования они имеют сравнительно небольшую прочность и легко могут быть удалены при использовании любых методов обработки для различных типов пьезометров.

Рыхлопористые образования характерны для осадков биологического происхождения. Они имеют незначительную прочность и при высыхании легко разрушаются. Образование конгломератообразных осадков связано с процессами химической и механической цементации прилегающих к фильтру водоносных пород или гравийной обсыпки химическими отложениями. Такие осадки характеризуются высокой прочностью, которая с течением времени увеличивается. Кроме этого осадки отлагаются на внутренней и наружной поверхностях и в проходных отверстиях фильтров, между каркасом и водоприемной поверхностью, в гравийной обсыпке, в породах, прилегающих к фильтру, на водоподъемных трубах. Интенсивность колюматации в значительной степени зависит от конструкции фильтров.

В наибольшей степени подвержены механической и физико-химической колюматации сетчатые фильтры, имеющие наибольшие входные сопротивления, способствующие увеличению скорости движения воды, турбулизации и сильному перемешива-

нию потока в прифильтровой зоне. При отборе воды посредством фильтров с сетками большая часть осадков скапливается непосредственно у водоприемной поверхности; глубина кольматажа прифильтровой области, как правило, невелика и обычно не превышает 10-15 см. Такие фильтры имеют ограниченную механическую прочность, которая в процессе эксплуатации пьезометров снижается вследствие электрохимической коррозии каркаса и сетки. В связи с этим очистка сетчатых фильтров от кольматирующих отложений представляет значительную сложность.

В меньшей степени подвержены кольматации щелевые и проволочно-каркасные фильтры, которые по сравнению с сетчатыми имеют меньшие потери давления и оказывают не столь значительное влияние на физико-химические изменения в окружающем водоносном слое. Такие фильтры имеют значительную механическую прочность, что уменьшает опасность их повреждения или разрушения при использовании известных способов восстановления чувствительности пьезометров.

При восстановлении чувствительности напорных пьезометров важной задачей является правильное определение причин, вызвавших уменьшение их работоспособности. Исходными данными являются сведения о конструкции, статическом и динамическом уровне подземных вод, содержании механических и химико-биологических примесей в воде, характеристике водоносного пласта, геолого-литологического строения водовмещающих пород и грунтов. Причины снижения чувствительности напорных пьезометров могут быть различны: пескование в результате нарушения естественного фильтра при неправильном режиме эксплуатации; повреждение водоприемной поверхности фильтров или пробки отстойников; некачественное тампонирующее затрубного пространства; разрушение обсадных труб и фильтра; повреждение сальника; утечки в водоподъемной трубе; просадки гравийной обсыпки фильтров; попадание в ствол пьезометра посторонних предметов и др.

С целью оптимизации проведения экспериментальных работ по восстановлению чувствительности напорных закладных пьезометров непрямолинейной формы были проведены лабораторные исследования некоторых параметров известных реагентов,

применяющихся при промывке скважин [3]. При этом исследование реагентов производили, принимая во внимание следующие соображения:

1. Реагент должен хорошо растворяться в воде при нормальной и низкой положительной температуре.
2. Реагент должен обеспечивать быстрый и полный переход в раствор соединений кальция, магния, железа с внутренней поверхности скважины.
3. Реагент не должен оказывать негативного воздействия на материал ствола пьезометра.
4. Реагент должен быть токсикологически безопасен и характеризоваться низкой летучестью.

Исходя из вышеизложенного, в качестве химического вещества для очистки пьезометров было решено подобрать секвестрирующий реагент, хорошо растворимый в воде с основной средой водного раствора. С целью установления оптимальной концентрации рабочего раствора была проведена серия опытов, в ходе которых была установлена зависимость потери массы образцом и уменьшения его поверхности в зависимости от концентрации исходного раствора реагента. В качестве образцов принимали кубы из природного известкового туфа. Размер образцов до и после опыта определяли как среднее из трех измерений. Разность масс вычисляли как разность массы в водонасыщенном состоянии до и после проведения опыта. Образцы выдерживали в рабочем растворе на протяжении 24 часов. Кроме этого, для определения разности в скоростях удаления с поверхности образцов соединений кальция с различной структурой была проведена также серия параллельных опытов, в которых в рабочий раствор секвестанта помещали образцы из известкового туфа, мрамора и гипса.

Для определения эффективности действия реагента в отношении ионов  $\text{Ca}^{2+}$  в присутствии  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , а также для определения эффективности использования данного реагента при борьбе с отложениями гематита, образцы известкового туфа и мрамора помещали в раствор реагента совместно с покрытыми слоем ржавчины стальными образцами в ванну с высокочастотным возбуждением.

В результате выполненных лабораторных исследований получены следующие выводы:

1. Для эффективности растворения загрязнений внутренней полости напорных пьезометров рекомендуется использовать различные разновидности комплексообразователей.

2. Реагент должен хорошо растворяться в воде при нормальной и низкой положительной температуре; должен обеспечивать быстрый и полный переход в раствор соединений кальция, магния, железа с внутренней поверхности пьезометра; не должен оказывать негативного воздействия на материал ствола пьезометра; должен быть токсикологически безопасен и характеризоваться низкой летучестью.

3. Для повышения эффективности растворения и удаления загрязнения из ствола напорного пьезометра рекомендуется использовать вибрационные установки с непосредственной передачей возбуждения либо на ствол, либо на воду внутри пьезометра.

Для проверки правильности выбора реагентов, подтверждения конструкторских решений по комплектации, сборке и установке оголовков и для отработки операций по восстановлению чувствительности пьезометров были выбраны пьезометры на Хоробровской ГЭС. В целях контроля фильтрационного режима в гидротехнических сооружениях Хоробровской ГЭС была заложена режимная сеть из наблюдательных пьезометров. Ряд пьезометров установлен в теле грунтовых плотин в непосредственной близости от переливной бетонной плотины. Пьезометры имеют вертикальный ствол, выполненный из обсадных труб, по составу состоящие из обычной стали, с установкой фильтровой части в хорошо проницаемых грунтах – опесчаненных супесях – и расположены в первом безнапорном водоносном горизонте, сформированном подпором реки. Перепад уровней верхнего и нижнего бьефов составляет 3,5 м. Конструктивно пьезометр представляет собой фильтровую колонну диаметром 89 мм, глубиной 10 м и отстойник глухого типа длиной 1,5 м. Фильтровая часть выполнена в виде дырчатого каркаса с проволочной обмоткой и обернута снаружи сеткой галунного плетения. Длина фильтровой части составляет 1,5 м. Снаружи по контуру фильтра устроена засыпка песчано-гравийной смесью для предотвращения кольматации фильтровой сетки. Скважность фильтра определена в пределах 20 %. На устьевой части пьезометра для предотвращения попадания

поверхностного стока установлен кондуктор из обсадных труб диаметром 168 мм, длиной 1,5 м с глиняной пробкой. Пьезометр сверху оборудован крышкой. Статический уровень на июнь 2016 г. составил 7,15 м от уровня земли.

В соответствии с требованиями [4] на устьевой части пьезометра был собран оголовок для создания закрытой системы с одновременной подачей реагентов и последующей циркуляции раствора и сброса загрязненной кольматантом воды из пьезометра. Для оценки герметичности ствола пьезометра были выполнены мероприятия по осмотру внутренней поверхности фильтровой колонны. Эрлифтным способом из пьезометра была удалена вода и поинтервално (интервал 1 м) был произведен визуальный осмотр внутренней поверхности. По результатам осмотра можно сделать вывод о том, что ствол не имеет повреждений, отсутствуют участки коррозии, а также не были выявлены зоны попадания воды из внешнего контура пьезометра. Также было определено время восстановления уровня воды после понижения на 2,5 м. Время восстановления УГВ составило 25 мин. После диагностики в ствол пьезометра был опущен нагнетательный шланг и подключены водоотводящие трубы для отвода воды из затрубного пространства пьезометра. Для организации промывки в систему был включен циркуляционный насос с отстойниками. В пьезометр был залит реагент с концентрацией 0,5 кг/л – химическое вещество, способное диспергировать осадок в фильтровой части пьезометра. Циркуляция реагента внутри ствола пьезометра была произведена в течение 24 часов. Давление циркуляционного насоса удерживали в пределах 2 атм. Указанное давление было подобрано из расчета сопротивления потока воды через нагнетательный шланг, сохранения ствола полностью заполненным водой, предотвращения разрыва фильтровой сетки, а также для равновесия гидродинамического режима водоносного горизонта и внутритрубного заполнения. После циркуляции к оголовку была присоединена промывочная машина и произведена промывка пьезометра до полного осветления воды. В процессе промывки вели наблюдения за состоянием воды, исходящей из ствола. Критерием окончательной промывки пьезометра приняты: полное осветление исходящей воды и стабилизация показателей рН

воды. В первое время промывки из ствола вымывалась вода, насыщенная растворенными веществами. В дальнейшем наблюдалось постепенное осветление воды. Время промывки до полного осветления составило 24 ч. В течение промывочных работ производили отбор воды для определения физического состояния и окислительно-восстановительного потенциала. Контроль протекания процесса промывки производился по показаниям рН. При этом уровень рН промывочной воды, принятый за критерий, составлял 7,8.

По результатам наблюдений весь растворенный осадок внутри пьезометра был вымыт за 1 час. Показатель рН снизился с 10,35 до 7,90, что указывает на полное растворение реагента в воде и его химическую связь с кольматантом. Осадок под воздействием реагента перешел в растворенное состояние в виде суспензии. Для очищения ствола пьезометра от растворенного осадка потребовалось 180 литров воды.

С целью подбора эффективной концентрации раствора реагента была произведена повторная промывка пьезометра при использовании рабочего раствора с концентрацией 1 кг/л. Перед повторной промывкой в пьезометре был восстановлен статический уровень, который составил 7,10 м. Период растворения осадка при повторных исследованиях составил 1 сутки. Операции по подготовке и непосредственной промывке пьезометра выполняли, как и при первом случае.

Время, необходимое до полного осветления воды составило практически 2 часа. При этом грязная вода, как отражение растворенного кольматанта, за 0,5 часа практически полностью была сброшена из пьезометра. В дальнейшем промывочная вода изливалась практически прозрачной с проявлением осадка и пескования. Проявление пескования указывает на некоторую степень заиливания отстойника.

Анализ изменения показателя рН указывает на практически полную отмывку пьезометра от растворенного осадка. Перед промывкой рН составляло 11,32. Через час, когда изливающаяся вода из пьезометра практически стала прозрачной, показатель рН снизился до 8,58. В дальнейшем значения рН снизились в пределах одной десятой единицы, что указывает на стабилизацию

химического состава воды, поступающей из пьезометра. Как и в первом случае промывки, объем воды, затраченный на вымывание кольматанта до осветления, оказался в пределах 200 литров, что в данном случае характеризует быстрое и практически полное растворение осадка. В течение всего периода промывки было затрачено 700 литров воды. По окончании промывки пьезометра было замерено восстановление уровня воды. После мгновенного понижения способом тартания на 2,5 м время подъема уровня грунтовых вод составило 15 мин.

В результате проведенных работ на Хоробровской ГЭС был промыт пьезометр, у которого была увеличена водопроницаемость – сокращение времени восстановления уровня воды после понижения на 2,5 м с 25 мин до 15 мин. Таким образом, чувствительность пьезометра была увеличена на 40 %.

Также в процессе опытно-конструкторских исследований на Хоробровской ГЭС была разработана и затем утверждена в проекте производства работ конструкция оголовка для дальнейшего выполнения работ по восстановлению чувствительности напорных пьезометров на Новосибирской ГЭС. Отработан состав и очередность процедур по подготовке и непосредственной промывке ствола пьезометра. Подобрана окончательная концентрация реагента для декольматации загрязнения напорных пьезометров на Новосибирской ГЭС.

По согласованию с руководством и эксплуатационными службами Новосибирской ГЭС был выбран плохо работающий напорный пьезометр непрямолинейной формы – пьезометр № 5 под гидроагрегатом № 6. По наблюдениям службы диагностики ГЭС напорный пьезометр № 5 ГА 6 в течение длительного периода эксплуатации показывал различные значения напоров, которые не аппроксимируются с показаниями напорных пьезометров в створе и показаниями уровней воды в верхнем и нижнем бьефах.

Конструктивно напорный пьезометр № 5 гидроагрегата № 6 представляет собой трубопровод диаметром 56 мм, собранный из отдельных секций. Материалом секций является нержавеющая сталь толщиной 2,5-3 мм. Устьева часть пьезометра поднимается над полом помещения на высоту 1,0 м. Глухая часть пьезометра до фильтра длиной 25 м проложена в бетонном массиве и

имеет 2 поворота на 90 град. При этом первый поворот приурочен к участку перехода вертикальной секции в горизонтальное расположение. Второй участок характеризуется переходом одной секции во вторую поворотом в сторону камеры гидроагрегата в горизонтальном положении. На участках сочленения секций труб повороты выполнены крутоизогнутыми трубными уголками по резьбе. Фильтр напорного пьезометра изготовлен из трубы диаметром 56 мм. Перфорация фильтра – дырчатая. Фильтрующая поверхность исполнена в виде проволочной обмотки по каркасу фильтровой трубы и обмоткой сверху сеткой галунного плетения. Скважность напорного пьезометра составляет 33 %. По результатам инженерных изысканий породами, в которых установлен фильтр пьезометра № 5, являются песчано-глинистые сланцы массивной текстуры с  $K_{\phi}=0,1$  м/сут.

Перед началом работ по восстановлению чувствительности пьезометра были выполнены работы по диагностике, включающие визуальное обследование ствола на максимально возможную его протяженность с поинтервальной фиксацией участков коррозии, механического разрушения и, при необходимости, наблюдения за водопроявлением на различных участках при поинтервальном перекрытии ствола. В результате визуального обследования установлено, что ствол пьезометра не имеет механических повреждений и не отмечена связь с внешним проявлением воды. Было выполнено определение фильтрационных характеристик пьезометра. Дебит составил 15 л/час. Давление манометра после полного восстановления напора составило 1,4 атм. Время восстановления давления – 40 мин. При этом отмечено, что сброс давления осуществлялся небольшим кратковременным изливом воды (в пределах 1-2 литров) и продолжительным выходом негорючего газа – время газопроявления составляло несколько минут.

На устье пьезометра был собран и установлен оголовок в соответствии с требованиями [4]. Конструктивно оголовок выполнен из фитингов с установкой запорных кранов для возможности не только сброса или подачи воды, но также при необходимости подключения требуемого водопроводного оборудования. Через верхнюю заглушку на оголовке был введен подающий шланг практически на всю длину ствола пьезометра – при длине ствола

30 м шланг протолкнули на 24 м через 2 изгиба в 90 градусов. Применяемый шланг имеет диаметр 8 мм и изготовлен из полиматериалов, позволяющих создавать максимальный изгиб в 90 градусов с радиусом до 60 мм. Оголовок был обвязан подающими и отводящими шлангами через циркуляционный насос и отстойники. Одновременно на ствол была установлена высокочастотная вибрационная установка. Через отстойники было залито химическое вещество для растворения осадка в пьезометре. Была запущена циркуляция в течение 36 ч. После этого была предусмотрена промывка от реагента и растворенного кольматанта. Циркуляцию в закрытой системе производили с давлением на насосе в 3 атм. для сохранения равновесия гидродинамического режима водоносного горизонта и внутритрубного заполнения, преодоления сопротивления потока воды через нагнетательный шланг, сохранения ствола полностью заполненным водой, а также для предотвращения возможного разрыва фильтровой сетки. Через 7 часов циркуляции была произведена остановка циркуляционного насоса, ввиду того что закрытая циркуляционная система была загазована. Затем система была вновь заполнена водой, запущена и для предотвращения загазованности на одном из отстойников перед циркуляционным насосом была установлена система сброса собираемого газа. Таким образом, была произведена декольматация загрязнения внутри ствола пьезометра в течение 36 часов.

После работ по растворению осадка была выполнена промывка до полного осветления воды. Период промывки составил 24 часа. Для промывки пьезометра по согласованию с эксплуатационными службами Новосибирской ГЭС была использована обратная вода дренажной системы с подачей давления до 2 атм. Поэтому давление промывочной воды на выходе из подающего шланга в стволе пьезометра составило не более 1,5 атм. В начале промывки истекла вода с большим содержанием растворенного кольматанта; вода имела бурый цвет, и в пробах после непродолжительного отстоя наблюдался осадок в виде гелеобразных хлопьев. В процессе промывки отбирали пробы воды для оценки степени декольматации загрязнения. Контроль протекания процесса промывки производили по показаниям рН. При этом уровень рН в промывочной воде, принятый за критерий, составлял 8,2. После

заливки в напорный пьезометр реагента значение рН составило вначале 9,86 и затем поднялось до 12,46, что указывает на полное растворение кольматанта. После практически полной промывки пьезометра чистой водой значение рН снизилось до 10,4. При этом из пьезометра изливалась практически прозрачная вода.

По результатам выполненных работ был составлен и согласован с эксплуатационными службами Новосибирской ГЭС акт сдачи-приемки напорного пьезометра № 5 ГА-6. Как отражено в акте, после продолжительной промывки пьезометра расход воды был увеличен с 15 л/ч до 21 л/ч., что составляет увеличение чувствительности практически на 30 %. Давление в пьезометре восстановилось в течение 25 мин против первоначального времени в 40 мин, т.е. сократилось практически в 2 раза. При этом значения показаний манометра на испытуемом пьезометре стало коррелироваться с показаниями манометров на пьезометрах, расположенных в створе от ВБ к НБ – испытуемый пьезометр имеет фильтрационное давление 1,2 атм., следующий напорный пьезометр № 6 – 1,05 атм., и следующий за ним пьезометр № 8 – 0,85 атм.

В результате опытно-производственных исследований зафиксировано:

1. Давление по манометру изменяется, что указывает на работоспособность напорного пьезометра и, в частности, фильтровой части.

2. При изменении уровня воды в верхнем бьефе давление воды в пьезометре изменяется в сторону изменения отметок НПУ.

3. Показания давления воды в пьезометре № 5 при различных отметках верхнего и нижнего бьефов коррелируются с показаниями давления воды в пьезометрах, расположенных в створе, – пьезометры № 6 и № 8. Коэффициент вариации по всем точкам в среднем получился выше 80 %.

### **Выводы:**

1. В результате выполненных исследований подобран эффективный химический состав реагентов, отвечающих следующим требованиям: реагент должен хорошо растворяться в воде при нормальной и низкой положительной температуре; должен обеспечивать быстрый и полный переход в раствор

- соединений кальция, магния, железа, органических соединений с внутренней поверхности пьезометра; не должен оказывать негативного воздействия на материал ствола пьезометра; должен быть токсикологически безопасен и характеризоваться низкой летучестью.
2. Установлено экспериментально, что для повышения эффективности растворения и удаления загрязнения из ствола напорного пьезометра рекомендуется использовать вибрационные установки с непосредственной передачей возбуждения либо на ствол, либо на воду внутри пьезометра.
  3. Отработан состав и очередность процедур по подготовке и непосредственной промывке ствола пьезометра.
  4. На Новосибирской ГЭС были выполнены работы по восстановлению чувствительности напорного пьезометра с непрямолинейной формой ствола. В результате опытно-производственных исследований чувствительность напорного пьезометра увеличилась на 30%.
  5. Подобные работы были впервые выполнены с положительным результатом на действующих гидроэлектростанциях.
  6. Разработанная методика восстановления чувствительности напорных пьезометров непрямолинейной формы может быть рекомендована для использования при восстановлении работоспособности пьезометров на ГЭС филиалов ПАО «РусГидро».

### **Литература**

1. Романенко В. А., Вольницкая Э. М. Восстановление производительности водозаборных скважин. — Л.: Недра, 1986. — 112 с.
2. Гаврилко В. М., Алексеев В. С. Фильтры буровых скважин. — М., Недра, 1976, — 344 с.
3. Алексеев В. С., Гаврилко В. М., Гребенников В. Т. Рекомендации по восстановлению производительности водозаборных скважин реагентными методами. — М., ВНИИ ВОДГЕО, 1975. — 96 с.
4. ГОСТ 13846-89. Арматура фонтанная и нагнетательная. Типовые схемы. Основные параметры и технические требования к конструкциям. — М., ГОССТАНДАРТ, 1988, — 15 с.

## КРАТКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ РАЗБОРКИ БЕТОНА ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

### A BRIEF REVIEW OF THE METHODS OF CONCRETE DISMANTLING DURING RECONSTRUCTION OF ENERGY STRUCTURES

*Хрипакова Ю.В., Евдокимова И.В.* (АО «НИИЭС»)

В статье рассмотрены основные промышленно доступные методы разборки бетона, сопоставлены их основные достоинства и недостатки.

Разрушенный бетон, методы разборки бетона, ремонтный материал, бетон массивных сооружений.

---

The article describes the main industrial methods available for dismantling of concrete, including comparing their main advantages and disadvantages.

Destroyed concrete, methods of dismantling of concrete, repair material, concrete massive structures.

#### **Введение**

Разборка ослабленного бетона строительных конструкций и сооружений является важным этапом ремонтных и восстановительных работ. Качество проведения этого этапа оказывает влияние не только на сцепление омоноличивающего материала с основанием, но и на долговечность вновь уложенного бетона. Во всех случаях осуществления ремонтных работ и восстановительных мероприятий следует стремиться к наибольшей эффективности их проведения и одновременно не допустить дополнительного повреждения «здорового» бетона вследствие появления микротрещин. Добиться этого можно подбором оптимального способа разборки разрушенного бетона ремонтной зоны в зависимости от глубины и площади выработки и условий проведения работ. При этом следует иметь в виду следующие соображения:

1. При проведении работ следует стремиться к наиболее полной выработке разрушенного бетона. При этом, если проектом проведения ремонтных работ заложено проведение выработки на

фиксированную глубину, возможно, следует рассмотреть вариант комбинирования нескольких различных методов разборки, так как при работе со «здоровым» бетоном некоторые методы более эффективны, чем другие.

2. Тот или иной метод разборки бетона следует выбирать исходя из конкретных условий на площадке проведения работ (работа на открытой площадке или в стесненных условиях, доступности того или иного оборудования, а также возможности организации рабочего места для его использования, квалификации рабочего состава и т.д.).

3. При использовании того или иного метода следует обеспечить соблюдение соответствующих требований и норм техники безопасности.

4. Выбранный метод должен удовлетворять условиям экономической эффективности и экологической безопасности [2, 3].

### Основные методы разборки бетона

**Буровзрывной метод.** Данный метод использует быстрое расширение газа при взрыве зарядов, заключенных в шпурах, для обеспечения контролируемого растрескивания и удаления бетона. Применим при разработке бетона массивных сооружений на глубину более 25 см и при больших объемах разработки. Использование подрывных зарядов считается во многих случаях наиболее удобным и наиболее экономически оправданным способом разработки бетона массивных сооружений. Основным недостатком данного метода является возможность повреждения «здорового» бетона и прилегающих конструкций. В состав подрывных работ обыкновенно входит бурение шпуров вдоль границы удаления материала и применение методов контролируемого и последовательного взрыва. Часто используемый метод контролируемого взрыва – **взрывная отбойка по точно заданному контуру выработки** – предполагает применение детонационного шнура для распределения взрывной энергии по всей длине шпура, что позволяет избежать пиковых концентраций энергии взрыва, опасных для остающегося бетона. **Буферное взрывание** – более безопасное, но менее контролируемое – принципиально

не отличается от взрывной отбойки за исключением того, что для защиты от воздействия пиковых концентраций энергии взрыва в шпурсы забивается мокрый песок. Для снижения излишней выработки периметр предполагаемой ремонтной зоны следует ограничивать пропилами. Метод **последовательных взрывов** позволяет вводить значительные паузы между отдельными взрывами, которые могут быть направлены на оптимизацию количества взрывчатки, детонирующей при взрыве при сохранении на приемлемом уровне давления взрывной волны, возникающей вибрации и количества отлетающей породы. Применение данного метода требует жесткого соблюдения правил техники безопасности и привлечения специально обученного персонала, также при хранении и транспортировке взрывных зарядов следует соблюдать повышенные меры предосторожности [3].

**Гидроножницы и гидроклеши (гидрокусачки).** Несмотря на то что зачастую гидроножницами и гидрокусачками называют одну и ту же насадку, это является не совсем правильным, так как первые относятся скорее к режущим насадкам, а вторые – к давящим. **Гидроножницы** могут быть использованы для удаления бетона конструктивных элементов (от дорожных плит до несущих балок) при глубине плоскости скалывания не превышающей 1,8 м. Данный метод больше подходит для полного демонтажа конструктивных элементов, чем для частичного удаления материала с целью проведения дальнейшего ремонта. **Гидрокусачки** чаще всего используются для освобождения арматуры от бетона и измельчения больших кусков мусора, полученных при использовании других методов разборки (к примеру, при использовании расширяющихся составов). Метод позволяет проводить работы по разрушению строительных конструкций без ударных воздействий, без отлетающего мусора, с низким уровнем запыления и шумовой нагрузки. Основными недостатками метода являются необходимость нанесения пропилов по периметру ремонтной зоны, создания отверстия или свободного угла, с которого инструмент начинает работу, а также то, что обнажаемая арматура, как правило, сильно повреждается и не может быть использована повторно. Помимо этого эффективность метода зависит от состо-

яния бетона конструкций – для здорового бетона эффективность метода падает [2, 3].

**Резка бетона.** Метод резки включает в себя нанесение пропилов на всю глубину вдоль периметра ремонтной зоны для удаления бетона в виде отдельных блоков. Максимальный размер таких блоков определяется грузоподъемностью доступных подъемников и транспортирующего оборудования.

### **1. Абразивная водоструйная резка.**

Используется в тех случаях, когда имеется доступ только к одной поверхности элемента, максимальная глубина прореза – 50 см. Использование абразива позволяет производить резку арматуры и твердого заполнителя. Удаление разрушенного бетона происходит достаточно медленно и обыкновенно требует больших затрат, чем при резке алмазными дисками. Большие давления, под которыми работает водопескоструйный агрегат (200-300 МПа), требуют принятия дополнительных мер безопасности. Данный метод достаточно затратен, требует организации водостока, характеризуется высоким шумовым загрязнением.

### **2. Резка алмазными дисками.**

Используется в тех случаях, когда для выработки доступна только одна поверхность разрабатываемой конструкции, максимальная глубина прореза – 60 см. Процесс резки происходит с минимальным количеством вибраций и повреждения здорового бетона. Перед началом работ следует уточнять густоту армирования и расположение армирующих компонентов, так как это влияет на выбор используемого диска. Различают диски для влажной и сухой резки – для первых необходимо применение водного охлаждения, для вторых оно не требуется. Следует помнить, что инструмент, предназначенный для работы с дисками для сухой резки, не может применяться с дисками, требующими водного охлаждения; также важно, чтобы число оборотов, поддерживаемое пилой, не превышало рекомендуемое для того или иного используемого диска. Резка алмазными дисками также используется в качестве вспомогательного метода при нанесении надрезов по периметру ремонтной зоны при использовании других методов выработки бетона. Эффективность метода

снижается с увеличением густоты армирования. Также особое внимание следует уделить защите органов дыхания рабочих, так как в процессе резки происходит выделение большого количества микроскопической пыли.

### **3. Резка канатной машиной.**

Может быть использована для резки массивного бетона, а также для работы в труднодоступных местах. Цепи, у которых технические алмазы закреплены в металлической матрице, стоят дороже, но работают дольше, чем с цепи с алмазами, нанесенными гальваническими методами. При использовании цепей с закрепленными алмазами необходимо следить за тем, чтобы длина цепи была достаточной, так как в процессе резки цепь сильно истирается и при замене новая цепь не пройдет в начатый надрез. Во многих случаях данный метод не так экономически эффективен, как использование подрывных зарядов, ударного импульса и предварительного раскалывания.

### **4. Строчное сверление.**

Может быть использовано в случае, если для выборки доступна только одна поверхность бетонной конструкции и необходимая глубина надреза больше, чем получаемая при использовании алмазных дисков. В случае, если есть доступ к двум противоположным поверхностям элемента, предпочтительно использовать метод канатной резки. Во всех случаях проведения работ при работе с неармированным бетоном применение ударно-роторного бурения более целесообразно и экономически оправдано, чем сверление алмазным кольцевым сверлом. Для армированного бетона более целесообразно использование алмазного кольцевого сверла. На эффективность проведения работ оказывают влияние прочность бетона (при использовании ударно-роторного бурения) и прочность заполнителя (при использовании алмазного кольцевого сверла). Глубина разреза в значительной степени зависит от способности оборудования поддерживать перекрытие высверленных отверстий путем регулирования их глубины и диаметра. Чем больше глубина надреза, тем больше должен быть диаметр высверленного отверстия и тем больше затраты на производство работ. Непрорезанные участки между соседними отверстиями затрудняют удаление выработанного материала.

## **5. Термическая резка.**

Термическую резку бетона и железобетона успешно осуществляют устройством, получившим название «кислородное копьё». Принцип действия его заключается в плавлении бетона продуктами сгорания железа в струе кислорода при температуре 3800-4400°С. Данный метод может быть использован для разработки густоармированного бетона и предварительно напряженного бетона в случае, если условия проведения работ позволяют организовать отвод расплава бетона из надрезов. На верхнем слое остающегося бетона остаются термические повреждения, концентрирующиеся вокруг стальной арматуры. Оборудование требует жесткого соблюдения требований техники безопасности при хранении и транспортировке [2, 3].

**Ударные методы.** Ударные методы включают в себя циклическое воздействие ударной нагрузки на поверхность ремонтной зоны для раскалывания и дробления бетона. Ударные методы иногда используются так же, как и режущие методы для разбора бетона вдоль периметра ремонтной зоны тонких элементов, при этом арматура должна быть срезана для предотвращения растрескивания здорового бетона. Производительность методов, использующих ударное воздействие, в значительной степени зависит от типа используемого оборудования и прочности разрабатываемого бетона. Объем выборки неармированного бетона может составлять 8-800 м<sup>3</sup> за 8-часовой рабочий день, армированного – 10-570 м<sup>3</sup>. Норма выборки бетона при использовании ручного бетонолома составляет приблизительно 9 м<sup>3</sup> за 8-часовую смену.

### **1. Автобетонолом.**

Используются для полного или частичного разрушения бетонных конструкций при больших требуемых скоростях демонтажа. Различают пневматические и гидравлические бетоноломы. Данный способ является достаточно эффективным для удаления больших объемов бетона, однако энергия импульса, подводимая к бетону, должна строго регулироваться для предотвращения разрушения бетона вне ремонтной зоны. Эффективность метода зависит от размера молота, густоты армирования и условий проведения работ. Современные бетоноломы способны вырабатывать энергию

удара 135-27000 Дж при скорости 300-800 ударов в минуту. Часто наблюдается появление микротрещин в оставшемся бетоне и арматурной стали. Последующая гидроструйная обработка может помочь удалить некоторую часть поврежденного в ходе работ бетона.

## **2. Ручной бетонолом.**

Используется обыкновенно при незначительных объемах работ, в местах, доступ к которым затруднен, или при необходимости выработки большого объема сильно поврежденного бетона. Может быть использован в качестве вспомогательного метода. Различают бетоноломы, работающие под действием гидравлического давления, пневматического давления или оснащенные бензиновым или электрическим мотором. Наиболее часто, благодаря простой и надежной конструкции, используются пневматические молотки, которые выпускаются различными производителями и, в зависимости от предполагаемых условий применения, обладают различными размерами и массой. Ударная сила, подводимая к бетону для его разрушения, в этом случае определяется энергией удара и количеством ударов в минуту. Энергия удара изменяется в пределах 1-100 Дж, скорость – 900->2000 ударов в минуту. Необходимое давление воздуха лежит в пределах 420-620 кПа, потребление воздуха 1-2 м<sup>3</sup>/мин [6].

**Гидроразрушение.** Работы осуществляются посредством аппарата, состоящего из блока питания, включающего двигатель, помпу и резервуар, и гидромонитора. Для некоторых моделей есть возможность подключения 2 блоков питания к одному гидромонитору с целью увеличения производительности. Применение данного метода не приводит к появлению микротрещин в остающемся бетоне и повреждениям арматуры. Требуется большая затрата воды – 40-60 л/мин для устройств, управляемых вручную, до 500 л/мин – для механизированных, и организации стока. Аппарат способен подавать воду под давлением 80-140 МПа для удаления дефектного бетона, до 300 МПа – для конструкционной резки железобетонных конструкций. Некоторые модели имеют возможность проводить выработку бетона с вертикальных и потолочных поверхностей. При помощи этого метода возможно удаление бетона, ослабленного или поврежденного в ходе предшествовавшей механической выработки. Основные ограничения данного метода сводятся к высокой затратности, снижению

эффективности при работе со здоровым бетоном и изменению профиля остающегося бетона в зависимости от глубины или ориентации дефектов. При удалении бетона на глубину, близкую к толщине элемента, возможны промывы. Удаление материала, находящегося за металлическим армированием, затруднено и должно осуществляться либо при помощи дополнительных методов разрушения бетона, либо (если глубина разработки это позволяет) изменением направления струи воды. Требуется подвода большого количества воды, возможен отлет осколков. Выделяющееся на поверхности оставшегося бетона цементное молочко должно быть удалено с поверхности до высыхания [3, 4].

**Шпуровые методы предварительного раскалывания.** Сущность метода состоит в нагнетании раскливающего давления в упорядоченно расположенных шпурах для обеспечения контролируемого растрескивания структуры. Данные методы могут быть использованы как в качестве самостоятельных способов разборки старого бетона, так и для облегчения удаления бетона другими методами. Положение и глубина шпуров оказывают влияние на направление образующейся раскалывающей плоскости. Для всех подобных методов развитие раскалывающей плоскости замедляется в присутствии арматуры, направленной по нормали к ней. Метод неэффективен для сильно поврежденного бетона, большое расстояние между шпурами может привести к потере контроля над развитием плоскости раскалывания.

### **1. Расширяющиеся составы.**

Метод может быть использован для получения плоскости раскалывания в том случае, когда диаметр высверливаемого шпура в 10 и более раз меньше его длины. Рекомендуется к использованию в случае необходимости получения раскалывающей плоскости достаточной глубины. Основными недостатками метода являются ограничения со стороны температурного интервала применения расширяющихся составов (смеси с наибольшим тепловыделением работают в интервале температур  $-5 \div +10^{\circ}\text{C}$ ) и необходимость обеспечения отсутствия людей в непосредственной близости от места проведения работ в ранние часы гидратации, так как расширяющаяся смесь имеет тенденцию вылетать из скважин, в особенно-

сти в условиях высоких температур или если демонтируемая конструкция находится на солнце. В таких случаях лучше прикрывать шпуры с внесенным составом брезентом или влажной соломой. В общем случае температурный интервал применения расширяющихся составов ограничен  $40^{\circ}\text{C}$ , хотя существуют специальные составы, предназначенные для применения при повышенных температурах (до  $50^{\circ}\text{C}$ ). Расширяющиеся составы, состоящие из гранулированного порошка или образующие шликер при добавлении воды лучше всего использовать в вертикальных или близких к вертикальным шпурах. Некоторые составы образуют при затворении глиноподобную смесь, которую можно использовать при работе с вертикальными конструкциями. Температура воды затворения должна составлять около  $15^{\circ}\text{C}$ , вода вводится в соотношении, как правило,  $1/3$ , если производителем не указано иного.

Обыкновенно использование этого метода требует просверливания шпуров диаметром 35–40 мм на глубину 80% от толщины удаляемого бетона, при этом перед введением расширяющегося агента может быть необходима предварительная просушка шпуров сжатым воздухом. Расстояние между шпурами не должно превышать 30 см, при этом для оптимального распределения расширяющей нагрузки некоторые шпуры следует оставлять пустыми. Пустые шпуры также служат для остановки трещины на краю ремонтной зоны. Образование плоскости раскалывания происходит за 2–8 часов в зависимости от влажности среды и температуры; образующееся в ходе этого избыточное давление может достигать до 130 МПа. В общем случае, образование трещин с раскрытием 10–30 мм наблюдается по прошествии 1 суток. Данный метод может быть использован в тех случаях, когда в ходе демонтажа необходимо избежать возникновения сильных вибраций, или в местах, подход тяжелой техники к которым затруднен. Ремонтный материал обладает высокощелочной средой, поэтому рабочий персонал должен быть снабжен средствами индивидуальной защиты, а также проинструктирован никогда не смотреть в направлении уже залитого шпура из-за возможного выброса материала. В некоторых случаях для ускорения растрескивания рекомендуется проводить увлажнение поверхности удаляемого бетона.

## **2. Микровзрывы.**

Метод предназначен для образования плоскости раскалывания в более массивных сооружениях при необходимости удаления на глубину 25 см от поверхности и более. Использование микровзрывов приводит к развитию плоскости раскалывания в направлении, перпендикулярном плоскости шпура, при этом, вследствие использования зарядов со сравнительно небольшой энергией взрыва, при расчете схемы выбуривания шпуров следует применять во внимание крупность и тип использованного при возведении сооружения заполнителя и расстояние до свободного края. Обычно 2 заряда вводятся в 25-сантиметровый шпур диаметром 8–10 мм. Как правило, введение зарядов на большую глубину может привести к развитию плоскости раскалывания внутри массива без проявления трещин на наружной поверхности. Необходима предварительная продувка шпура сжатым воздухом для исключения оседания пыли на бойке взрывателя. Энергии взрыва достаточно для вскрытия толстого слоя бетона, однако в ходе работ образуется сравнительно небольшое количество отлетающих осколков. Эффективность метода значительно снижается для ослабленного бетона и при работе с элементами, возведенными с использованием слабого заполнителя.

## **3. Гидравлический клин.**

Используется при глубине раскалывания 1,2 м и менее. В большинстве случаев гидравлический клин состоит из гидравлической системы и забивного клина. Источником энергии может служить компрессор или бензиновый или электрический мотор. В зависимости от типа используемого гидроклина может потребоваться предварительное высверливание шпуров глубиной до 30–70 см и диаметром 20 см. Контроль направления плоскости раскалывания осуществляется глубиной высверленных шпуров и их взаимным расположением, а также изменением ориентации клина. При использовании данного метода расклинивающее давление может достигать 2-3 МН. При использовании этого метода (в отличие от расширяющихся растворов и микровзрывов) возможна работа с ослабленным бетоном. Основным ограничением метода является невозможность введения клина в то же место после удаления отколовшегося блока [2-7].

### **Строительные роботы**

В последнее время для работы на сложных объектах в стесненных или опасных условиях все чаще применяются строительные роботы. Промышленно выпускаются строительные роботы различных размеров массой от 500 до 11000 кг. Данное оборудование может быть использовано для производства работ в различных условиях, в том числе, когда необходима выработка большого количества материала при невозможности использования более тяжелой техники. В зависимости от размера роботы могут быть использованы как для работы в закрытых помещениях, шахтах и труднодоступных местах (небольшие модели с электрическим двигателем), так и для удаления стеновых и потолочных элементов. Длина стрелы наиболее тяжелых моделей достигает 9,6 м. Обычно строительные роботы оснащены широким спектром навесного оборудования: гидромолот, ковш, гидравлические кусачки, гидромонитор, что позволяет решать задачи по демонтажу конструкций и сооружений в комплексе. Дистанционное управление позволяет оператору осуществлять контроль за протеканием работ на расстоянии, не приближаясь к опасной или труднодоступной зоне. Недостатками подобной техники является высокая стоимость, необходимость в квалифицированном операторе, а также те недостатки, которые присутствуют у того или иного метода разрушения бетона, используемого роботом в зависимости от навесного оборудования.

### **Заключение**

Для обеспечения надежного сцепления ремонтного материала с основанием в ходе проведения выборки должен быть удален весь разрушенный или ослабленный бетон. Стремление сэкономить время и деньги на этой стадии может привести к недолговечности результатов ремонтных работ и быстрому выходу из строя восстановленного участка. В «Путеводителе по ремонту бетона», выпущенном центром технического обслуживания Бюро мелиорации Министерства внутренних дел США упомянуто, что везде, где это возможно, следует использовать гидромонитор или водопескоструйную резку как 2 метода, позволяющие удалить поврежденный бетон, оставляя здоровое основание без

микротрещин. В руководстве по ремонту мостовых конструкций, выпущенном Политехническим институтом Вирджинии, также приведены рекомендации по использованию гидроразрушения, однако следует помнить, что применение этого метода требует проведения дополнительных мероприятий по организации стока.

Методы, использующие ударное воздействие, быстры и экономичны, однако следует учитывать, что при этом в цену проведения работ может входить последующая обработка поверхности водопескоструйной машиной или гидромонитором для удаления растрескавшегося основания. При этом для снижения растрескивания следует пользоваться насадками с заостренным молотом, которые, скорее, раскалывают бетон, чем раздавливают, снижая тем самым количество образовавшихся микротрещин.

Резку алмазным инструментом, как правило, не используют при разборе бетона массивных сооружений из-за достаточно высокой стоимости инструмента и большого объема требуемых работ. Однако этот метод с успехом может быть использован для удаления небольших объемов бетона в тех местах, в которые затруднен подход техники и где вместе с тем требуется избежать возникновения вибраций.

Методы, основанные на образовании плоскости раскалывания в слое бетона (микровзрывы, использование расширяющихся агентов, гидроклина), чаще используются как вспомогательные методы, призванные облегчить выработку бетона другими методами. Эти методы не требуют больших затрат времени, однако в большинстве случаев для сильно поврежденного и растрескавшегося бетона их эффективность значительно снижается.

Особое внимание следует уделить автоматизированным системам удаления бетона – строительным роботам, которые, как правило, могут совмещать различные методы разработки старого бетона благодаря большому количеству навесного оборудования, при этом непосредственное нахождение оператора в опасной зоне не требуется. Строительные роботы различаются по своим размерам и массе и, исходя из этого, могут быть использованы на различных объектах – от проведения работ в стесненных и вредных условиях до разработки потолочных и вертикальных конструкций.

Таблица 1

**Методы разборки бетона**

№	Метод Методы разборки	Дополнительные мероприятия												
		Обеспечение ТБ при взрывных работах		Организация пламоудаления		Только сквозное удаление	Разработка схемы сверления	Термозащита персонала и последующая гидроструйная обработка. Организация отвода плака		Организация пламоудаления	Разработка схемы сверления	Разработка схемы сверления. Обеспечение ТБ при взрывных работах	Разработка схемы сверления	
	Звуковое воздействие	++	+	++	++	++	+		++	++	++	-	++	-
	Эффективность при разборке трещиноватого бетона	+	+	+	+	+	+		+	+	+	-	-	+
	Эффективность при разборке здорового бетона	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
	Повреждение арматуры	++	++	-	++	++	+		+	-	-	-	-	-
	Необходимость привлечения высококвалифицированных исполнителей	+++	+	+	+	+	+		++	-	+	-	+++	+
	Трудоемкость	+	+	++	+	+	++		+	+++	++	+	+	+
	Разбор отд. элементов	-	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
	Разбор массива	+	-	+	+	-	+		+	+	+	+	+	+
	Пыление	+	+	-	-	-	-		++	++	-	-	+	-
	Риск трещинообразования	++	+	-	-	-	+		+++	++	-	+	+	++

## Литература

1. *Материалы сайта* <http://www.concretenetwork.com>
2. A review of methods for concrete removal/ by *Roy L. Campbell, Sr.* ; prepared for Office, Chief of Engineers, U.S. Army under CWIS 31553, april 1982/
3. Concrete Removal, Repair and Maintenance/ *Gilbert Gedeon, P.E.*, June 1995 – [www.cedengineering.com](http://www.cedengineering.com)
4. Techniques for Concrete Removal and Bar Cleaning on Bridge Rehabilitation Projects/ *Michael C. Vorster, James P. Merrigan, Robert W. Lewis, Richard E. Weyers*, Virginia Polytechnic Institute & State University, 1992/
5. *Huynh, Minh-Phuoc, Laefer, Debra F.*: Expansive cements and soundless chemical demolition agents: state of technology review. Presented at the 11th Conference on Science and Technology, Ho Chi Minh City Vietnam, October 21-23, 2009.
6. *Hudgins H.T.* Demolition of concrete structures – Concrete construction. Vol.32 #1 (1979)
7. *William D. Palmer Jr.* Demolition the Easy Way, Concrete Construction, Vol. 57 Issue 4, p.32, April 2012.

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ  
ГИДРОАГРЕГАТОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ АО «НИИЭС»  
с 2005 по 2015 гг.**

**THE MAIN RESULTS OF THE FULL-SCALE POWER  
TESTS OF HYDRAULIC UNITS MADE BY JSC «NIIES»  
from 2005 to 2015**

*Владимирский В.М., Дмитриев С.Г., Красильников А.М.,  
Минаков В.А., Козлов Д.Д., Карпинский А.В., Назмеев А.Р.  
(АО «НИИЭС»)*

В период с 2005 по 2015 гг. АО «НИИЭС» выполнил натурные энергетические испытания на ряде ГЭС с модернизируемым оборудованием, а также на ГЭС с устаревшим и изношенным оборудованием. Результаты испытаний модернизируемых ГЭС подтвердили улучшенные энергетические характеристики нового оборудования, что позволяет повысить безопасность и эффективность ГЭС. В результате испытаний ГЭС со старым оборудованием получены уточненные энергетические характеристики агрегатов, на основании которых даны рекомендации по их дальнейшей безопасной эксплуатации.

Гидроэлектростанция, модернизация, натурные испытания, турбина, расход, напор, мощность, коэффициент полезного действия, безопасность, надежность, эффективность оборудования.

---

JSC «NIIES» has made the full-scale power test on number of HPP with modernized equipment, as well as on hydroelectric power station with obsolete and outworn equipment in the period from 2005 to 2015. The results of the tests of modernized power generation equipment confirmed the improved energy performance of it, which allows to increase safety and efficiency of HPP. The updated energy characteristics of units and recommendations for its further safe operation were received as the test result of the hydropower plant with the old equipment.

Hydropower plant, modernization, full-scale test, turbine, flow, head, power, coefficient of efficiency, safety, reliability, efficiency of the equipment.

В период с 2005 по 2015 гг. АО «НИИЭС» выполнил энергетические испытания на гидроэлектростанциях с новым и реконструиро-

ванными оборудованием, а также с оборудованием, отслужившим нормативный срок эксплуатации. Испытания проводились при соблюдении рекомендаций МЭК [1], ISO [2], ГОСТ [3] и РД [4].

Целью испытаний реконструированных гидроагрегатов являлось определение действительных энергетических характеристик гидроагрегатов, проверка выполнения гарантий завода-изготовителя по КПД и мощности, а также оценка энергетического эффекта от замены оборудования. В задачу испытаний гидроагрегатов со старым оборудованием входило уточнение энергетических характеристик гидроагрегатов и выдача рекомендаций по организации эффективной эксплуатации в сложившихся условиях.

Испытания проводились абсолютным и индексным методами:

- испытания абсолютным методом проводились с измерением расхода воды гидрометрическими вертушечками по методу «скорость-площадь» или акустическим методом с использованием ультразвуковых расходомеров;

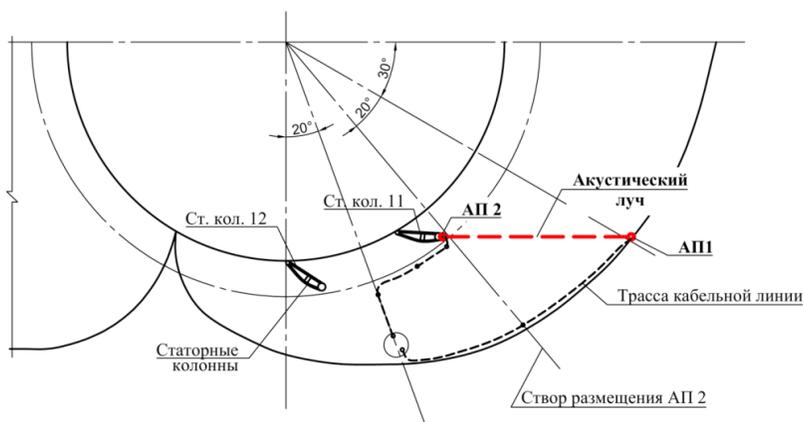
- испытания индексным методом проводились с измерением перепада давления по методу Винтера-Кеннеди или акустическим методом с использованием новых технологий, разработанных АО «НИИЭС».

### **Нижнекамская ГЭС**

На Нижнекамской ГЭС установлено 16 гидроагрегатов, оборудованных ПЛ-турбинами производства АО ЛМЗ. Первые агрегаты были введены в эксплуатацию в начале 80-х годов. Штатные спиральные расходомеры большинства агрегатов были неработоспособны практически с самого начала эксплуатации ГЭС. При дальнейшей эксплуатации все расходомеры утратили работоспособность и были выведены из эксплуатации, что не позволяло определить фактические энергетические характеристики оборудования, необходимые для организации оптимальной эксплуатации агрегатов.

В связи с этим после 25 лет эксплуатации ГЭС Заказчик предложил АО «НИИЭС» внедрить на Нижнекамской ГЭС акустический метод измерения относительного расхода воды, разработанный специалистами АО «НИИЭС» (патент РФ №2201579), и провести энергетические испытания гидроагрегатов индексным

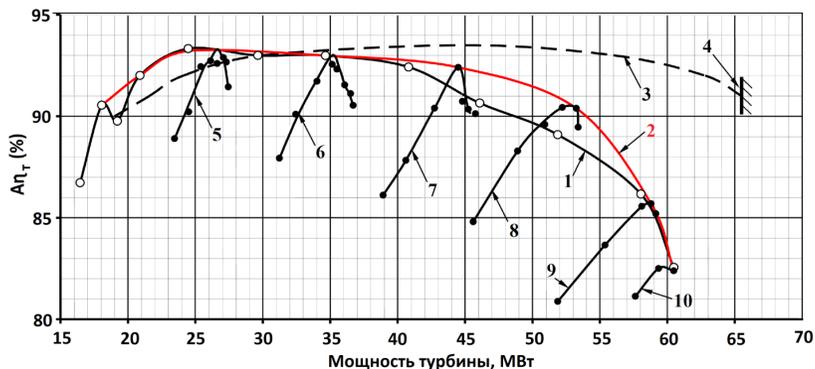
методом. Внедрение и испытания были произведены на агрегатах № 5 (2005 г.) и № 12 (2009 г.). На рис. 1 показана схема установки акустических преобразователей в спиральной камере. В результате испытаний были получены энергетические характеристики гидроагрегатов и оптимальные комбинаторные зависимости, необходимые для обеспечения рациональной эксплуатации оборудования.



**Рис. 1.** Схема расположения акустической системы ультразвукового расходомера на Нижнекамской ГЭС

На рис. 2 показаны энергетические характеристики турбины № 12, свидетельствующие о значительном расхождении натуральных и проектных характеристик. Так, в зоне максимальных мощностей снижение КПД натурной рабочей характеристики происходит более интенсивно по сравнению с проектной, при этом разность достигает 10%, что приводит к повышению вибраций опорных узлов агрегата и снижению максимальной мощности турбины на 5 МВт.

Испытания ГА5 показали, что полученные характеристики значительно отличаются от характеристик ГА12 и ближе соответствуют проектным. Так, максимальная мощность, полученная при испытаниях, соответствует максимальной мощности, указанной на эксплуатационной характеристике турбины; натурная и заводская рабочие характеристики незначительно отличаются по форме, при этом снижение КПД натурной характеристики не превышает 2%.



**Рис. 2.** Энергетические характеристики турбины №12 Нижнекамской ГЭС, полученные с измерением расхода акустическим способом при напоре 11 м: 1 – при работе по существующей комбинаторной зависимости; 2 – при работе по оптимальной комбинаторной зависимости; 3 – разрез по эксплуатационной характеристике турбины; 4 – линия ограничения максимальной мощности по эксплуатационной характеристике; 5 – угол установки лопастей РК  $\phi = 7,0^\circ$ ; 6 –  $\phi = 11,9^\circ$ ; 7 –  $\phi = 17,1^\circ$ ; 8 –  $\phi = 22,0^\circ$ ; 9 –  $\phi = 27,0^\circ$ ; 10 –  $\phi = 29,0^\circ$ .

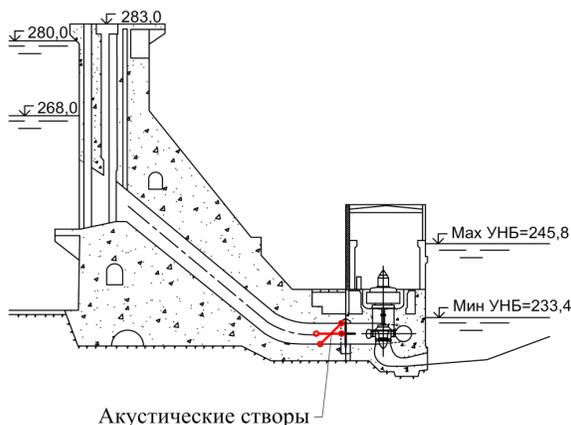
Таким образом, испытания показали значительное расхождение характеристик ГА5 и ГА12 и необходимость определения индивидуальных энергетических характеристик для организации эффективной эксплуатации ГЭС.

### Мамаканская ГЭС

На Мамаканской ГЭС установлено 4 гидроагрегата, оборудованных поворотно-лопастными турбинами. Гидроагрегаты были введены в эксплуатацию в начале 60-х годов. Таким образом, турбинное оборудование функционирует за пределами нормативного срока эксплуатации, что определило необходимость получения энергетических характеристик, позволяющих оценить техническое состояние оборудования.

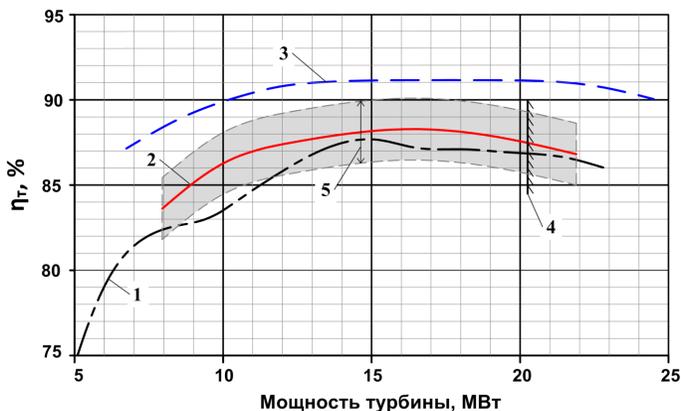
В 2009-2010 гг. АО «НИИЭС» провел энергетические испытания гидроагрегатов ст. № 3 и № 4. Штатные расходомеры к этому времени утратили работоспособность, в связи с этим испытания проводились абсолютным методом с измерением расхода воды в

трубопроводе многолучевым ультразвуковым расходомером. Целью испытаний являлось определение действительных энергетических характеристик гидроагрегатов и оптимальных комбинаторных зависимостей, позволяющих дать рекомендации по организации наиболее эффективной дальнейшей эксплуатации гидроагрегатов. При измерении расхода впервые использовалось расположение акустических лучей в плоскости диаметров трубопровода по аналогии с измерением расхода в трубопроводе вертушечным методом (рис. 3).



**Рис. 3.** Схема расположения акустических створов для измерения расхода воды гидроагрегатов Мамаканской ГЭС

В результате испытаний: получены действительные энергетические характеристики и оптимальные комбинаторные зависимости турбины, произведена градуировка акустических лучей и даны рекомендации по рациональной эксплуатации гидроагрегатов. На рис. 4 показана действительная энергетическая характеристика турбины №3 при работе по оптимальной комбинаторной зависимости и приводится сравнение натурной и проектной характеристик. Испытания показали, что агрегат № 3 сохраняет возможность получения номинальной мощности, при этом снижение максимального значения КПД турбины по сравнению с проектным составляет около 1%. Испытания агрегата № 4 показали, что натурная рабочая характеристика турбины соответствует проектной как по уровню КПД, так и по форме характеристики.



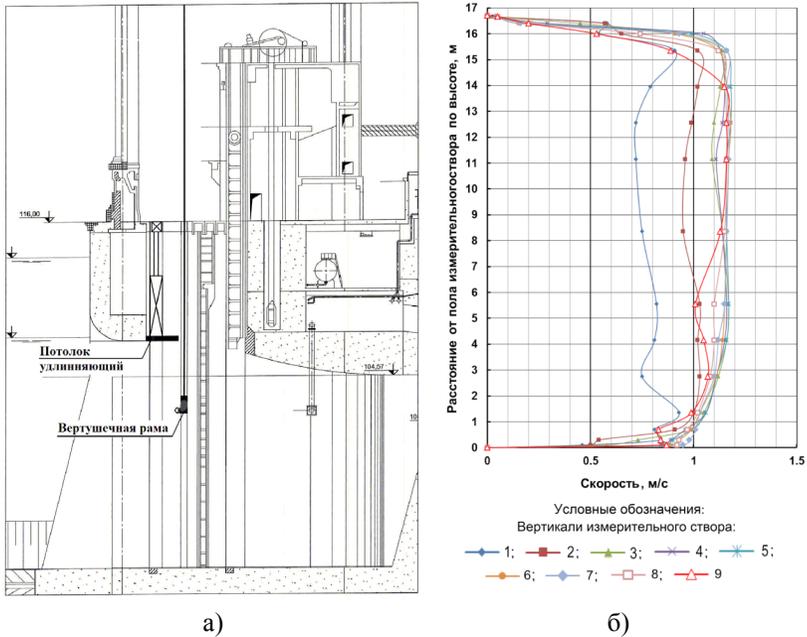
**Рис. 4.** Энергетические характеристики турбины № 3 Мамаканской ГЭС при напоре 41,5 м: 1 – при работе по существующей комбинаторной зависимости; 2 – при работе по оптимальной комбинаторной зависимости; 3 – разрез по эксплуатационной характеристике турбины; 4 – линия ограничения максимальной мощности по эксплуатационной характеристике; 5 – зона погрешности определения КПД

Оснащение гидроагрегатов ультразвуковыми расходомерами позволило производить постоянное автоматическое измерение турбинных расходов при дальнейшей эксплуатации ГЭС.

### Угличская ГЭС

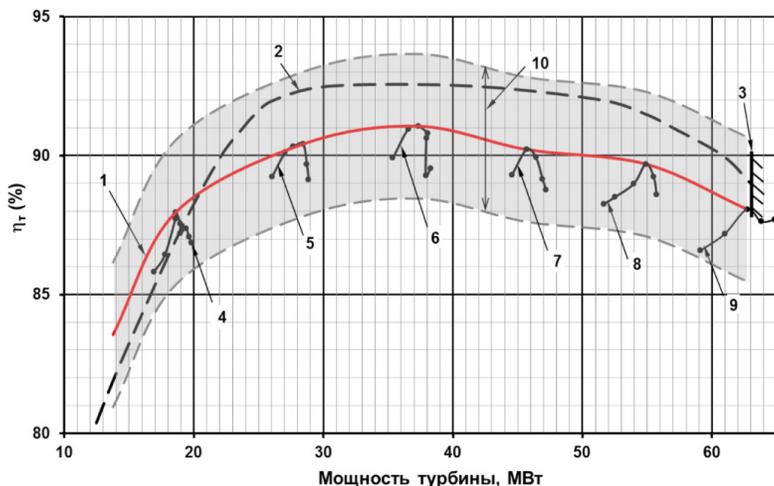
На Угличской ГЭС установлено 2 гидроагрегата, оборудованных турбинами ПО ЛМЗ. Гидроагрегат №1 был введен в эксплуатацию в 1940 г., гидроагрегат №2 – в 1941 г. В 2011 г. на гидроагрегате № 2 была установлена новая гидротурбина фирмы Voith Hydro, и в этом же году АО «НИИЭС» провел энергетические испытания гидроагрегата. Целью испытания являлось определение действительных энергетических характеристик новой гидротурбины. Испытания проводились абсолютным методом с измерением расхода гидрометрическими вертушками в водоприемной камере в створе пазов ремонтных затворов, расположенных перед сороудерживающей решеткой. Форма забральной балки и установка удлинителя потолка обеспечили благоприятные условия для измерения расхода воды.

На рис. 5 показаны схема измерения расхода воды и эпюры скоростей потока по высоте измерительного сечения, свидетельствующие о равномерности потока и возможности определения расхода с погрешностью, отвечающей требованиям МЭК [1] и ISO [2].



**Рис. 5.** Измерение расхода воды на гидроагрегате № 2 Угличской ГЭС: а) схема измерения расхода; б) распределение скоростей воды по высоте измерительного створа в средней секции водоприемника

В результате испытаний получены действительные значения КПД турбины, расходные характеристики и проведена градуировка реконструированного спирального расходомера (рис. 6). Результаты испытаний подтвердили энергетические показатели гидротурбины, гарантированные изготовителем, что позволило повысить установленную мощность ГЭС на 10 МВт. Проведение дополнительных испытаний с использованием отградуированного расходомера позволило построить натурную эксплуатационную характеристику турбины в полном диапазоне рабочих напоров и дать рекомендации по организации эффективной эксплуатации гидроагрегата.



**Рис. 6.** Энергетические характеристики турбины № 2 Угличской ГЭС при напоре 12 м: 1 – при работе по оптимальной комбинаторной зависимости; 2 – разрез по эксплуатационной характеристике турбины «Voith Hydro»; 3 – линия ограничения максимальной мощности по эксплуатационной характеристике; 4 – угол установки лопастей РК  $\phi = 5,0^\circ$ ; 5 –  $\phi = 10,0^\circ$ ; 6 –  $\phi = 15,0^\circ$ ; 7 –  $\phi = 20,2^\circ$ ; 8 –  $\phi = 25,0^\circ$ ; 9 –  $\phi = 30,0^\circ$ ; 10 – зона погрешности определения КПД

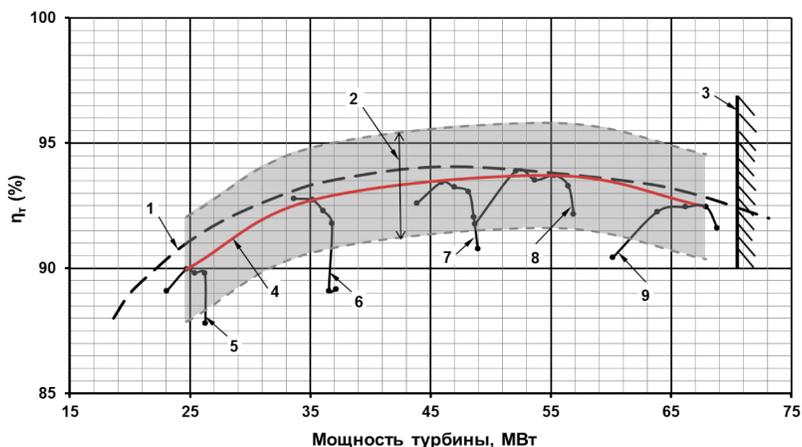
В 2014 г. АО «НИИЭС» выполнил измерение расхода воды также на гидроагрегате № 1 и проградуировал реконструированный спиральный расходомер. Целью испытаний являлось определение действительной расходной характеристики гидроагрегата, необходимой для создания автоматизированной системы измерения расхода гидроагрегатов Угличской ГЭС. В процессе гидравлических испытаний было произведено ориентировочное определение КПД турбины № 1. Максимальная величина КПД турбины составила 88-89%, что ниже проектного КПД на 4-5%.

### Рыбинская ГЭС

На Рыбинской ГЭС установлено 6 гидроагрегатов, оборудованных турбинами ПО ЛМЗ. Первые два гидроагрегата были введены в эксплуатацию в 1941-42 гг. Замена оборудования на-

чалась в 1998 г. В 2013 г. на гидроагрегате № 2 была установлена новая гидротурбина производства компании «Силловые машины», позволившая увеличить мощность агрегата на 10 МВт. В 2014 г. АО «НИИЭС» провел энергетические испытания реконструированного гидроагрегата ст. № 2. Целью испытания являлось определение действительных энергетических характеристик новой гидротурбины. Испытания проводились абсолютным методом с измерением расхода гидрометрическими вертушками в водоприемной камере в створе пазов ремонтных затворов. Компоновка водоприемной камеры, так же как и на Угличской ГЭС, обеспечила благоприятную структуру потока в измерительном створе и возможность определения расхода с необходимой точностью.

Результаты испытаний подтвердили энергетические характеристики гидротурбины, гарантированные заводом-изготовителем (рис. 7). Использование отградуированного штатного турбинного расходомера позволило построить натурную эксплуатационную характеристику турбины в полном диапазоне рабочих напоров и дать рекомендации по эффективной эксплуатации гидроагрегата.



**Рис. 7.** Энергетические характеристики турбины № 2 Рыбинской ГЭС при напоре 15 м: 1 – разрез по эксплуатационной характеристике турбины; 2 – зона погрешности определения КПД; 3 – линия ограничения максимальной мощности по эксплуатационной характеристике; 4 – при работе по оптимальной комбинаторной зависимости; 5 – угол установки лопастей РК  $\phi = 4,9^\circ$ ; 6 –  $\phi = +9,4^\circ$ ; 7 –  $\phi = +14,5^\circ$ ; 8 –  $\phi = +18,2^\circ$ ; 9 –  $\phi = +24,1^\circ$

## **Воткинская ГЭС**

В конце 80-х начале 90-х годов на Воткинской ГЭС после замены лопастей РК были проведены энергетические испытания агрегатов абсолютным (ГА5 и ГА10) и индексным методом (ГА1-10), позволившие определить действительные энергетические характеристики гидроагрегатов в полном диапазоне рабочих напоров.

В дальнейшем, после 20 лет эксплуатации, появилась необходимость уточнения энергетических характеристик. В связи с этим в период с 2012 по 2015 гг. АО «НИИЭС» провел энергетические испытания индексным методом всех гидроагрегатов при трех значениях напора. Следует отметить, что в процессе испытаний на ряде агрегатов выявилась потеря работоспособности импульсных трубок расходомерных устройств, что определило необходимость проведения испытаний методом постоянной мощности, имеющим более ограниченные возможности по сравнению с индексным методом.

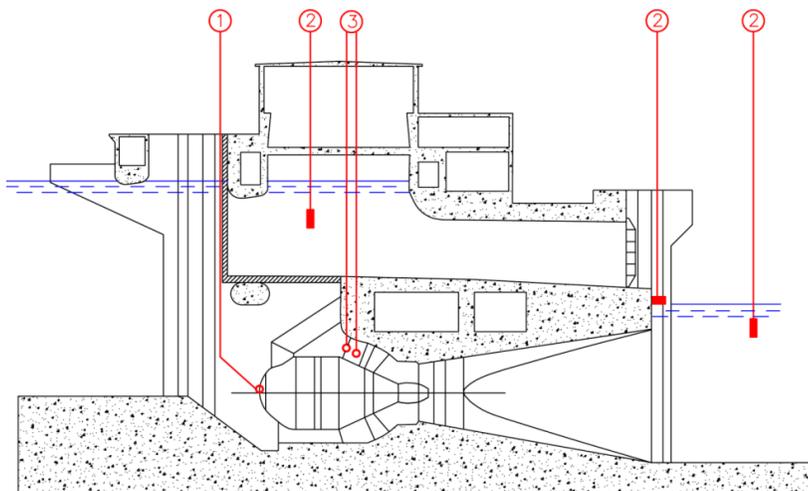
В результате комплекса проведенных испытаний были получены уточненные эксплуатационные энергетические характеристики гидроагрегатов, показавшие целесообразность оснащения ГЭС новым гидросиловым оборудованием с улучшенными энергетическими показателями.

В 2016 г. ПАО «РусГидро» приступило к замене гидросилового оборудования Воткинской ГЭС и произвело демонтаж старого оборудования гидроагрегата № 4. На гидроагрегате будет установлено новое гидроэнергетическое оборудование производства концерна «Силовые машины», позволяющее увеличить мощность гидроагрегата на 13 МВт. Ввод в работу модернизированного агрегата запланирован на 2017 г.

## **Саратовская ГЭС**

В 2013-2014 гг. на Саратовской ГЭС, взамен устаревших опытно-промышленных горизонтальных гидроагрегатов ст. № 22 и № 23, были установлены новые гидроагрегаты производства концерна «Силовые машины», позволяющие повысить мощность каждого гидроагрегата с 45 до 54 МВт.

В 2015 г. АО «НИИЭС» провел энергетические испытания реконструированного гидроагрегата № 22 индексным методом. Особенностью компоновки горизонтального гидроагрегата является полуоткрытая аванкамера, определяющая угловые натекания потока на капсулу, неравномерность потока и существенные потери напора на входе в водоприемную камеру. В связи с этим проточная часть была оснащена дополнительными измерительными створами, позволяющими определить потери напора в проточном тракте гидроагрегата (рис. 8).



**Рис. 8.** Схема измерения гидравлических параметров при энергетических испытаниях агрегата № 22 Саратовской ГЭС: 1 – датчик избыточного давления; 2 – датчик уровня; 3 – датчик дифференциального давления

В результате испытаний: определены индексные рабочие характеристики и оптимальные комбинаторные зависимости гидротурбины; уточнены потери напора в водоприемной камере, необходимые для определения рабочего напора турбины; даны рекомендации по обеспечению эффективной работы гидроагрегата. Испытания показали возможность получения максимальной гарантированной мощности турбины и хорошее совпадение формы натурной и заводской рабочих характеристик. В то же время были выявлены зоны работы агрегата с повышенными вибраци-

ями агрегата и динамическими нагрузками в проточной части, которые следует избегать при эксплуатации.

### **Волжская и Жигулевская ГЭС**

На Волжской и Жигулевской ГЭС в период с 2013 по 2015 гг. проведены энергетические испытания гидроагрегатов, реконструированных в соответствии с программой комплексной модернизации объектов ПАО «РусГидро». На Волжской ГЭС были проведены испытания гидроагрегатов ст. №№ 5,6,8,12,13,19,20,21; на Жигулевской ГЭС – гидроагрегатов ст. №№ 7,8,12,13,14,16,17. Испытания проводились индексным методом при трех значениях напора. В результате испытаний получены энергетические характеристики гидроагрегатов, оптимальные комбинаторные зависимости, а также эксплуатационные расходно-мощностные характеристики гидроагрегатов в полном диапазоне рабочих напоров.

Полученные энергетические характеристики подтвердили заводские гарантии по мощности, что позволило повысить мощность каждого гидроагрегата на 10,5 МВт.

В то же время следует отметить, что при модернизации гидроагрегатов не уделяется должного внимания реконструкции штатных расходомерных устройств: расходомеры не отлажены и не введены в эксплуатацию.

### **Загорская ГАЭС**

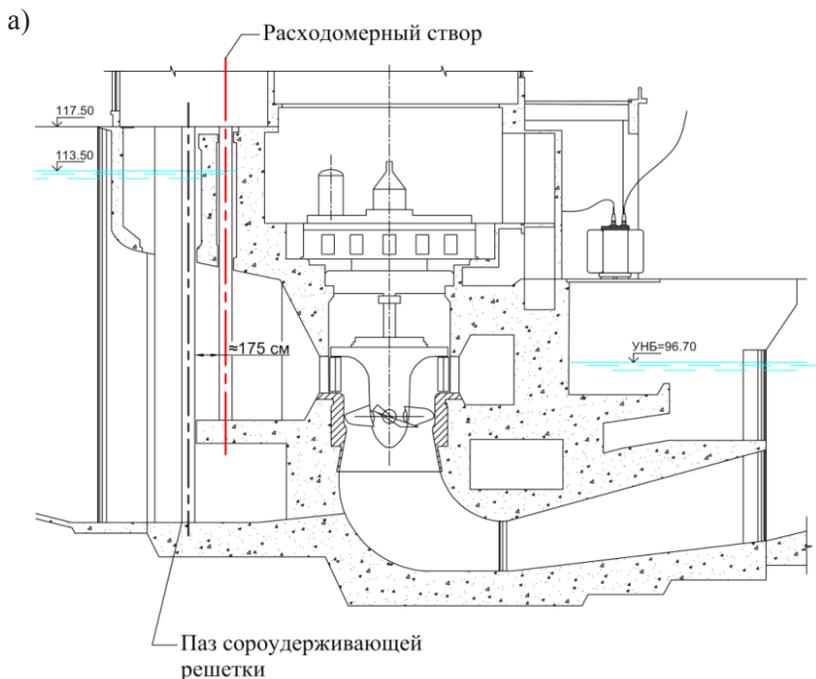
На Загорской ГАЭС в 2012 г. были проведены энергетические испытания 6 обратимых гидроагрегатов индексным методом в турбинном и насосном режимах в полном диапазоне рабочих напоров.

Результаты испытаний подтвердили возможность получения гарантированных величин мощности в турбинных режимах и подачи в насосных режимах. Даны рекомендации по оптимальным режимам работы гидроагрегатов и ГАЭС. Испытания были осложнены неудовлетворительным состоянием импульсных трубок штатных расходомерных устройств, что определило вынужденное использование непредусмотренных для этих целей пьезометров.

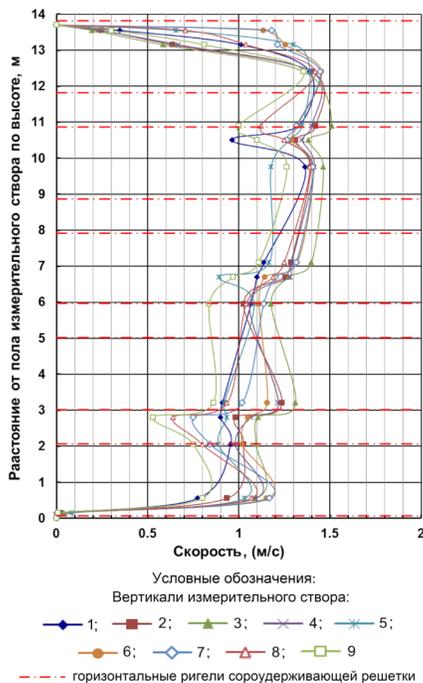
## Новосибирская ГЭС

На Новосибирской ГЭС в 2013 г. были проведены энергетические испытания гидроагрегата ст. № 1, оснащенного новой турбиной производства «Турбоатом» (Украина). Испытания проводились абсолютным методом с измерением расхода гидрометрическими вертушками. По настоянию Заказчика измерения расхода были проведены в пазу водоприемной камеры непосредственно после сороудерживающей решетки (рис. 9). В связи с этим структура потока не отвечала требованиям определения расхода воды с приемлемой точностью, что не позволило проверить гарантии по КПД завода-изготовителя турбины.

Таким образом, получен отрицательный опыт измерения расхода, который необходимо учитывать при выборе створа измерения расхода.



б)

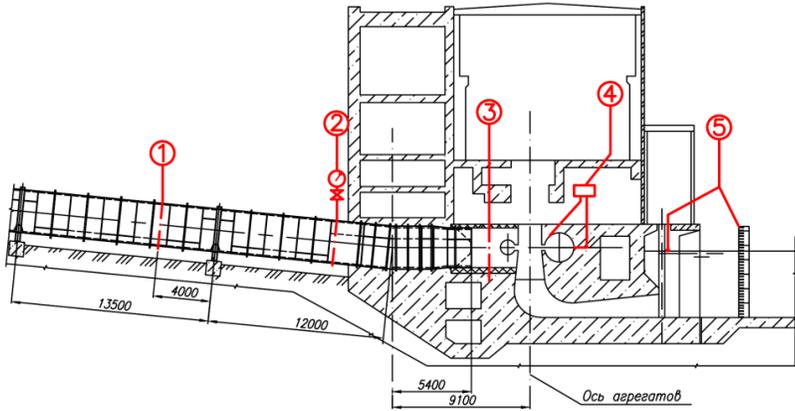


**Рис. 9.** Измерение расхода воды на гидроагрегате № 2 Новосибирской ГЭС: а) схема расположения створа измерения расхода на агрегате № 2; б) распределение скоростей воды по высоте измерительного створа в средней секции водоприемника при напоре 19,5 м и мощности 45 МВт

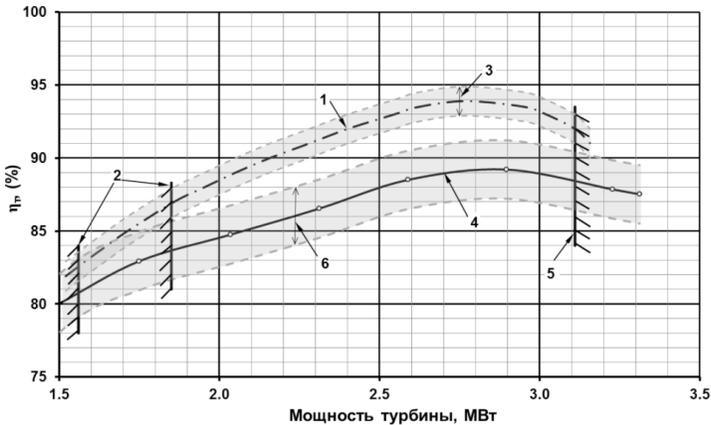
### Егорлыкская ГЭС-2

Егорлыкская ГЭС-2 была введена в эксплуатацию в конце 2010 г. В здании ГЭС установлено 4 гидроагрегата, оборудованных радиально-осевыми гидротурбинами производства «Турбоатом» (Украина) и гидрогенераторами производства предприятия «Привод» (г. Лысьва) мощностью по 3,55 МВт.

В 2014 г. на Егорлыкской ГЭС были проведены энергетические испытания 4 агрегатов абсолютным методом. Измерения расхода воды производились вертушечным методом с установкой вертушек на стационарной вертушечной раме внутри турбинных трубопроводов (рис. 10).



**Рис. 10.** Схема измерения энергетических характеристик турбины № 3 Егорлыкской ГЭС № 2 при напоре 17,2 м: 1 – вертушечный створ; 2 – створ измерения давления на входе в спиральную камеру; 3 – створ измерения давления на входе в агрегат; 4 – створ измерения перепада давления спирального расходомера; 5 – створ измерения уровня воды в НБ.



**Рис. 11.** Энергетические характеристики турбины № 3 Егорлыкской ГЭС № 2 при напоре 17,2 м: 1 – разрез по эксплуатационной характеристике турбины; 2 – зона кратковременной работы турбины; 3 – зона погрешности представления гарантированных значений КПД; 4 – по результатам испытаний; 5 – линия ограничения максимальной мощности по заводской характеристике; 6 – зона погрешностей определения натуральных значений КПД

В результате испытаний произведены измерения действительного расхода воды, проградуированы штатные расходомерные устройства, получены фактические значения КПД турбин, рабочие и расходные характеристики турбин (рис. 11). Испытания показали выполнение гарантий по мощности и невыполнение гарантий по КПД на всех 4 турбинах.

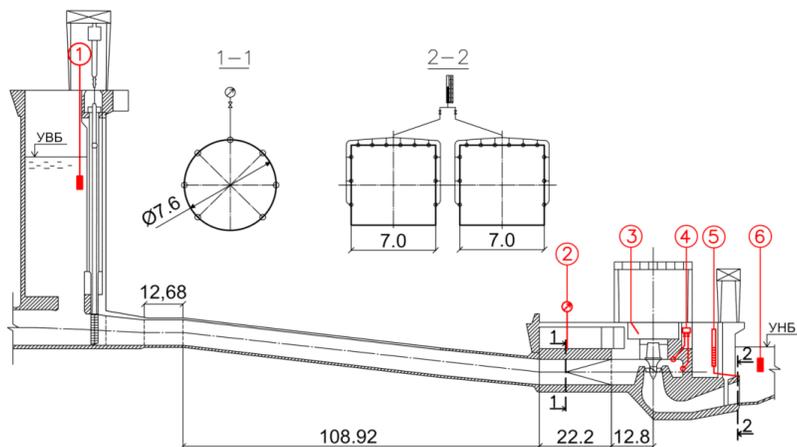
### **Миатлинская ГЭС**

Миатлинская ГЭС оборудована двумя гидроагрегатами с поворотно-лопастными турбинами. Номинальная мощность генератора составляет 110 МВт, расчетная мощность турбины – 112 МВт. Гидроагрегаты были введены в эксплуатацию в 1986 г. В соответствии с программой ПКМ РусГидро на Миатлинской ГЭС производится модернизация гидроагрегатов с заменой рабочих колес турбин. В 2015 г. на гидроагрегате №1 была установлена новая турбина производства Voith Hydro, имеющая расчетную мощность 140,6 МВт.

Энергетические испытания гидроагрегата № 1 были проведены индексным методом. Схема размещения измерительных створов при испытаниях показана на рис. 12. Замену генератора на агрегате планируется провести на следующем этапе работ, в связи с этим мощность агрегата при испытаниях была ограничена величиной 110 МВт.

В результате испытаний определены: индексная рабочая характеристика турбины, оптимальная комбинаторная зависимость и потери напора на участке от шахты уравнительного резервуара до входа в турбину, необходимые для определения рабочего напора турбины.

Сравнение формы натурной и проектной рабочих характеристик показало, что натурная характеристика имеет более крутую форму по сравнению с проектной. При этом снижение КПД натурной характеристики по сравнению с проектной достигает 3,5% в зоне частичных нагрузок и 1,5% в зоне максимальных нагрузок. Так как максимальная мощность агрегата была ограничена величиной 110 МВт, то можно предположить, что после установки нового генератора снижение КПД натурной характеристики в зоне мощностей от 110 до 140 МВт будет более значительным.



**Рис. 12.** Схема размещения измерительных створов при энергетических испытаниях Миатлинской ГЭС: 1 – створ измерения уровня воды в шахте уравнивающего резервуара; 2 – створ измерения давления на входе в турбину; 3 – створ измерения мощности агрегата; 4 – створ измерения перепада давления в расходомерном створе; 5 – створ измерения давления на выходе из турбины; 6 – створ измерения уровня воды в НБ.

Установлено также существенное расхождение оптимальной и установленной комбинаторной зависимости, достигающее 2 градусов по углу установки лопастей рабочего колеса. Одной из причин такого расхождения является введение в регулятор расчетных значений потерь напора, значительно отличающихся от действительных потерь, полученных при испытаниях.

По результатам испытаний даны рекомендации, позволяющие организовать рациональную эксплуатацию гидроагрегата.

### **Выводы:**

1. Результаты испытания модернизированных гидроагрегатов подтвердили высокие энергетические показатели нового оборудования, что позволяет увеличить мощность и надежность работы гидроагрегатов.
2. Результаты испытаний гидроагрегатов со старым оборудованием позволили уточнить энергетические характеристики

- агрегатов и дать рекомендации по обеспечению наиболее эффективной и безопасной их дальнейшей эксплуатации.
3. Проверка состояния штатных расходомеров, выполненная в процессе испытаний, показала следующее:
    - на гидростанциях со старым оборудованием расходомерные устройства частично или полностью потеряли работоспособность;
    - на модернизируемых ГЭС реконструкции расходомеров не уделяется должного внимания: расходомеры не налажены и не введены в эксплуатацию.
  4. АО «НИИЭС» разработал и внедрил на Нижнекамской ГЭС новую технологию измерения относительного расхода, основанную на использовании акустического метода. Данный метод отвечает современным требованиям автоматизации измерений и представляется более надежным по сравнению с традиционными расходомерами в связи с отсутствием гидравлической подсистемы расходомерного устройства.

### **Литература**

1. *Стандарт МЭК 60041*, 1991. Международные правила натуральных приемочных испытаний по определению гидравлических характеристик гидравлических турбин, аккумулирующих насосов и обратимых турбин.
2. *Международный стандарт ISO 3354:1988 (E)*. Измерение расхода чистой воды в закрытых водоводах – метод “скорость-площадь”, основанный на применении гидрометрических вертушек в условиях заполненного водовода и достаточно равномерного течения.
3. *ГОСТ 28842-90 (2005)*. Турбины гидравлические. Методы натуральных приемочных испытаний.
4. *РД 153-34.2-31.302-2001*. Методические указания по проведению натуральных испытаний гидротурбинных агрегатов при вводе их в эксплуатацию.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ВЫБОРА ВАРИАНТА РЕКОНСТРУКЦИИ ВОДОСБРОСНОЙ ПЛОТИНЫ ЗЕЙСКОЙ ГЭС**

### **APPLICATION OF THE DECISION THEORY TO SELECT THE OPTION OF RECONSTRUCTION OF THE SPILLWAY DAM OF THE ZEYA HYDROELECTRIC STATION**

*Куприянов В. П.*, кандидат техн. наук (АО «НИИЭС»)

При проектировании гидротехнических сооружений часто встречается ситуация, когда нельзя ограничиться рассмотрением единственного критерия выбора решения. Сравнение должно быть многогранным и охватывать все стороны объекта. На примере выбора варианта замены носков водосбросной плотины Зейской ГЭС, призванных обеспечить минимальное гидродинамическое воздействие сбросного потока на сооружения нижнего бьефа, предложен подход к назначению критериев сравнительного анализа и их систематизации по группам. Для решения задачи принятия решений использован метод, сочетающий элементы известных методов “ELECTRE”, “MAI”, “ШНУР” и др. Универсальность метода заключается в возможности применения качественных и количественных критериев, учета их «весов», изменения значений критериев при различных эксплуатационных условиях. Применение метода позволило на основе многокритериальной оптимизации осуществить объективный выбор принимаемого технического решения.

Теория принятия решений, сравнительный анализ, критерии оценки вариантов, критериальный вес, глобальная оценка варианта.

---

It is an ordinary situation during the engineering of hydraulic structures when it is not possible to be limited to only one criterion for selecting technical solutions. Comparison should be all-round and cover all aspects of the object. This can be demonstrated on choosing a way of the reconstruction the spillway of the Zeya dam that must have minimum hydrodynamic pressure on the construction downstream. The used method includes elements of well-known methods called “ELECTRE”, “MAI”, “SHNUR” and others. The method is universal. It allows using both high-qualified and quantitative criteria in order to determine their “weight” and changing of values of the criterion for each different operating condition. Application of the method, based on multi-criterion optimization, allowed making an objective selection of the best technical solution.

Decision theory, comparative analysis, evaluation criteria, criterion weight, comprehensive assessment of potential options.

Зейская ГЭС расположена в центре Амурской области, в 660 км выше места впадения р. Зеи в р. Амур. Ее строительство, начатое в мае 1964 г., закончилось в 1983 г. Назначение гидроузла: выработка электроэнергии, борьба с повторяющимися наводнениями в поймах рек Зея и в среднем течении Амура и удовлетворение потребностей водоснабжения и водного транспорта.

Для пропуска паводковых расходов в составе гидроузла имеется 8-пролетная водосливная плотина, обеспечивающая сопряжение бьефов отброшенной струей в незакрепленный отводящий канал со скальным основанием, располагающийся между русловой раздельной стенкой и правобережными подпорными стенками. На водосливах реализована двухъярусная конструкция носков-трамплинов, призванная обеспечить рассредоточение сбросного потока по длине отводящего канала. Расчетная пропускная способность водосброса – 9500 м<sup>3</sup>/с.

За период эксплуатации в нижнем бьефе гидроузла за водосливной плотиной были зарегистрированы непроектные размывы вдоль раздельной стенки и правобережных подпорных стенок, угрожающие потерей устойчивости для этих сооружений. Выполненные ремонтные работы оказались малоэффективны. В 2013 г. после пропуска очередного паводка произошло частичное разрушение ремонтных конструкций.

На основании анализа гидравлических условий за водосливной плотиной сделан вывод, что решение проблемы обеспечения надежности бетонных сооружений нижнего бьефа следует искать не только по пути укрепления основания, но и за счет рассредоточения сбросного потока по длине отводящего канала.

Для обоснования технического предложения по реконструкции водосбросной плотины Зейской ГЭС в АО «НИИЭС» построена крупномасштабная гидравлическая модель масштаба 1:50 с воспроизведением деформационных свойств скального основания специально подобранным связным эквивалентным материалом. Экспериментальная установка оборудована системой измерения расхода по ISO 1438:2008 и уровней воды по ISO 4373:2008.

В первую очередь на модели был исследован существующий (проектный) вариант (вариант А1) с двухъярусным расположением носков для получения базовых характеристик сравнительного анализа.

Из мирового опыта гидротехнического строительства следует, что уменьшение величины гидродинамического воздействия сбросного потока при отбросе струи может быть достигнуто различными способами, в частности:

устройством носков с разными углами трамплина в пролетах, обеспечивающих различную дальность отлета струи (вариант А2);

устройством двусторонних виражей на носках-трамплинах для расширения сбросного потока в пространстве, с организацией взаимного соударения отброшенных струй в воздухе и дробления падающего потока (вариант А3);

устройством прорезных носков-трамплинов в форме «ласточкиного хвоста», позволяющих рассредоточить поток по длине участка падения со значительным уменьшением удельных расходов в месте сопряжения с основанием (вариант А4).

В качестве альтернативного решения рассматривалось устройство виражных цилиндрических носков в 1-м и 8-м пролетах для отклонения сбросного потока от бетонных сооружений к центру отводящего канала (вариант А5).

После завершения исследований всех вариантов были получены многочисленные экспериментальные данные по уровненным режимам, волновым колебаниям, кинематике потока, гидродинамическим нагрузкам, размывам основания и отложения баров из продуктов размыва и т.п. [1]. Полученные результаты не являлись однозначными, и экспертный выбор лучшего варианта не представлялся возможным. Требовалось выработать систему критериев для сравнительного анализа.

Критериями оценки вариантов являются показатели их привлекательности (или непривлекательности) для участников процесса выбора. В профессиональной деятельности выбор критериев часто определяется многолетней практикой, опытом. Эти критерии могут быть независимыми или зависимыми. Зависимыми называются те критерии, при которых оценка варианта по

одному из них определяет (однозначно либо с большой степенью вероятности) оценку по другому критерию. Для повышения объективности описания варианта критерии должны быть всеохватывающие, т.е. отражать все те признаки, которые наиболее полно характеризуют объект.

Сложность задачи принятия решений зависит также от количества критериев. При небольшом числе критериев (два-три) задача сравнения вариантов достаточно проста и прозрачна, качества по критериям могут быть непосредственно сопоставлены и выработан компромисс. При большом числе критериев задача становится мало обозримой. Однако, при большом количестве критериев они обычно могут быть объединены в группы, имеющие конкретное смысловое значение и название. Основанием для естественной группировки критериев является возможность выделить плюсы и минусы вариантов, их достоинства и недостатки. Такие группы, как правило, независимы. Выявление структуры на множестве критериев делает процесс принятия решений значительно более осмысленным и эффективным.

Для водосбросных сооружений ряд критериев, позволяющих осуществить техническое сопоставление различных конструктивных вариантов, может быть сформулирован исходя из требований СП 58.13330.2012 [2]. Как известно, согласно данному документу, при пропуске паводковых расходов величиной не более значения основного расчетного случая должна обеспечиваться надежность всех сооружений гидроузла. Не допускаются опасные размывы в нижнем бьефе, уменьшение выработки электрической энергии на ГЭС, возникновение неблагоприятных сбойных течений и т.п. При пропуске поверочного расхода требования к надежности сооружений снижаются. Допускаются снижение выработки на ГЭС, большие размывы в нижнем бьефе, меньшая устойчивость креплений и пр., не угрожающие разрушению основных сооружений, селитебных территорий и территорий предприятий, при условии, что последствия размыва могут быть устранены после пропуска паводка.

Применительно к рассматриваемому случаю при падении отброшенной струи на дно отводящего русла в нижнем бьефе происходит размыв, образуется яма (воронка) местного размыва, кото-

рая развивается в течение некоторого времени, а затем наступает стабилизация процесса размыва. Но даже в стабилизировавшейся яме размыва отдельные частицы или отдельные размываемого грунта находятся в движении. Эти частицы могут подниматься над дном ямы местного размыва и иногда даже попадать в поступательно перемещающийся транзитный поток и уноситься вниз по течению. Многочисленными экспериментами (Ц.Е. Мирцхулава, М.А. Михалев, Т.Х. Ахмедов) установлено, что при отбросе струи и входе ее под уровень нижнего бьефа происходит двустороннее растекание поступившего в нижний бьеф потока, образуются водоворотные области с горизонтальными осями вращения [3]. Под отброшенной струей с низовой стороны устанавливается более низкий уровень свободной поверхности воды, что в пространственных условиях вызывает обратное течение. При ширине отброшенного потока меньше ширины отводящего канала это приводит к формированию планового водоворотного течения, характеризующегося значительным динамическим воздействием.

С учетом описанного механизма воздействия водного потока для сопоставления вариантов приняты следующие независимые группы критериев:

1. Технологичность. Вариант, представляющий собой более простое конструктивное решение, является более технологичным. Стоимость реализации варианта является зависимым критерием технологичности.

2. Надежность. Прочность и устойчивость конструкций нижнего бьефа (стенки, донные плиты, элементы ремонтного бетона) зависят, в первую очередь, от действующих нагрузок. Гидродинамические нагрузки на сооружения нижнего бьефа состоят из статических (осредненных) и пульсационных составляющих. Применительно к сооружениям нижнего бьефа наиболее благоприятен вариант, характеризующийся более высокой статической нагрузкой и наименьшей пульсационной.

Прочность конструкции при ее динамическом нагружении также определяется отношением частот собственных колебаний к частотному составу действующих нагрузок. При квазистатическом нагружении преимущество имеет вариант, характеризующийся более широкополосным спектром, т.е. когда энергия пуль-

сационного процесса более равномерно распределена по всему частотному интервалу.

Колебания уровней свободной поверхности в нижнем бьефе служат характеристикой турбулизации потока, проявляющейся в формировании различных макровихрей (водоворотов) и их взаимодействии между собой и транзитным течением. Более спокойная свободная поверхность свидетельствует о более мелких флуктуациях внутри водного потока.

Наличие плановых водоворотных течений способствует переформированию баров из продуктов размыва и повышает размывающую способность потока, направленную преимущественно в сторону бокового расширения. Скорость в водовороте определяется, в первую очередь, величиной перепада, образующегося перед и под струей, и примерно прямо пропорциональна квадратному корню из величины перепада.

3. Безопасность сооружений во многом определяется деформациями нижнего бьефа в отводящем канале, с учетом сформировавшейся за период эксплуатации воронки размыва. Следует учитывать развитие воронки размыва в плане и по глубине, ее переформирование, подмыв вертикальных бетонных стенок, возведенных в процессе ремонта, образование баров в воронке и за ее пределами.

4. Эффективность. Учитывая, что сравнение осуществляется с построенным сооружением, эффективным может быть признан тот вариант, для которого большинство показателей будут более значимыми. Применительно к рассматриваемому случаю, эффективность варианта, по-видимому, будет определяться более высокой степенью гашения энергии сбросного потока, в том числе за счет взаимного соударения струй в атмосфере, и относительно равномерного заполнения сбросным потоком всего объема отводящего канала.

5. Условия эксплуатации. Вариант носков водосливной плотины, для которого имеются минимальные или отсутствуют ограничения по маневрированию затворов, обладает большей привлекательностью.

При отбросе струи формируется водо-воздушное облако, оказывающее негативное влияние на прилегающую террито-

рию. При большей степени дробления струи увеличивается ее взаимодействие с атмосферой и, соответственно, увеличивается интенсивность выпадения капельной влаги. Воздействие на окружающую среду является обратно зависимым критерием эффективности гашения энергии сбросного потока.

Неструктурированные задачи принятия решений отличаются тем, что невозможно установить, и тем более математически описать, связи между основными параметрами задачи. Известными являются лишь варианты и критерии, по которым их оценивают.

В задачах оценки вариантов критерии могут быть как количественными, так и качественными, что отражается на выборе метода решения. При применении большинства методов возникают две основные проблемы: как получить оценки по отдельным критериям и как объединить, агрегировать эти оценки в общую оценку полезности варианта.

Существуют разные методы принятия решения при наличии многих критериев, которые отличаются способом перехода к единой оценке полезности альтернативных вариантов. Для подобной рассматриваемой задачи предлагается использовать комплексный метод, базирующийся на известных методах принятия решений: ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Realite – исключение и выбор, отражающие реальность), МАИ (метод анализа иерархий), ШНУР (шкала нормированных упорядоченных различий) и др. [4, 5, 6, 7], позволяющий учитывать как качественные, так и количественные критерии. При этом для получения более объективного результата каждому критерию в зависимости от его значимости может быть присвоен вес.

Использование качественных критериев для оценки вариантов требует определения градаций качества: лучших, худших и промежуточных оценок. Иначе говоря, применяются экспертные рейтинговые шкалы оценок по критериям. Значения количественных критериев назначаются по данным обработки результатов соответствующих экспериментальных исследований. При этом принятые критерии устанавливались для ряда значений опытных расходов, при пропуске которых осуществлялись испытания [1]. Это позволяет выявить предпочтительный вариант не только при пропуске максимального,

но и промежуточных расходов, а также дать оценку устойчивости варианта.

Учитывая, что сравнение осуществляется по относительным оценкам, в качестве критерия может приниматься конкретно измеренное в заданной точке значение или какое-либо осредненное значение, характеризующее процесс. В частности, при определении статической составляющей нагрузки принималось минимальное значение, показанное среди всех пьезометров, а значение стандартов пульсации нагрузки принималось наибольшим, среди полученных в результате обработки реализаций процесса. Средняя частота нулей определялась как среднеарифметическое значение реализаций во всех точках измерения. Аналогичные подходы применялись к другим параметрам критериев.

Принятые для указанных условий критерии и их значения приведены в табл. 1–4.

Так как критерии имеют разную значимость, то сравнению вариантов предшествует определение весов критериев одним из известных методов, например методом Т. Саати [7]. В первую очередь требуется определиться с оценкой важности одного критерия относительно другого. Система оценок может быть принята по стандартной методике в соответствии с рекомендациями табл. 5.

Таблица 5

***Шкала измерений для парных сравнений***

<b>Предпочтения</b>	<b>Рейтинг</b>
Примерно равный	1
Усредненные предпочтения между соседними	2
Незначительно предпочтительный	3
Усредненные предпочтения между соседними	4
Значительно предпочтительный	5
Усредненные предпочтения между соседними	6
Сильно предпочтительный	7
Усредненные предпочтения между соседними	8
Очень сильно предпочтительный	9

Таблица 1

**Значения критериев сравнительного анализа для случая пропускa расхода 4800 м<sup>3</sup>/с**

Обла- чение	Критерияльная группа	Характеристика	Параметр	Тип	Ед. измер.	Направление улучшения	Варианты					Мин. $\bar{Q}_i$	Макс. $\bar{Q}_i$
							A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>		
Q <sub>1</sub>	Технологичность	Простота конструкции	Рейтинг	Качест.	балл	макс	5	4	1	3	2	1	5
Q <sub>2</sub>		Прочность и устойчивость нагрузки	Статическая составляющая нагрузки	Колич.	кПа	макс	79,0	93,0	41,0	72,0	58,0	41,0	93,0
			Стандарт пульсации нагрузки	Колич.	кПа	мин	10,80	9,87	25,90	12,50	16,30	9,87	25,90
Q <sub>3</sub>	Надежность	Волновые колебания	Средняя частота нулей	Колич.	Гц	макс	0,173	0,156	0,183	0,165	0,193	0,156	0,193
Q <sub>4</sub>			Стандарт волновых колебаний	Колич.	м	мин	0,81	0,82	0,83	0,75	0,78	0,75	0,83
Q <sub>5</sub>	Безопасность	Планоый водоворот	Перепад уровней в степени 0,5	Колич.	м <sup>0,5</sup>	мин	2,85	2,09	2,86	2,77	2,74	2,09	2,86
Q <sub>6</sub>			Максимальная глубина размыва у боковых стенок	Колич.	м	мин	29,9	28,6	28,4	28,4	26,4	26,4	29,9
Q <sub>7</sub>	Эффективность	Гашение энергии сбросного потока	Максимальная глубина размыва по центру канала	Колич.	м	мин	27,8	28,1	27,2	26,5	24,0	24,0	28,1
Q <sub>8</sub>			Рейтинг	Качест.	балл	макс	1	2	5	4	3	1	5
Q <sub>9</sub>	Эксплуатацион- ные условия	Заполнение отброшенной струи объема канала	Рейтинг	Качест.	балл	макс	1	2	5	4	3	1	5
Q <sub>10</sub>			Рейтинг	Качест.	балл	макс	2	1	4	5	3	1	5
Q <sub>11</sub>		Маневрирование затворами	Рейтинг	Качест.	балл	мин	1	2	5	3	4	1	5
Q <sub>12</sub>			Воздействие на прилегающую территорию	Рейтинг	Качест.	балл	мин	1	2	5	3	4	1

Таблица 2

 Значения критериев сравнительного анализа для случая пропуска расхода 6450 м<sup>3</sup>/с

Обозначение	Критерияльная группа	Характеристика	Параметр	Тип	Ед. измер.	Направление улучшения	Варианты					Мин. $\bar{Q}_i$	Макс. $\hat{Q}_i$
							A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>		
Q <sub>1</sub>	Технологичность	Простота конструкции	Рейтинг	Качест.	балл	макс	5	4	1	3	2	1	5
Q <sub>2</sub>		Прочность и устойчивость	Статическая составляющая нагрузки	Колпч.	кПа	макс	77,0	82,0	28,0	73,0	49,0	28,0	82,0
			Стандарт пульсации нагрузки	Колпч.	кПа	мин	16,00	9,96	27,10	12,10	13,30	9,96	27,10
Q <sub>4</sub>	Надежность		Средняя частота нулей	Колпч.	Гц	макс	0,223	0,170	0,177	0,170	0,162	0,162	0,223
Q <sub>5</sub>			Стандарт волновых колебаний	Колпч.	м	мин	0,90	0,84	0,91	0,89	0,96	0,84	0,96
Q <sub>6</sub>		Планный водоворот	Перепад уровней в степени 0,5	Колпч.	м <sup>0,5</sup>	мин	2,99	2,62	3,24	2,97	2,84	2,62	3,24
			Максимальная глубина размыва у боковых стенок	Колпч.	м	мин	30,85	29,35	31,35	29,35	31,35	29,35	31,35
Q <sub>8</sub>	Безопасность	Размыв основания	Максимальная глубина размыва по центру канала	Колпч.	м	мин	30,55	28,15	28,05	27,95	29,15	27,95	30,55
Q <sub>9</sub>			Гашение энергии соросного потока	Рейтинг	Качест.	балл	макс	1	2	5	4	3	1
Q <sub>10</sub>	Эффективность	Заполнение отброшенной струей объема канала	Рейтинг	Качест.	балл	макс	1	2	5	4	3	1	5
Q <sub>11</sub>			Маневрирование затворами	Рейтинг	Качест.	балл	макс	2	1	4	5	3	1
Q <sub>12</sub>	Эксплуатационные условия	Воздействие на прилегающую территорию	Рейтинг	Качест.	балл	мин	1	2	5	3	4	1	5

Таблица 3

Значения критериев сравнительного анализа для случая  
пропуска расхода 7550 м<sup>3</sup>/с

Обозначение	Критерияльная группа	Характеристика	Параметр	Тип	Ед. измер.	Направление улучшения	Варианты					Мин. $\bar{Q}_k$	Макс. $\bar{Q}_k$
							A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>		
Q <sub>1</sub>	Технологичность	Простота конструкции	Рейтинг	Качест.	балл	макс	5	4	1	3	2	1	5
Q <sub>2</sub>		Прочность и устойчивость	Статическая составляющая нагрузки	Колич.	кПа	макс	63,0	66,0	24,0	55,0	42,0	24,0	66,0
Q <sub>3</sub>							Стандарт пульсации нагрузки	Колич.	кПа	мин	17,3	17,9	32,8
Q <sub>4</sub>	Надежность	Волновые колебания	Средняя частота нулей	Колич.	Гц	макс	0,21	0,15	0,17	0,15	0,168	0,15	0,215
Q <sub>5</sub>							Стандарт волновых колебаний	Колич.	м	мин	0,91	0,86	0,98
Q <sub>6</sub>	Безопасность	Плоский водоворот	Перепад уровней в степени 0,5	Колич.	м <sup>0,5</sup>	мин	3,13	2,71	3,26	2,95	2,93	2,71	3,13
Q <sub>7</sub>							Максимальная глубина размыва у боковых стенок	Колич.	м	мин	31,6	26,8	33,8
Q <sub>8</sub>		Размыв основания	Максимальная глубина размыва по центру канала	Колич.	м	мин	31,8	31,0	29,2	27,0	31,35	27,05	31,85
Q <sub>9</sub>							Рейтинг	Качест.	балл	макс	1	2	5
Q <sub>10</sub>	Эффективность	Заполнение отброшенной струей объема канала	Рейтинг	Качест.	балл	макс	1	2	5	4	3	1	5
Q <sub>11</sub>							Маневрирование затворами	Качест.	балл	макс	2	1	4
Q <sub>12</sub>	Эксплуатационные условия	Воздействие на прилегающую территорию	Рейтинг	Качест.	балл	мин	1	2	5	3	4	1	5

Таблица 4

**Значения критериев сравнительного анализа для случая пропуска расхода 9500 м<sup>3</sup>/с**

Обозначение	Критерияльная группа	Характеристика	Параметр	Тип	Ед. измер.	Направление улучшения	Варианты					Мин. $\bar{Q}_i$	Макс. $\hat{Q}_i$
							$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$		
$Q_1$	Технологичность	Простота конструкции	Рейтинг	Качест.	балл	макс	5	4	1	3	2	1	5
$Q_2$		Статическая составляющая нагрузки	Коллч.	Коллч.	кПа	макс	48,0	65,0	34,0	61,0	56	34	65
$Q_3$		Прочность и устойчивость	Стандарт пульсации нагрузки	Коллч.	кПа	мин	19,60	13,50	21,00	19,70	14,60	13,50	21,00
$Q_4$	Надежность	Средняя частота нулей	Коллч.	Коллч.	Гц	макс	0,212	0,166	0,175	0,151	0,165	0,151	0,212
$Q_5$		Волновые колебания	Стандарт волновых колебаний	Коллч.	м	мин	0,98	1,02	1,11	1,09	1,06	0,98	1,11
$Q_6$		Плановый водоворот	Перепад уровней в степени 0,5	Коллч.	м <sup>0,5</sup>	мин	3,83	2,86	3,32	2,85	2,94	2,85	3,83
$Q_7$		Размыв основания	Максимальная глубина размыва у боковых стенок	Коллч.	м	мин	34,3	32,9	35,9	35,3	36,9	32,9	36,9
$Q_8$	Безопасность	Максимальная глубина размыва по центру канала	Коллч.	Коллч.	м	мин	32,7	34,4	30,1	34,3	34,9	30,1	34,9
$Q_9$		Гашение энергии сбросного потока	Рейтинг	Качест.	балл	макс	1	2	5	4	3	1	5
$Q_{10}$	Эффективность	Заполнение отброшенной струей объема канала	Рейтинг	Качест.	балл	макс	1	2	5	4	3	1	5
$Q_{11}$		Маневрирование затворами	Рейтинг	Качест.	балл	макс	2	1	4	5	3	1	5
$Q_{12}$	Эксплуатационные условия	Воздействие на прилегающую территорию	Рейтинг	Качест.	балл	мин	1	2	5	3	4	1	5

Для определения веса критерия  $W_k$  строится симметрическая матрица парных сравнений  $w_{ij}$  размером  $k \times k$ , где  $k = 12$  – количество критериев (табл. 6). В первую очередь диагональ заполняется оценками «1», т.к. каждый критерий сравнивается с самим собой, т.е.  $w_{ij} = 1$  при  $i = j$ . Затем осуществляется попарное сравнение первого критерия с остальными и в соответствии с табл. 5 присваивается рейтинг (графа 2 в табл. 6). Аналогично выполняются парные сравнения других критериев, и матрица заполняется ниже диагонали (табл. 6). Выше диагонали указываются оценки, обратные тем, которые расположены ниже диагонали т.е.

$$w_{ji} = \frac{1}{w_{ij}}$$

Таблица 6

**Матрица парных сравнений важности критериев**

Критерии	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$	$Q_8$	$Q_9$	$Q_{10}$	$Q_{11}$	$Q_{12}$
$Q_1$	1	0,2	0,143	0,333	0,2	0,125	0,111	0,333	0,2	0,25	0,143	0,167
$Q_2$	5	1	0,714	1,667	1	0,625	0,556	1,667	1	1,25	0,714	0,833
$Q_3$	7	1,4	1	2,5	1,429	0,909	0,714	2,5	1,429	1,667	1	1,111
$Q_4$	3	0,6	0,4	1	0,588	0,370	0,333	1	0,588	0,769	0,435	0,5
$Q_5$	5	1	0,7	1,7	1	0,625	0,556	1,667	1	1,25	0,714	0,833
$Q_6$	8	1,6	1,1	2,7	1,6	1	0,909	2,5	1,667	2	1,111	1,25
$Q_7$	9	1,8	1,4	3	1,8	1,1	1	3,333	1,667	2,5	1,25	1,429
$Q_8$	3	0,6	0,4	1	0,6	0,4	0,3	1	0,588	0,769	0,435	0,5
$Q_9$	5	1	0,7	1,7	1	0,6	0,6	1,7	1	1,25	0,714	0,833
$Q_{10}$	4	0,8	0,600	1,3	0,8	0,5	0,4	1,3	0,8	1	0,556	0,667
$Q_{11}$	7	1,4	1,000	2,3	1,4	0,9	0,8	2,3	1,4	1,8	1	1,111
$Q_{12}$	6	1,2	0,9	2	1,2	0,8	0,7	2	1,2	1,500	0,9	1
<b>Итого по графе:</b>	63	12,6	9,057	21,2	12,617	7,954	6,979	21,3	12,538	16,005	8,972	10,234

Заключительным шагом этого этапа является суммирование значений каждого из столбцов в графе «Итого по графе», как это показано в табл. 6.

Построенная таким образом матрица должна быть согласована. В этом случае при наличии основного массива необработанных

ных данных все другие данные логически могут быть получены из них. Известно, что согласованность положительной обратносимметричной матрицы эквивалентна требованию равенства ее максимального собственного значения  $\lambda_{max}$  с  $k$ . Т.Саати [7] в качестве индекса согласованности предложено следующее условие

$$ИС = \frac{\lambda_{max} - k}{k - 1} < 0,1 \quad (1)$$

Максимальное собственное значение матрицы парных сравнений (табл. 6) было вычислено с использованием специальной компьютерной программы и составило  $\lambda_{max} = 12,005$ , а индекс согласованности, рассчитанный по (1) –  $ИС = 0,0005$ , что свидетельствует о непротиворечивости предпочтений на множестве критериев.

Данные, приведенные в табл. 6, используются для расчета критериальных весов  $W_k$ . Это достигается путем построения другой матрицы алогичного размера  $k \times k$ , содержащей относительные веса, получаемые при деления каждого из значений в столбцах табл. 6 на суммарное значение в графе «Итого по графе», а затем вычисление среднего арифметических значений в строке, т.е.

$$W_k = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \frac{w_{ij}}{\sum_{j=1}^{12} w_{ij}}, \text{ при } i, j = (1, 2, 3 \dots 12) \quad (2)$$

Результаты расчета критериальных весов приведены в табл. 7.

В рассматриваемом случае установлено, что менее значимым критерием являются конструктивные особенности носка трамплина ( $Q_1$ ), а наиболее весомыми являются размыв основания у боковых стенок ( $Q_7$ ) и перепад уровней, устанавливающийся в отводящем канале при работе водосброса ( $Q_6$ ).

Для сравнения вариантов используем некоторые идеи метода принятия решений ШНУР [6] и компромиссного программирования [8]. По каждому критерию определяется максимальное и минимальное значения на множестве имеющихся вариантов и устанавливается направление улучшения показателя (табл. 1-4):

Таблица 7

**Расчет критериальных весов (расширенная матрица)**

Критерии	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$	$Q_8$	$Q_9$	$Q_{10}$	$Q_{11}$	$Q_{12}$	Вес $W_k$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$Q_1$	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	<b>0,016</b>
$Q_2$	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,080	0,078	0,080	0,078	0,080	0,081	<b>0,079</b>
$Q_3$	0,111	0,111	0,110	0,118	0,113	0,114	0,102	0,117	0,114	0,104	0,111	0,109	<b>0,111</b>
$Q_4$	0,048	0,048	0,044	0,047	0,047	0,047	0,048	0,047	0,047	0,048	0,048	0,049	<b>0,047</b>
$Q_5$	0,079	0,079	0,077	0,080	0,079	0,079	0,080	0,078	0,080	0,078	0,080	0,081	<b>0,079</b>
$Q_6$	0,127	0,127	0,121	0,127	0,127	0,126	0,130	0,117	0,133	0,125	0,124	0,122	<b>0,126</b>
$Q_7$	0,143	0,143	0,155	0,142	0,143	0,138	0,143	0,156	0,133	0,156	0,139	0,140	<b>0,144</b>
$Q_8$	0,048	0,048	0,044	0,047	0,048	0,050	0,043	0,047	0,047	0,048	0,048	0,049	<b>0,047</b>
$Q_9$	0,079	0,079	0,077	0,080	0,079	0,075	0,086	0,080	0,080	0,078	0,080	0,081	<b>0,080</b>
$Q_{10}$	0,063	0,063	0,066	0,061	0,063	0,063	0,057	0,061	0,064	0,062	0,062	0,065	<b>0,063</b>
$Q_{11}$	0,111	0,111	0,110	0,108	0,111	0,113	0,115	0,108	0,112	0,112	0,111	0,109	<b>0,111</b>
$Q_{12}$	0,095	0,095	0,099	0,094	0,095	0,101	0,100	0,094	0,096	0,094	0,100	0,098	<b>0,097</b>

$$\hat{Q}_k = \max(Q_{k1}, Q_{k2}, \dots, Q_{k5}) \quad (3)$$

$$\bar{Q}_k = \min(Q_{k1}, Q_{k2}, \dots, Q_{k5}) \quad (4)$$

где  $Q_{ki}$  - оценка  $i$ -го варианта по  $k$ -му критерию:  $k = (1, 2, 3 \dots 12)$ .  
От исходных оценок  $Q_{ki}$  требуется перейти к оценкам относительным  $q_{ki}$  по формулам:

- для критериев на минимум

$$q_{ki} = \frac{\hat{Q}_k - Q_{ki}}{\hat{Q}_k - \bar{Q}_k}, \quad (5)$$

- для критериев на максимум

$$q_{ki} = \frac{Q_{ki} - \bar{Q}_k}{\hat{Q}_k - \bar{Q}_k} \quad (6)$$

Относительная оценка  $q_{ki}$  имеет смысл степени близости альтернативы  $A_i$  по критерию  $k$  к наилучшей по этому критерию альтернативе на заданном множестве вариантов. Очевидно, что значения  $q_{ki}$  лежат в интервале  $[0, 1]$ ; чем больше  $q_{ki}$ , тем лучше альтернатива  $A_i$  по критерию  $k$ , независимо от направленности критерия. Расчет относительных оценок приведен в табл. 8.

Таблица 8

## Значения степеней близости критериев по вариантам

Критерии	Степени близости $q_{ki}$				
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
1	2	3	4	5	6
<i>При пропуске расхода 4800 м<sup>3</sup>/с</i>					
$Q_1$	1,000	0,750	0,000	0,500	0,250
$Q_2$	0,731	1,000	0,000	0,596	0,327
$Q_3$	0,942	1,000	0,000	0,836	0,599
$Q_4$	0,459	0,000	0,730	0,243	1,000
$Q_5$	0,250	0,125	0,000	1,000	0,625
$Q_6$	0,013	1,000	0,000	0,117	0,156
$Q_7$	0,000	0,371	0,429	0,429	1,000
$Q_8$	0,073	0,000	0,220	0,390	1,000
$Q_9$	0,000	0,250	1,000	0,750	0,500
$Q_{10}$	0,000	0,250	1,000	0,750	0,500
$Q_{11}$	0,250	0,000	0,750	1,000	0,500
$Q_{12}$	1,000	0,750	0,000	0,500	0,250
<i>При пропуске расхода 6450 м<sup>3</sup>/с</i>					
$Q_1$	1,000	0,750	0,000	0,500	0,250
$Q_2$	0,907	1,000	0,000	0,833	0,389
$Q_3$	0,648	1,000	0,000	0,875	0,805
$Q_4$	1,000	0,131	0,246	0,131	0,000
$Q_5$	0,500	1,000	0,417	0,583	0,000
$Q_6$	0,403	1,000	0,000	0,435	0,645
$Q_7$	0,250	1,000	0,000	1,000	0,000
$Q_8$	0,000	0,923	0,962	1,000	0,538
$Q_9$	0,000	0,250	1,000	0,750	0,500
$Q_{10}$	0,000	0,250	1,000	0,750	0,500
$Q_{11}$	0,250	0,000	0,750	1,000	0,500
$Q_{12}$	1,000	0,750	0,000	0,500	0,250
<i>При пропуске расхода 7550 м<sup>3</sup>/с</i>					
$Q_1$	1,000	0,750	0,000	0,500	0,250
$Q_2$	0,929	1,000	0,000	0,738	0,429
$Q_3$	0,852	0,819	0,000	0,791	1,000
$Q_4$	1,000	0,092	0,354	0,000	0,277
$Q_5$	0,792	1,000	0,500	0,667	0,000
$Q_6$	0,236	1,000	0,000	0,564	0,600
$Q_7$	0,314	1,000	0,000	0,571	0,143

1	2	3	4	5	6
$Q_8$	0,000	0,167	0,542	1,000	0,104
$Q_9$	0,000	0,250	1,000	0,750	0,500
$Q_{10}$	0,000	0,250	1,000	0,750	0,500
$Q_{11}$	0,250	0,000	0,750	1,000	0,500
$Q_{12}$	1,000	0,750	0,000	0,500	0,250
<i>При пропуске расхода 9500 м<sup>3</sup>/с</i>					
$Q_1$	1,000	0,750	0,000	0,500	0,250
$Q_2$	0,452	1,000	0,000	0,871	0,710
$Q_3$	0,187	1,000	0,000	0,173	0,853
$Q_4$	1,000	0,246	0,393	0,000	0,230
$Q_5$	1,000	0,692	0,000	0,154	0,385
$Q_6$	0,000	0,990	0,520	1,000	0,908
$Q_7$	0,650	1,000	0,250	0,400	0,000
$Q_8$	0,458	0,104	1,000	0,125	0,000
$Q_9$	0,000	0,250	1,000	0,750	0,500
$Q_{10}$	0,000	0,250	1,000	0,750	0,500
$Q_{11}$	0,250	0,000	0,750	1,000	0,500
$Q_{12}$	1,000	0,750	0,000	0,500	0,250

Для получения глобальных оценок вариантов строим матрицу  $A$  размерности  $n \times n$ , где  $n = 5$  – число вариантов. Элементы матрицы вычислим по относительным оценкам, как отношение преимуществ одного варианта к преимуществам другого

$$a_{ij} = \frac{\sum_{k \in I_{ij}} W_k (q_{ki} - q_{kj})}{\sum_{k \in I_{ji}} W_k (q_{kj} - q_{ki})} \quad (7)$$

В приведенной формуле в числителе представлено суммарное превосходство варианта  $A_i$  над вариантом  $A_j$ , а в знаменателе – суммарное превосходство варианта  $A_j$  над вариантом  $A_i$ . Как и в случае матрицы парных сравнений важности критериев, матрица  $A$  является симметрической (табл. 9). По значениям степеней близости и формуле (7) вычисляем элементы матрицы  $A$ . Так, например, в паре вариантов  $A_1, A_2$  при пропуске расхода 4800 м<sup>3</sup>/с первый имеет превосходство над вторым по критериям  $Q_1, Q_4, Q_5, Q_8, Q_{11}$  и  $Q_{12}$ , а второй над первым – по  $Q_2, Q_3, Q_6, Q_7, Q_9$  и  $Q_{10}$  (см. табл. 8). Следовательно, в соответствии с формулой (7)

$$a_{12} = \frac{W_1(q_{12} - q_{11}) + W_4(q_{42} - q_{41}) + W_5(q_{51} - q_{52}) + W_8(q_{81} - q_{82}) + W_{11}(q_{111} - q_{112}) + W_{12}(q_{121} - q_{122})}{W_2(q_{21} - q_{22}) + W_3(q_{31} - q_{32}) + W_6(q_{61} - q_{62}) + W_7(q_{71} - q_{72}) + W_9(q_{91} - q_{92}) + W_{10}(q_{101} - q_{102})}$$

и 
$$a_{21} = \frac{1}{a_{12}} \quad (8)$$

Таблица 9

**Матрица глобальных оценок вариантов  $A$**

Варианты	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
<i>При пропуске расхода 4800 м<sup>3</sup>/с</i>					
$A_1$	1	0,378	1,063	0,262	0,430
$A_2$	2,648	1	1,689	0,654	0,824
$A_3$	0,941	0,592	1	0,179	0,307
$A_4$	3,812	1,530	5,572	1	1,295
$A_5$	2,328	1,213	3,254	0,772	1
<i>При пропуске расхода 6450 м<sup>3</sup>/с</i>					
$A_1$	1	0,278	1,585	0,271	1,442
$A_2$	3,594	1	2,997	0,857	4,598
$A_3$	0,631	0,334	1	0,089	0,712
$A_4$	3,695	1,167	11,253	1	14,459
$A_5$	0,693	0,217	1,404	0,069	1
<i>При пропуске расхода 7550 м<sup>3</sup>/с</i>					
$A_1$	1	0,393	1,834	0,429	1,480
$A_2$	2,542	1	2,564	0,900	2,980
$A_3$	0,545	0,390	1	0,125	0,604
$A_4$	2,332	1,111	8,005	1	7,354
$A_5$	0,676	0,336	1,654	0,136	1
<i>При пропуске расхода 9500 м<sup>3</sup>/с</i>					
$A_1$	1	0,385	1,159	0,642	0,927
$A_2$	2,596	1	2,077	1,471	3,076
$A_3$	0,863	0,481	1	0,358	0,735
$A_4$	1,558	0,680	2,790	1	1,976
$A_5$	1,079	0,325	1,361	0,506	1

Для каждой матрицы вычислим собственный вектор матрицы  $A$  и, выполнив его нормировку, определим глобальные оценки для каждого варианта

$$O_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^5 V_i}, \text{ при } i = (1, 2, 3 \dots 5) \quad (9)$$

Результаты расчета приведены в табл. 10.

Таблица 10

**Расчет глобальных оценок вариантов**

Варианты	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	Сумма
<i>При пропуске расхода 4800 м<sup>3</sup>/с</i>						
Значения собственного вектора $V_i$	-0,183	-0,408	-0,172	-0,721	-0,501	-1,984
Глобальная оценка $O_i$	0,092	0,206	0,086	<b>0,363</b>	0,253	1
<i>При пропуске расхода 6450 м<sup>3</sup>/с</i>						
Значения собственного вектора $V_i$	-0,155	-0,479	-0,095	-0,853	-0,096	-1,679
Глобальная оценка $O_i$	0,092	0,285	0,057	<b>0,508</b>	0,057	1
<i>При пропуске расхода 7550 м<sup>3</sup>/с</i>						
Значения собственного вектора $V_i$	0,243	0,513	0,127	0,798	0,158	1,839
Глобальная оценка $O_i$	0,132	0,279	0,069	<b>0,434</b>	0,086	1
<i>При пропуске расхода 9500 м<sup>3</sup>/с</i>						
Значения собственного вектора $V_i$	0,284	0,709	0,242	0,530	0,279	2,043
Глобальная оценка $O_i$	0,139	<b>0,347</b>	0,118	0,259	0,137	1

Согласно полученным данным при пропуске расходов до 7550 м<sup>3</sup>/с наибольшие глобальные оценки имеет вариант А4, а при пропуске максимального поверочного расхода 9500 м<sup>3</sup>/с – вариант А2. Учитывая что последнее условие относится к явлениям абсолютно редкой повторяемости, по совокупности принятых критериев лучшим следует признать вариант А4, представляющий собой водосливную плотину со специальной формой носкатамплина имеющего в центральной части трапецидальный вырез, так называемая форма «ласточкиного хвоста».

**Заклучение**

Водобросные сооружения гидроузлов относятся к сложным техническим системам, затраты на создание которых достаточно высоки в совокупной стоимости строительства гидроузла. Выбор оптимального решения, установление его технических характе-

ристик на большом диапазоне эксплуатационных условий, выявление зависимостей между отдельными сложными процессами и явлениями, которые кажутся не связанными друг с другом, приводят к резкому возрастанию трудностей принятия обоснованных решений. Последствия ошибок становятся все серьезнее, а обращение к профессиональному опыту и интуиции не всегда приводит к выбору наилучшей альтернативы.

Предлагается использовать комплексный подход, базирующийся на ряде методов Теории принятия решения, позволяющий решить проблему выбора, причем быстро и с достаточной степенью точности. При этом участнику принятия решения достаточно грамотно сформулировать задачу, определить всеохватывающие критерии оптимальности и правильно интерпретировать полученные результаты решения задачи.

Универсальность предлагаемого метода заключается в возможности использования количественных и качественных критериев, учета их значимости и изменения при различных эксплуатационных условиях. Это позволяет достичь объективного выбора из множества вариантов при неограниченном количестве критериев.

### Литература

1. Экспериментальные гидродинамические исследования на крупномасштабной гидравлической модели водосброса для разработки новых конструктивных решений, обеспечивающих надежную эксплуатацию разделительной стенки и подпорных стенок №№ 2, 3 отводящего канала водосброса Зейской ГЭС. Этап 3: Выполнение поисковых экспериментальных гидравлических исследований с целью выбора оптимального решения по реконструкции водосброса. Научно-технический отчет / АО «НИИЭС», 2016.
2. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003. – М.: Минрегион России, 2012. – 39 с.
3. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. – М.: Москва: КолосС, 2004.
4. Гольдштейн А.Л. Многокритериальная оценка альтернатив. Вестник ПНИПУ: Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2012. № 6.
5. Ларичев О.И. Вербальный анализ решений. – М.: Наука, 2006.
6. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах. М.: Логос, 2000.
7. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий, пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993.
8. Evren R. Interactive compromise programming // Journal of the Operational Research Society – 1987. Vol.38. No2.

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ВОДОСБРОСНОГО ТУННЕЛЯ  
ЭВТ-3 РОГУНСКОЙ ГЭС С ГАШЕНИЕМ ЭНЕРГИИ В  
ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ НА ОТВОДЯЩЕМ ТРАКТЕ**

**HYDRAULIC STUDIES OF OPERATING SPILLWAY  
TUNNEL № 3 OF ROGUN HPP WITH  
ENERGY DISSIPATION IN A SWIRLING FLOW AT THE  
OUTLET TRACT**

*Новикова И.С., кандидат техн. наук, Максимович В.А.,  
Федорков А.М. (АО «НИИЭС»),  
Шакиров Р.Р. (АО «Институт Гидропроект»)*

Объектом исследования является эксплуатационный водосброс № 3 (ЭВТ-3) Рогунской ГЭС, расположенный на реке Вахш (республика Таджикистан). В рассматриваемой конструкции реализуется принципиально новый подход к проектированию высоконапорных водосбросных сооружений, при котором с помощью формирования закрученного потока на отводящем тракте туннельного водосброса обеспечивается существенное гашение энергии сбросного потока не в русле реки, в внутри самого водосброса. На физической модели водосброса (масштаб 1:80) исследовались проектные режимы работы водосброса с закрученным потоком на отводящем тракте и была определена пропускная способность водосброса. В статье показано, что разработанная конструкция закручивающего устройства позволяет погасить суммарно в туннеле и водобойном колодце 96 % начальной энергии сбросного потока.

Водосброс, туннель, затворная камера, наклонная шахта, закручивающее устройство, водобойный колодец, расход воды, закрученный поток, пропускная способность, гидродинамическое давление, скорости, гашение энергии.

---

The object of study is the operating spillway No. 3 of the Rogun hydropower plant located on the Vakhsh river (Tajikistan). In the considered construction a fundamentally new approach to the designing of high-pressure water discharge structures is implemented, wherein by forming a swirling flow in the outlet tract of the tunnel spillway a significant energy dissipation of the discharge stream takes place not in the river, but inside

the spillway. On the physical model of the spillway (scale 1:80) modes of operation of the spillway with a swirling flow in the outlet tract were determined, and a spillway capacity was calculated. The developed design of swirling device allows to dissipate 96% of the initial energy of the outlet stream in the tunnel and the stilling basin in total.

Spillway, tunnel, gate chamber, inclined shaft, swirling device, stilling basin, water flow, swirling flow, capacity, hydrodynamic pressure, velocity, energy dissipation.

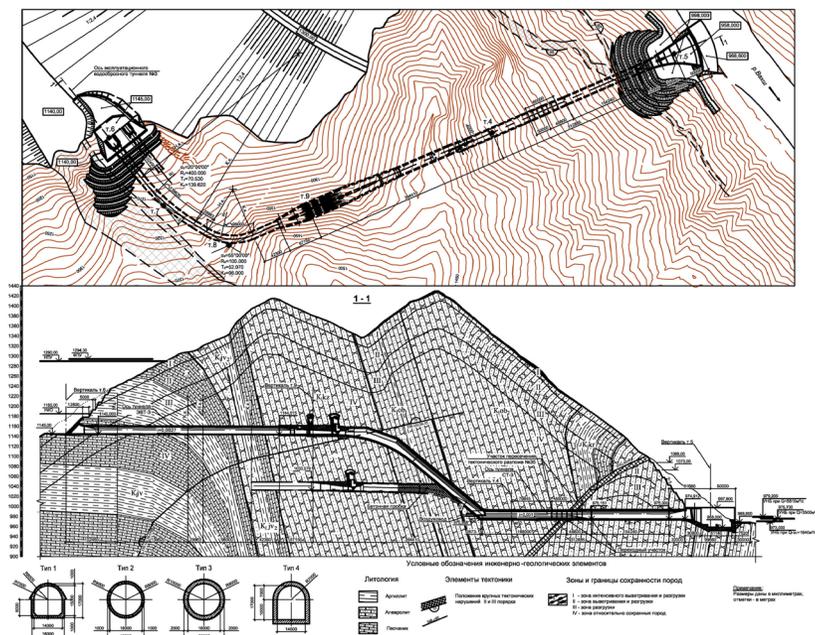
Объектом проведенных исследований является эксплуатационный водосбросной туннель № 3 (ЭВТ-3) Рогунской ГЭС [1]. Максимальный расчетный расход водосброса составляет 3 600 м<sup>3</sup>/с при напоре на сооружение  $H = НПУ - УНБ = 1290 \text{ м} - 979 \text{ м} = 311 \text{ м}$ .

Исследованная конструкция эксплуатационного туннельного водосброса ЭВТ-3 для Рогунской ГЭС разработана ОАО «Институт Гидропроект» совместно с ОАО «НИИЭС». В рассматриваемой конструкции реализуется принципиально новый подход к проектированию высоконапорных водосбросных сооружений, который состоит в том, что гашение кинетической энергии высокоскоростного потока происходит не в русле реки при сопряжении бьефов, а внутри самого водосбросного тракта [2]. В данном проекте этот принцип реализуется с помощью формирования закрученного потока на отводящем тракте туннеля (рис. 1).

Туннель состоит из следующих характерных участков:

- участок входа с плавным оголовком длиной 64,471 м;
- напорный участок туннеля подковообразного сечения (гидравлический диаметр  $D_2 = 14,54 \text{ м}$ , площадь 188,97 м<sup>2</sup>) длиной 345,952 м от участка входа до камеры затворов, включающий участок поворота в плане на 55°;
- участок совмещенной затворной камеры плоских ремонтных, аварийно-ремонтных и рабочих сегментных затворов с переходными участками общей длиной 277,41 м;
- наклонная шахта с углом наклона к горизонту 40°, заканчивающаяся узлом закрутки, соединяющим наклонную шахту с отводящим водоводом;
- отводящий водовод;
- водобойный колодец с рисбермой за ним.

В затворной камере эксплуатационного водосбросного туннеля ЭВТ-3 используется затворное оборудование строительного туннеля СТ-3. Максимальный напор на рабочие затворы составляет 150 м.



**Рис. 1.** План и разрез по оси эксплуатационного водосбросного туннеля ЭВТ-3 по доработанному проекту строительства АО «Институт «Гидропроект» (2014)

Отводящий горизонтальный участок эксплуатационного водосброса ЭВТ-3 и водобойный колодец являются общими со строительным водосбросом СТ-3. Входной порог туннеля СТ-3 располагается на отметке 1 035,0 м. При  $УВБ = 1\ 185,0$  м строительный туннель СТ-3 отключается от работы, и его выход в шахту закрывается бетонной пробкой.

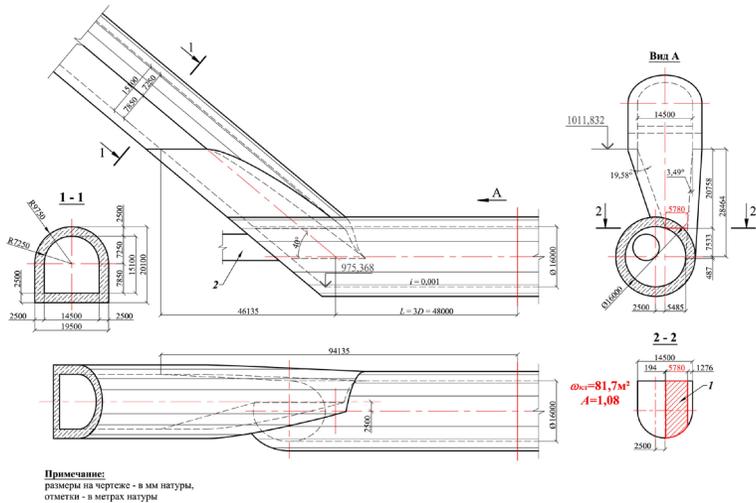
При проведении гидравлических исследований на физической модели водосброса масштаба 1:80 (рис. 2) в ОГИ АО «НИИЭС» была разработана конструкция участка перехода от камеры сегментных затворов к наклонной шахте и от наклонной шахты к отводящему туннелю через узел закрутки, который

для строительного и эксплуатационного водосбросов должен быть общим. Проведенные исследования показали, что для частичного затопления наклонной шахты с образованием в ней промежуточного бьефа, площади ключевых сечений в закручивающихся устройствах туннелей СТ-3 и ЭВТ-3 не могут быть одинаковыми из-за разных действующих напоров.



**Рис. 2.** Общий вид модели эксплуатационного водосбросного туннеля ЭВТ-3

Для туннеля СТ-3 была рекомендована площадь ключевого сечения равная  $104,25 \text{ м}^2$  [3], а для туннеля ЭВТ-3 –  $81,7 \text{ м}^2$  (рис. 3).



**Рис. 3.** Конструкция закручивающего устройства эксплуатационного водосбросного туннеля ЭВТ-3:1 – ключевое сечение; 2 – воздуховод В6 диаметром 7,0 м

Формирование промежуточного бьефа в наклонной шахте зависит от площади ключевого сечения  $\omega_{кл}$  в закручивающем устройстве и геометрического параметра закрутки  $A$  [4, 5]:

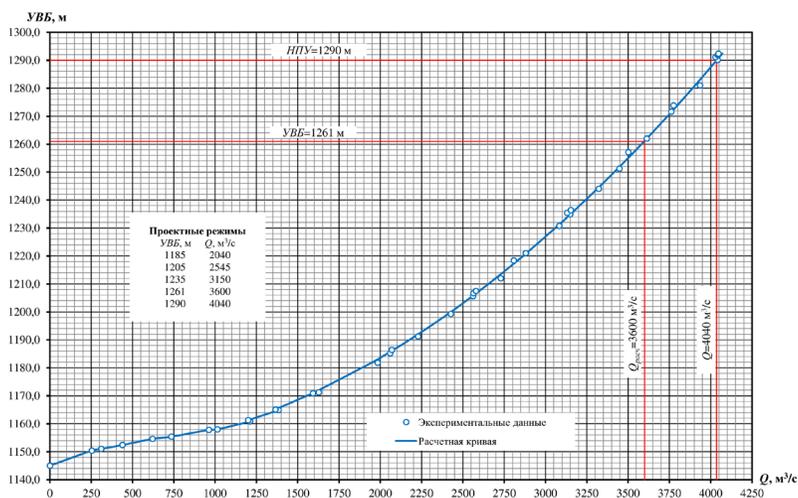
$$A = \frac{\pi e R}{\omega_{кл}} \cdot \sin \beta, \quad (1)$$

где  $e$  – эксцентриситет центра тяжести ключевого сечения относительно оси отводящего туннеля;  $R$  – радиус начального цилиндрического участка отводящего туннеля;  $\beta$  – угол в вертикальной плоскости между осями шахты и отводящего туннеля.

Для запроектированного закручивающего устройства ключевое сечение имеет параметр закрутки  $A = 1,08$ .

В процессе исследований на модели была определена пропускная способность туннеля ЭВТ-3 (рис. 4). График пропускной способности  $УВВ$  ( $Q$ ) состоит из двух участков для затопленного и незатопленного входа. Занапоривание входного участка туннеля происходит при  $УВВ > 1\ 160,0$  м. Поскольку туннель будет эксплуатироваться при  $УВВ > 1\ 185,0$  м, то подводящий участок будет всегда напорным. По результатам экспериментов для водо-

сбросного туннеля ЭВТ-3 коэффициент расхода туннеля относительно верха отверстий рабочих затворов  $\mu = 0,86$ .

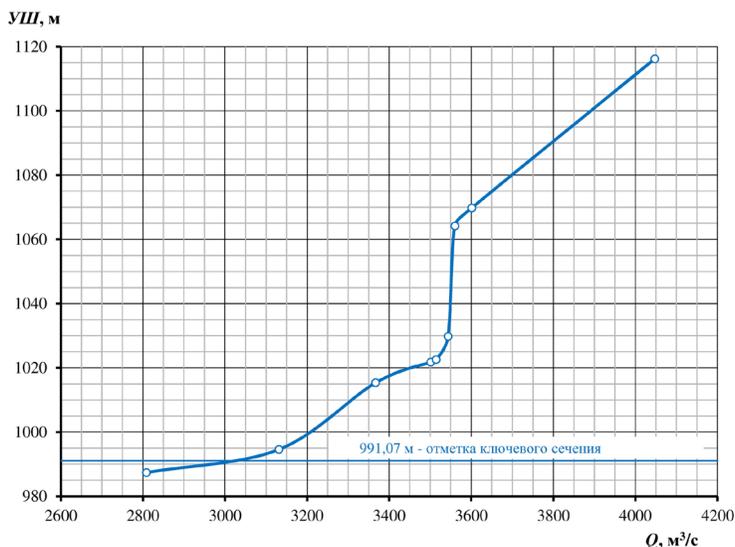


**Рис. 4.** Пропускная способность эксплуатационного водосбросного туннеля ЭВТ-3

На графике  $УВБ(Q)$  видно, что расчетный расход эксплуатационного водосбросного туннеля равный  $3\ 600\ \text{м}^3/\text{с}$  можно будет пропустить через туннель при  $УВБ = 1\ 261,0\ \text{м}$ , а при  $НПУ = 1\ 290,0\ \text{м}$  через туннель при полном открытии рабочих затворов проходит расход  $Q = 4\ 040,0\ \text{м}^3/\text{с}$ .

Поскольку для строительного туннеля СТ-3 площадь ключевого сечения равна  $\omega_{\text{кл}} = 104,25$ , то в период подключения эксплуатационного подводящего участка ЭВТ-3 к отводящему тракту СТ-3 узел закрутки надо будет реконструировать.

На рис. 5 показано как для предлагаемого узла закрутки меняется уровень воды в наклонной шахте при увеличении пропускаемого через водосбросной туннель расхода. На графике видно, что наклонная шахта начинает занaporиваться только при расходах больше  $2\ 800\ \text{м}^3/\text{с}$ . При расходе  $3\ 500\ \text{м}^3/\text{с}$  поток воды в начале наклонной шахты отрывается от дна и замыкается на ее своде, а уровень воды в шахте скачкообразно поднимается до отметки  $1\ 062,0\ \text{м}$ . Осредненный уровень воды в шахте при  $Q = 4\ 040\ \text{м}^3/\text{с}$  равен  $1\ 118\ \text{м}$ .



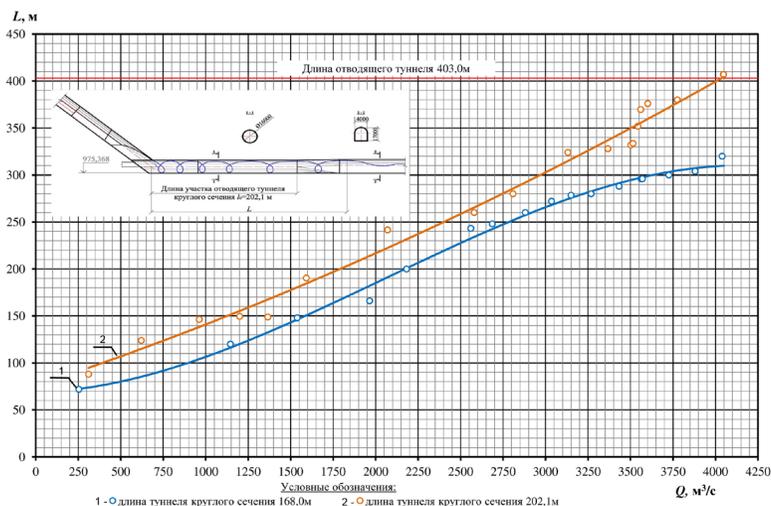
**Рис. 5.** Зависимость уровня воды в наклонной шахте эксплуатационного водосбросного туннеля ЭВТ-3 от расхода воды  $U_{Ш}(Q)$

Закручивающее устройство в виде тангенциального завихрителя формирует в отводящем водоводе круглого сечения несимметричный вихревой поток с паровоздушным жгутом внутри. Длина участка с вихревым потоком зависит от начальной закрутки потока, сбросного расхода, шероховатости поверхности и формы поперечного сечения отводящего участка туннеля. Длина всего отводящего туннеля ЭВТ-3 равна 402 м, что составляет  $25 d_m$  (где  $d_m = 16,0$  м – диаметр отводящего туннеля). Для того чтобы вихревой поток в туннеле круглого сечения успел разрушиться, начальный параметр закрутки должен быть  $A < 1,0$ .

Исследования показали, что для принятого узла закрутки ( $A = 1,08$ ) при расходе  $Q \geq 2\ 800$   $\text{м}^3/\text{с}$  в туннеле круглого по всей длине сечения остаточная закрутка сохраняется вплоть до бычка перед водобойным колодезем. Из-за этого вода в водобойный колодез поступает преимущественно через один пролет. Разрушение закрученного потока в туннеле корытообразного

сечения происходит значительно интенсивней. Поэтому было решено, что отводящий тракт будет иметь переменное сечение с начальным участком круглого поперечного сечения длиной 168,0 м, за которым последует переходник и туннель корытообразного сечения. Так как в туннеле корытообразного сечения вихревой поток разрушается быстрее, чем в круглом, то в данном варианте отводящего туннеля закрученный поток успевал трансформироваться в осевой на длине 320,0 м. При этом оказалось, что участок перехода располагается в месте геологического разлома № 35, в связи с чем участок туннеля круглого сечения был удлинен до 202 м, чтобы зона разлома была перекрыта туннелем круглого сечения со специальной компенсаторной облицовкой.

На рис. 6 показаны зависимости длины зоны существования вихревого потока от расхода воды. Из рисунка видно, что для туннеля круглого сечения длиной  $l_0 = 202$  м вихревое течение при расходе  $Q = 4040$  м<sup>3</sup>/с сохраняется вплоть до водобойного колодца, из-за чего поток на входе в колодец имеет несформированную свободную поверхность и несимметричное живое сечение.



**Рис. 6.** Зависимость длины закрутки потока в отводящем туннеле от сбросного расхода  $L(Q)$

При всех проектных режимах за узлом закрутки имеет место устойчивое спиральное вихревое движение с несимметричным паровоздушным жгутом внутри, в который с торца закручивающего устройства необходимо подводить воздух для уменьшения вакуума внутри отводящего туннеля. Интенсивное гашение кинетической энергии потока происходит: в шахте при наличии в ней промежуточного бьефа, в закручивающем устройстве, на отводящем участке по длине вихревого потока и при его распаде, когда закрученный поток снова переходит в осевой.

На рис. 7 показаны режимы течения в русле р. Вахш на модели при разных пропускаемых через водосброс расходах. На рис. 8...10 для проектных уровней верхнего бьефа показаны пьезометрические уровни в водобойном колодце, а также скорости потока перед водобойным колодцем, за ним и в конце рисбермы. Из этих рисунков видно, что максимальные скорости в этом створе при  $УВБ = 1\ 205$  м равны 30,9 м/с, при  $УВБ = 1\ 235$  м – 32,8 м/с, а при  $УВБ = 1\ 290$  м – 37,2 м/с. Средние скорости потока на водобойной стенке и на рисберме распределены достаточно равномерно без заметной сбойности течения по ширине.

Замеренные пьезометрические уровни по длине отводящего туннеля и эпюры скоростей в характерных створах позволяют оценить потери энергии внутри водосброса при использовании закрученного потока.

В табл. 1 представлена трансформация удельной энергии водного потока по длине эксплуатационного водосбросного туннеля ЭВТ-3 в проектных режимах. В таблице посчитана удельная энергия потока в трех створах: створ 1 – выход из отверстий, перекрываемых сегментными затворами; створ 2 – конец отводящего туннеля перед водобойным колодцем; створ 3 – гребень водобойной стенки. Отметка водобойной стенки 973,0 м взята за плоскость сравнения. Начальный уровень удельной энергии потока  $E_0 = УВБ - 973,0$  м. Отметка порога сегментного затвора равна 1 143,8 м. Отметка дна в конце туннеля равна 974,9 м.



а) УВБ = 1 205 м,  $Q = 2\,560\text{ м}^3/\text{с}$ ;

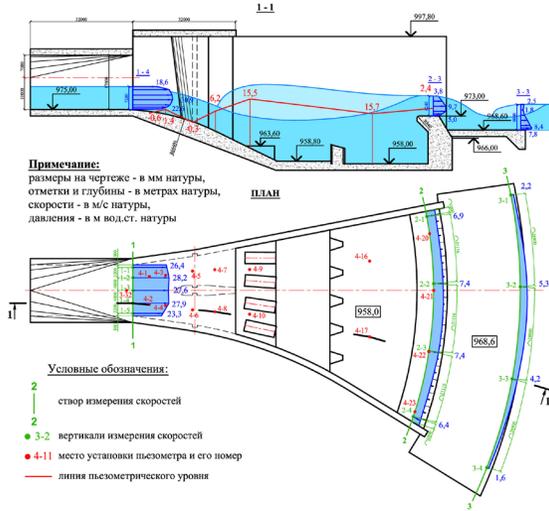


б) УВБ = 1 235 м,  $Q = 3\,150\text{ м}^3/\text{с}$ ;

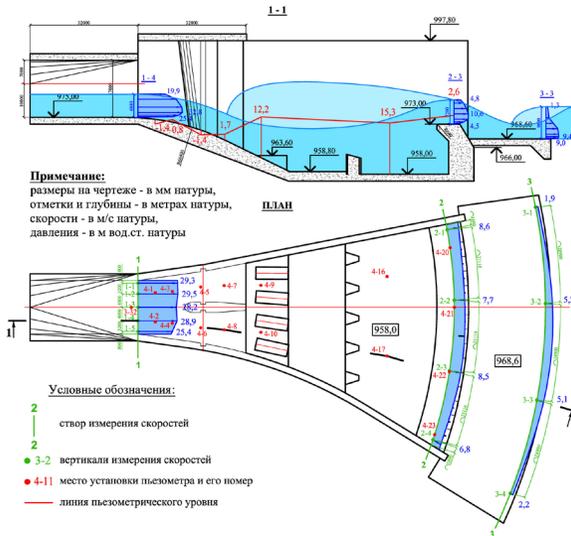


в) УВБ = 1 290 м,  $Q = 4\,040\text{ м}^3/\text{с}$ ;

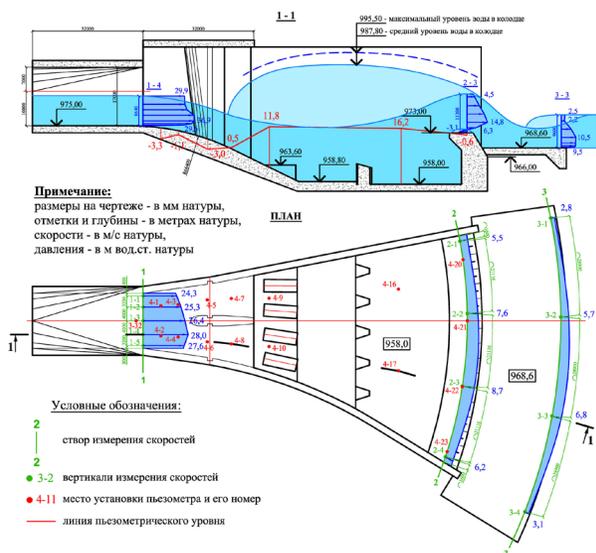
**Рис. 7.** Режимы течения в русле р. Вахш на выходе из водобойного колодца водосброса ЭВТ-3



**Рис. 8.** Распределение осредненных гидростатических давлений и скоростей потока на входе и выходе из водобойного колодца при  $УВБ = 1205$  м,  $Q = 2560$  м<sup>3</sup>/с,  $УВБ_{min} = 975,0$  м



**Рис. 9.** Распределение осредненных гидростатических давлений и скоростей потока на входе и выходе из водобойного колодца при  $УВБ = 1235$  м,  $Q = 3150$  м<sup>3</sup>/с,  $УВБ_{min} = 975,9$  м



**Рис. 10.** Распределение осредненных гидростатических давлений и скоростей потока на входе и выходе из водобойного колодца при  $УВБ = 1290$  м,  $Q = 4050$  м<sup>3</sup>/с,  $УВБ_{min} = 977,2$  м

**Таблица 1**

УВБ	$Q$	$E_0$	$E_1$	$\frac{E_0 - E_1}{E_0} \cdot 100$	$E_2$	$\frac{E_0 - E_2}{E_0} \cdot 100$	$E_3$	$\frac{E_0 - E_3}{E_0} \cdot 100$
м	м <sup>3</sup> /с	м	м	%	м	%	м	%
1205	2560	232	216,6	6,6	40,1	82,7	9,5	95,9
1235	3150	262	238,0	9,2	45,3	82,7	10,8	95,9
1290	4050	317	279,3	11,9	51,2	83,8	14,0	95,6

Из табл. 1 видно, что благодаря использованию вихревого течения в отводящем туннеле удалось погасить около 83% энергии потока, вытекающего из отверстий, перекрываемых сегментными затворами. Еще 13% энергии потока, поступающего в водобойный колодец, гасится непосредственно в нем. Всего в системе гасится 96% начальной энергии потока.

### **Выводы:**

1. Расчетный расход водосбросного туннеля ЭВТ-3  $Q = 3\ 600\ \text{м}^3/\text{с}$  пропускается при полностью открытых затворах при отметке уровня верхнего бьефа УВБ = 1 261,0 м. При уровне верхнего бьефа равном НПУ = 1 290,0 м через затворные отверстия проходит расход  $Q = 4040\ \text{м}^3/\text{с}$ . Коэффициент расхода при напорном режиме на участке до затворной камеры  $\mu = 0,86$ .
2. Отводящий туннель за узлом закрутки рекомендуется выполнять переменного сечения. За узлом закрутки на длине 202 м туннель имеет круглое сечение диаметром 16 м, далее следует переходной участок, а затем туннель корытообразного сечения 14 м×17 м.
3. В предложенной компоновке эксплуатационного водосбросного туннеля ЭВТ-3 гашение кинетической энергии потока происходит: в узле закрутки, на отводящем участке туннеля и при переходе вихревого потока в осевой. В водосбросном туннеле до водобойного колодца гасится около 83% начальной энергии потока. Еще 13% энергии гасится в водобойном колодце. Всего в водосбросной системе гасится 96% начальной энергии потока.

### **Литература**

1. Рогунская ГЭС на реке Вахш в республике Таджикистан. Доработка проекта строительной ГЭС. Корректировка комплекса пуска первых агрегатов станции. – М., ОАО «Институт Гидропроект», 2012.
2. НТО «Гидравлические исследования строительного туннеля 3-го яруса и эксплуатационного водосброса № 2 Рогунской ГЭС в республике Таджикистан». Этап 13. Часть 2. Гидравлические исследования эксплуатационного водосброса 3-го яруса. – М., ОАО «НИИЭС», 2015.
3. *Новикова И.С., Максимович В.А., Федорков А.М.* Гашение энергии закрученного потока на отводящем тракте строительного туннеля № 3 Рогунской ГЭС. Безопасность энергетических сооружений № 2 (20) – М., АО «НИИЭС» 2015.
4. *Слисский С.М.* Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. – М., «Энергоатомиздат», 1986.
5. *Галант М.А., Животовский Б.А., Новикова И.С., Родионов В.Б., Розанова Н.Н.* Особенности вихревых туннельных водосбросов и гидравлические условия их работы. – М., «Гидротехническое строительство», № 9, 1995.

**НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МИНИ-ГЭС БЛОЧНОГО  
ИСПОЛНЕНИЯ В СТВОРЕ  
ХОРОБРОВСКОГО ГИДРОУЗЛА (ЭТАП 1)**

**FULL-SCALE TEST OF MINI HYDROELECTRIC  
POWER PLANT OF CONTAINER TYPE AT THE SITE OF  
KHOROBROVSKAYA DAM (PHASE 1)**

*Историк Б.Л., доктор техн. наук, Соболев В.Ю., кандидат  
техн. наук, Городничев Р.М., Золотов А.Л., Крылов А.П.*  
(АО «НИИЭС»)

В АО «НИИЭС» для снабжения электроэнергией изолированных потребителей была разработана мини-ГЭС контейнерного типа с ортогональной турбиной. При разработке мини-ГЭС основное внимание уделялось простоте конструкции и высокой степени унификации деталей, что существенно упрощает монтажные работы и техническое обслуживание. Для подтверждения расчетных параметров на площадке Хоробровской малой ГЭС на р. Нерль были проведены натурные испытания гидроэнергетического оборудования.

Мини-ГЭС контейнерного типа, ортогональная турбина, натурные испытания, Хоробровский гидроузел.

---

For electricity supply of isolated consumers in JSC «NIIES» was developed the mini hydroelectric power plant of container type with orthogonal turbine. During the development of mini HPP special focus was made on simplicity of design and high level of unification of the details, which significantly simplifies installation and technical maintenance. To confirm the design parameters at the site of Khorobrovskaya small hydropower station on the river Nerl, a full-scale testing of hydropower equipment was conducted.

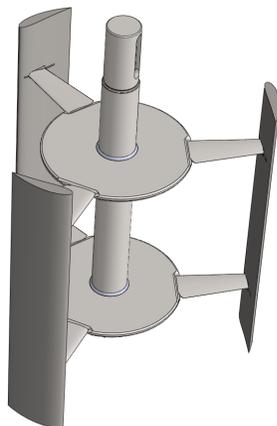
Mini hydroelectric power plant of container type, orthogonal turbine, full-scale tests, Khorobrovskaya hydropower station.

**Введение**

В АО «НИИЭС» на протяжении ряда лет ведется разработка конструкции низконапорной поперечно-осевой реактивной турбины, предназначенной в первую очередь для использования на приливных электростанциях (ПЭС). Прототипом этой турбины

послужил ротор Дарье с прямолинейными крыловидными лопастями параллельными валу, который получил в России название ортогональная турбина. Достаточно быстроходная ортогональная турбина применяется в настоящее время за рубежом лишь в свободном потоке воды или воздуха, поскольку в напорной турбинной камере низконапорного турбинного водовода у нее слишком низкий к.п.д., не превышающий 0,37 [1].

Новая турбина, получившая в АО «НИИЭС» название «модернизированная ортогональная турбина» (рис. 1), отличается от прототипа наличием в турбинной камере пристеночного направляющего аппарата оригинальной конструкции, с помощью которого удалось практически удвоить максимальный к.п.д. ортогональной турбины в напорных условиях и приблизить его к максимальному к.п.д. классических продольно-осевых пропеллерных и поворотно-лопастных турбин [2].



**Рис. 1.** Общий вид рабочего колеса ортогональной турбины типового ряда энергоблоков мини-ГЭС с тремя лопастями

По мнению разработчиков, помимо ПЭС модернизированная ортогональная турбина может также найти широкое применение в малой гидроэнергетике на речных гидроэлектростанциях (ГЭС) с напорами до 6-8 м, в морской волновой энергетике в качестве компактной и высокооборотной воздушной турбины, а также в свободно-поточных энергоустановках, работающих на воде и воз-

духе с использованием концентраторов свободного потока новой конструкции [3].

В настоящее время в институте разработан и изготовлен энергоблок мини-ГЭС контейнерного исполнения, рассчитанный на напоры 2 и 4 м, номинальной мощностью соответственно 10 и 30 кВт, с диаметром рабочего колеса модернизированной ортогональной турбины 0,6 м.

### **Хоробровская малая гэс – полигон для проведения испытаний**

Для проведения первого этапа испытаний мини-ГЭС была выбрана Хоробровская малая ГЭС на реке Нерль Переславского района Ярославской области, построенная в 2002-2003 гг. рядом с ранее существовавшей плотиной и мельницей вблизи села Хороброво. В настоящее время ГЭС (рис. 2) принадлежит филиалу ПАО «РусГидро» – «Каскад Верхневолжских ГЭС» и используется в качестве полигона для испытания новых типов затворов и отработки конструкций турбин, предназначенных для малых ГЭС.



**Рис. 2.** Вид на водослив Хоробровской малой ГЭС со стороны нижнего бьефа

Поскольку одной из основных задач при разработке программы испытаний мини-ГЭС в створе Хоробровской малой ГЭС было проведение работ при минимальном вмешательстве в конструкцию существующих гидротехнических сооружений, был выбран вариант подводящего водовода сифонного типа.

В качестве основных потребителей вырабатываемой на мини-ГЭС электроэнергии в первую очередь рассматриваются изолированные сезонные потребители электроэнергии, поэтому в процессе натурных испытаний на Хоробровской ГЭС основное внимание было уделено отработке конструкции мини-ГЭС высокой степени заводской готовности с унифицированными узлами и деталями. Это позволяет существенно упростить строительно-монтажные работы и последующее техническое обслуживание энергоблока.

### **Конструктивные особенности мини-ГЭС**

Объектом выполнения первой части натурных испытаний стала опытная мини-ГЭС с 5-лопастной ортогональной турбиной и сифонным водоводом, которая была смонтирована во втором пролете водосливной плотины лабиринтного типа Хоробровской ГЭС. Основные технические характеристики энергоблока представлены в табл. 1.

В состав конструкции низконапорной мини-ГЭС входят гидроагрегат с ортогональной турбиной, размещенный в герметичном контейнере, а также элементы подводящего и отводящего водоводов. Ортогональная турбина имеет горизонтальную ось вращения с 5-лопастным ротором мощностью 30 кВт, при этом проточная часть энергоблока не меняется при установке 3-лопастного рабочего колеса мощностью 10 кВт. Вращение от ротора турбины к генератору передается через одноступенчатую ременную передачу (рис. 3).

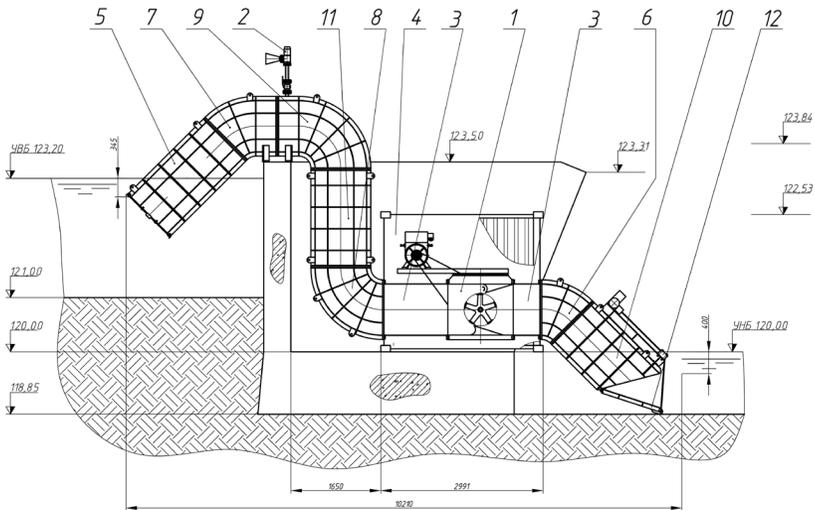
При работе мини-ГЭС на изолированного потребителя необходимо применение дополнительных регулировочных устройств для поддержания номинальной частоты тока, вырабатываемого синхронным генератором. В рассматриваемой конструкции мини-ГЭС используется автобалластная система регулирования, при которой на выход генератора параллельно с полезной нагруз-

кой подключена регулируемая балластная нагрузка. Специальный регулятор балластной нагрузки по отклонению частоты переменного тока генератора от номинального значения регулирует величину балластной нагрузки, позволяя при колебаниях полезной нагрузки оставлять частоту вращения системы «генератор-турбина» неизменной.

Таблица 1

**Основные технические характеристики мини-ГЭС  
с 5-лопастной ортогональной турбиной**

<b>Параметр</b>	<b>Значение</b>
Номинальная мощность	30 кВт
Располагаемый напор	3,2 – 3,5 м
Номинальный расход	1,5 м <sup>3</sup> /сек
<b>Гидротурбина</b>	
Тип	Ортогональная
Диаметр ротора	600 мм
Длина лопасти	792 мм
Количество лопастей	5 шт.
Номинальная скорость вращения ротора	288 об/мин
Разгонная скорость вращения ротора турбины	512 об/мин
<b>Генератор</b>	
Модель	БГ-30М2-4У2
Тип	Синхронный
Номинальная мощность генератора	30 кВт
Номинальная скорость вращения ротора	1500 об/мин
Выходное электрическое напряжение	400 В
Частота выходного тока	50 Гц



**Рис. 3.** Общий вид опытной мини-ГЭС, установленной на Хоробровском гидроузле:

1 – ортогональная турбина; 2 – автоматический срыв вакуума; 3 – водовод контейнера; 4 – контейнер; 5 – оголовок водовода; 6 – отвод 45°; 7 – отвод 45° удлиненный; 8 – отвод 90°; 9 – отвод 90° удлиненный; 10 – отсасывающая труба; 11 – секция водовода прямая, 12 – затвор

### Программа и методика испытаний

Целью проведения испытаний мини-ГЭС на Хоробровском гидроузле является подтверждение расчетных характеристик мини-ГЭС с ортогональной турбиной, включающее в себя определение расхода воды через турбину, мощности турбины при заданном значении напора (брутто), напора нетто станции, а также проведение ресурсных испытаний мини-ГЭС [4].

При этом определение расхода осуществлялось способом центробежной силы. Суть способа состоит в том, что при повороте потока развивается центробежная сила, которая повышает давление у вогнутой стенки и понижает его у выпуклой [5].

Таким образом, скорость потока, а следовательно и расход  $Q$ , строго пропорционален корню из перепада давления  $\Delta p$  на выпуклой и вогнутой поверхностях колена. Для расчета расхода  $Q$  используется коэффициент пропорциональности  $k$ , который опре-

деляется опытным путем. Расход будет определяться по формуле:

$$Q = k\sqrt{\Delta p}$$

Замер расхода способом центробежной силы является весьма точным при наличии его тарировки и теряет точность при малых скоростях потока.

К достоинству способа при минимальных подготовительных процедурах на колене водовода можно отнести возможность его применения на реальных объектах. Недостатком способа является возможность засорения малых отверстий при длительной работе на мутной воде.



**Рис. 4.** Модель подводящего участка МГЭС с сифонным подводом:  
 1 – оголовок водовода; 2 – отвод 45°; 3 – прямолинейный горизонтальный участок; 4 – отвод 90°; 5 – прямолинейный вертикальный участок; 6 – отвод 90°; 7 – турбинный водовод; 8 – затвор-регулятор.

Одной из основных характеристик для определения к.п.д. турбины является расход воды, проходящий через турбинный водовод. Поскольку водоводы мини-ГЭС на Хоробровском гидроузле имеют прямоугольное сечение, для точного измерения расхода

методом центробежной силы было необходимо провести его калибровку. Тарировка проводилась на экспериментальном стенде, изготовленном в гидравлической лаборатории АО «НИИЭС» в соответствии с требованиями международных стандартов (МЭК 60193, МЭК-41, ISO 1438:2008 (E)).

Стенд представлял собой геометрически подобную модель мини-ГЭС с сифонным водоводом для испытаний на Хоробровском гидроузле. В процессе проведения исследований для измерения расхода воды использовался водослив с тонкой стенкой треугольного очертания. Для измерения давления применялись жидкостные манометры, оборудованные мерной шкалой.

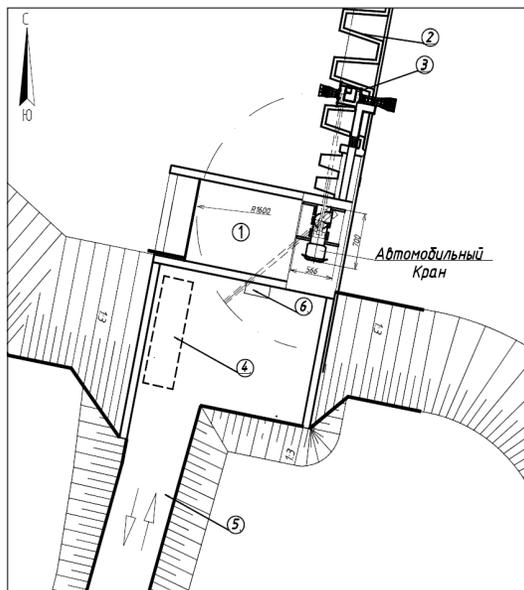
### **Разработка проекта производства работ (ППР)**

Проект производства работ на проведение монтажа энергоблока мини-ГЭС с ортогональной турбиной с сифонным водоводом в створе Хоробровского гидроузла на р. Нерль был разработан сотрудниками АО «НИИЭС» и согласован с филиалом ПАО «РусГидро» – «Каскад Верхневолжских ГЭС» [5].

Проект производства работ был составлен на монтажные и пусконаладочные работы по сооружению мини-ГЭС и вводу ее в эксплуатацию, работы по замене роторов турбины в ходе проведения экспериментов, работы по демонтажу и консервации мини-ГЭС.

Поскольку местом проведения испытаний мини-ГЭС была выбрана существующая Хоробровская ГЭС, в строительный генеральный план (рис. 5) вошли существующие основные сооружения водосливной плотины, монтажная площадка, подъездная автодорога и места складирования оборудования и материалов.

В проекте производства работ изложены основные требования по организации монтажных работ и обеспечению требований безопасности, охране труда и окружающей среды. Определена продолжительность этапов работ на объекте, потребность в основных строительных машинах, механизмах и транспортных средствах, рабочих кадрах, электрической энергии, воде, а также во временных зданиях и сооружениях. В составе проекта производства работ разработан календарный план работ и строительный генеральный план.



**Рис. 5.** Строительный генеральный план малой Хоробровской ГЭС и мини-ГЭС контейнерного типа:  
 1 – здание Хоробровской ГЭС; 2 – лабиринтный водослив; 3 – опытная мини-ГЭС с сифонным водоводом; 4 – площадка для складирования оборудования; 5 – подъездная автодорога; 6 – вход в машинный зал Хоробровской МГЭС.

Календарный план строительства предполагал разделение работ по сооружению опытной мини-ГЭС с сифонным водоводом, проведение экспериментов и последующий демонтаж мини-ГЭС по их окончанию на два этапа:

- работы, проводимые в 2015 г. (первый год испытаний);
- работы, проводимые в 2016 г. (второй год испытаний).

Проведение натурных и ресурсных испытаний энергооборудования было предусмотрено в течение двух летних сезонов 2015 и 2016 гг. в период между весенним половодьем и осенними паводками, что во многом определило технологическую последовательность работ.

В процессе проведения экспериментов требовалось выполнение ряда последовательных работ по замене пятилопастного

ротора гидроагрегата на трехлопастное рабочее колесо. Сроки и последовательность проведения научно-исследовательских экспериментов были согласованы с графиком программы и методики испытаний энергоблока.

Работы по демонтажу опытной мини-ГЭС были запланированы после завершения экспериментов в межень с возможностью их корректировки в зависимости от текущей паводковой ситуации.

В целом работы, связанные с сооружением опытной мини-ГЭС с сифонным водоводом и ее демонтажем по окончанию экспериментов, были разделены на три группы в каждый год испытаний:

- монтажные и пусконаладочные работы по сооружению мини-ГЭС;
- монтажно-демонтажные работы, проводимые в ходе экспериментов;
- работы по демонтажу опытной мини-ГЭС.

Монтаж мини-ГЭС в пролет водосброса Хоробровской ГЭС был запланирован стреловым автомобильным краном, характеристика которого обеспечивала грузоподъемность 4,5 тонны (масса энергоблока) на вылете 10 м.

Монтаж механического оборудования (водоводов, силового энергоблока мини-ГЭС контейнерного исполнения, мостика) сводился к следующей последовательности технологических операций. Сначала на монтажной площадке автомобильным краном осуществлялась сборка укрупненных монтажных узлов. Затем автомобильным краном производился монтаж в лабиринтный водослив Хоробровского гидроузла заранее изготовленных элементов вспомогательного мостика. Монтаж элементов конструкции мини-ГЭС в пролет лабиринтного водослива осуществлялся автокраном г/п 60 т с существующей железобетонной монтажной площадки затворов «Гидроплюс».

Монтаж и пуско-наладка электрооборудования опытной мини-ГЭС сводилась к следующей последовательности технологических операций:

- размещение электрооборудования на площадке;
- прокладка, подключение и тестирование электрических и сигнальных кабелей;

– пробные пуски вакуумного насоса, проверка работоспособности вакуумных клапанов, проверка работы тормоза, проверка работы затвора регулировочного шиберного, балластной и полезной нагрузки.

На зимний период 2015-2016 гг., а также по окончании проведения экспериментов осенью 2016 г. был предусмотрен демонтаж мини-ГЭС, который сводился к следующей последовательности технологических операций:

- демонтаж и упаковка электрооборудования и кабелей;
- поузловой демонтаж механического оборудования с использованием автомобильного крана г/п 60 т;
- консервация элементов станции.

### **Выполнение монтажных работ**

На первом этапе на станционной площадке Хоробровской ГЭС с помощью крана г/п 25 т проводилась стыковка подводящего и отводящего водоводов с энергоблоком (рис. 6).



**Рис. 6.** Энергоблок мини-ГЭС в сборе с элементом подводящего и отводящим водоводами

Для установки энергоблока мини-ГЭС в секцию лабиринтного водосброса плотины использовался кран г/п 60 с телескопической стрелой (рис 7).



**Рис. 7.** Автокран г/п 60 т на крановой площадке Хоробровского гидроузла

Процесс установки заранее собранного на станционной площадке основного узла мини-ГЭС во вторую секцию лабиринтного водослива Хоробровского гидроузла занял 10 мин. (рис. 8).



**Рис. 8.** Установка энергоблока мини-ГЭС в секцию водосливной плотины Хоробровского гидроузла

На заключительном этапе монтажных работ с использованием крана к фланцу элемента подводящего водовода был пристыкован входящий оголовок водовода (рис. 9).



**Рис. 9.** Установка входящего оголовка водовода

Общий вид мини-ГЭС с энергоблоком контейнерного исполнения, установленной в пролет лабиринтной водосливной плотины Хоробровского гидроузла, представлен на рис. 10.

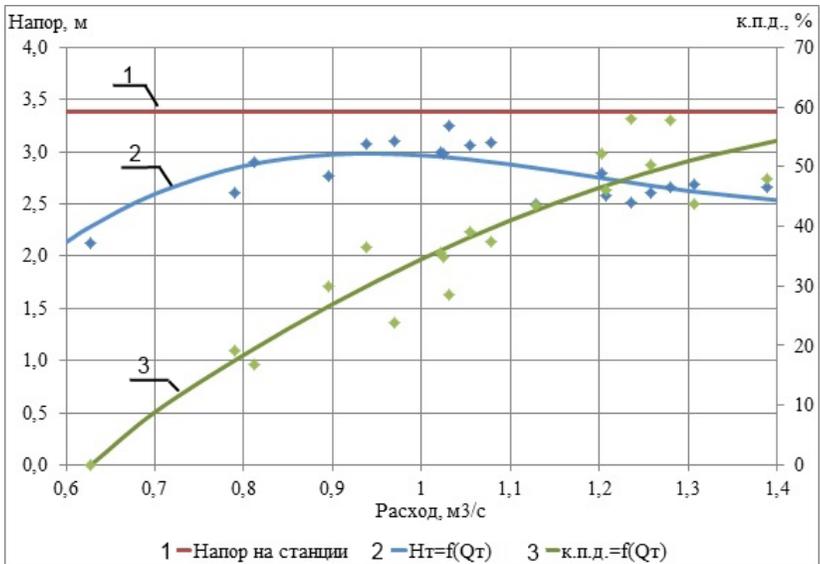


**Рис. 10.** Опытная мини-ГЭС с 30 кВт-гидроагрегатом на Хоробровском гидроузле

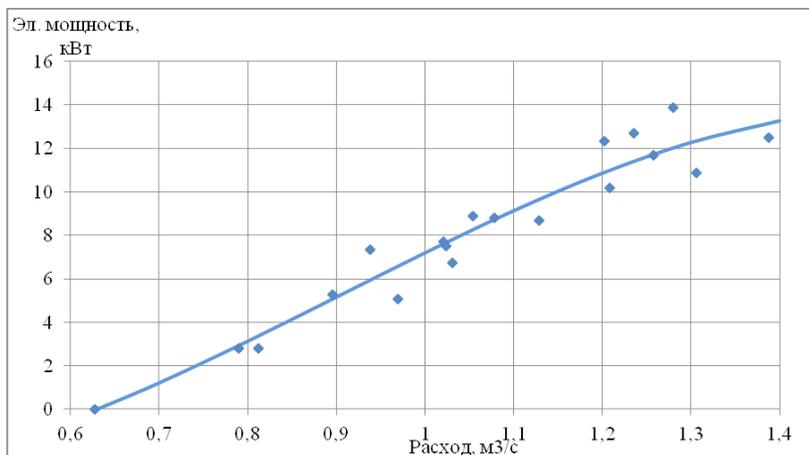
### Результаты предварительных натурных испытаний

В период с начала июля по конец августа, после проведения монтажных и пуско-наладочных работ был проведен ряд предварительных испытаний мини-ГЭС с гидроагрегатом установленной мощностью 30 кВт (турбина с пятилопастным рабочим колесом). Основной объем испытаний, согласно техническому заданию, приходится на 2016 г. В результате предварительных испытаний были получены характеристики гидросилового оборудования в располагаемых диапазонах напора и расходов, а также выявлен ряд конструктивных особенностей оборудования, которые можно улучшить или необходимо изменить для более эффективной и надежной работы мини-ГЭС. Стоит отметить, что эти результаты являются предварительными, они будут скорректированы по результатам испытаний в 2016 г.

По результатам предварительных испытаний были построены следующие характеристики гидросилового оборудования в располагаемых диапазонах напора и расходов, а именно графики  $H_T = f(Q_T)$ ,  $\eta_T = f(Q_T)$  и  $N_{эл} = f(Q_T)$  (рис. 11 и 12).



**Рис. 11.** Графики изменения напора на турбине и к.п.д. турбины в зависимости от расхода ( $n_T = 288$  об/мин,  $H_{ст} = 3,39$  м)



**Рис. 12.** График изменения электрической мощности, развиваемой гидроагрегатом, в зависимости от расхода ( $n_t = 288$  об/мин,  $H_{ст} = 3,39$  м)

Стоит подчеркнуть, что испытания опытной мини-ГЭС проходили при напоре брутто на станции равным 3,4 м. При этом напор на турбине при разных режимах составлял от 2,1 до 3,0 м, в то время как расчетный напор для данного гидроагрегата был равен 4,0 м. Поэтому зафиксированная максимальная мощность турбины в 14 кВт является ожидаемой и достаточно близкой к расчетному значению для данных условий.

### Выводы:

1. Проведенные летом 2015 г. натурные испытания показали, что запроектированная в АО «НИИЭС» и изготовленная на заводе «ТЯЖМАШ» мини-ГЭС контейнерного типа в целом соответствует параметрам, заложенным в техническом задании. Конструкция энергоблока с комплектом водоводов и вспомогательного оборудования показала себя достаточно технологичной при выполнении монтажных работ и последующей пробной эксплуатации.
2. В ходе проведения испытаний были выявлены ряд недостатков в конструкции энергоблока мини-ГЭС (расположение монтажных окон, работа тормозного механизма, отсутствие лестничных подъемов, герметичность люка в крыше контей-

нера, консольное положение рамы под электрогенератор и т.д.). Данные конструктивные недостатки не являются критичными, и для их устранения для последующих испытаний будут выработаны соответствующие рекомендации.

3. Испытания показали эффективность разработанного в АО «НИИЭС» пристеночного направляющего аппарата, с минимальными гидравлическими потерями разворачивающего поток на оптимальный угол атаки по всей длине трассы лопастей и предотвращающего возникновение высокоскоростных холостых транзитных струй. Можно прогнозировать, что дополнительная установка элементов направляющего аппарата в виде дефлекторов при последующих испытаниях энергоблока позволит полностью достичь расчетных параметров мини-ГЭС.
4. Устранение выявленных недостатков конструкции мини-ГЭС позволит улучшить энергетические показатели энергоблока в процессе выполнения второго этапа натурных испытаний и повысить надежность работы узлов и оборудования мини-ГЭС. Разработанные энергоблоки мини-ГЭС являются достаточно эффективными и имеют большой потенциал для их внедрения, в частности, на Дальнем Востоке для электропитания изолированных потребителей.

### Литература

1. *Шполянский Ю.Б., Историк Б.Л., Усачев И.Н., Соболев В.Ю.* Математические и натурные исследования нового ортогонального агрегата для приливных электростанций и низконапорных ГЭС // Гидротехническое строительство. 2009. № 8.
2. *Историк Б.Л., Шполянский Ю.Б.* Модернизированная ортогональная турбина с пристеночным направляющим аппаратом в приливной энергетике // Гидротехническое строительство. 2015. № 6.
3. *Шполянский Ю.Б.* Применение ортогональной турбины в низконапорных и свободных потоках // Гидротехническое строительство. 2011. № 4. Отчет. Испытания опытных образцов мини-ГЭС с ортогональными гидроагрегатами. Этап 1. Разработка программы испытаний энергоблока. Разработка проекта производства работ и монтаж энергоблока на Хоробровской ГЭС / АО «НИИЭС», 2015.
4. Отчет. Разработка способа измерения расхода на мини-ГЭС способом центробежной силы на колене / АО «НИИЭС», 2015.
5. Проект производства работ на проведение монтажа энергоблока мини-ГЭС с ортогональной турбиной с сифонным водоводом в створе Хоробровского гидроузла на р. Нерль / АО «НИИЭС», 2015.

## МОРСКАЯ ЭНЕРГЕТИКА. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

### MARITIME ENERGY. CURRENT STATE AND PROSPECTS

*И.Н. Усачев, кандидат техн. наук (АО «НИИЭС»)*

Рассматриваются осуществленные и проектируемые в России и мире электростанции, работающие на энергии Мирового Океана: напорные приливные (ПЭС), безнапорные свободнопоточные на приливных и морских течениях (СвпЭС), волновые (ВолнЭС), ветровые морского базирования (МВЭС), а также комбинированные наплавные морские энергоустановки локального энергоснабжения (КЭС), предлагаемые для энергоснабжения различных объектов Арктического шельфа и Северного морского пути России. Рассмотрены эффективные отечественные технологии наплавного способа строительства в море (без перемычек), а также возможность применения для приливных, волновых и ветровых электростанций новых отечественных ортогональных гидроагрегатов. Доказана полная экологическая безопасность морских энергоустановок, как в период строительства, так и в период эксплуатации. Также показана возможность устойчивой работы ПЭС в современных энергосистемах, использование ее дискретной энергии для выработки водорода и использования ПЭС для промышленной добычи ценных микроэлементов из морской воды.

Приливная энергия, волновая энергия, типовые морские энергоблоки заводского изготовления, наплавная технология строительства, ортогональная турбина, комплексные морские энергоустановки, ценные микроэлементы из морской воды, экологическая безопасность, стоимость морских энергоустановок.

---

The article reviews power plants working on the energy of the ocean, realized and currently under designing process in Russia and worldwide, including: tidal power plants, headless free-flow plants on tidal and sea streams, wave power plants, offshore wind power plants, and also combined floating ocean energy power plants for local supplement. The effective domestic technologies of floating method of building in the sea and the use of orthogonal turbines designed in Russia for tidal wave and wind power plants are considered. Full ecological safety of marine power plants has been proven during the building and by the durable period of exploitation. Also the probability of operational stability of TPP in the modern en-

ergy systems and the use of TPP discrete energy for producing the hydrogen and extraction of precious micro elements from the sea water are described.

Tidal energy, wave energy, standard marine power-houses of industrial production, floating method of building, orthogonal turbine, complex marine energy power plants, precious microelements out of sea water, ecological safety, costs of marine power plants.

В настоящее время на морских акваториях и побережьях мира осуществляется проектирование, строительство и эксплуатация напорных приливных электростанций (ПЭС), свободнопоточных приливных электростанций (СвпЭС), а также волновых (ВолнЭС) и ветровых морского базирования (МВЭС) [1]. После полувековой успешной эксплуатации пионерных приливных электростанций Ранс во Франции и Кислогубской в России, а также введенной в эксплуатацию в 2011 г. ПЭС Сихва в Республике Корея, можно утверждать, что приливные электростанции устойчиво работают в современных энергосистемах, выдавая гарантированно возобновляемую, постоянную в течение каждого месяца экологически чистую электроэнергию (табл.1).

В выявленных на сегодня в мире 123 створах (с максимальным приливом более 4 м) возможно сооружение ПЭС с общей установленной мощностью 892 ГВт (в том числе в России – 110 ГВт) с выработкой электроэнергии в 2107 ТВт·ч/год (в России – 250 ТВт·ч/год).

Разработанные и апробированные в России технологии наплавного способа строительства (без перемычек) из типовых модульных энергоблоков заводского изготовления с новыми отечественными ортогональными турбинами позволили доказать техническую и экономическую эффективность строительства крупных морских энергетических сооружений [2].

### **Кислогубская ПЭС**

Кислогубская ПЭС – пионерная в России морская энергетическая установка – была введена в эксплуатацию в 1968 г. в губе Кислой Баренцева моря [3].

Уникальность Кислогубской ПЭС не только в том, что она первая в России, но и в том, что она впервые в мировой практике гидроэнергетического строительства была сооружена наиболее эффективным для морского строительства наплавным способом, что вызвало во

всем мире настоящий бум наплавного строительства. Поразительна и долговечность (более 50 лет) тонкостенной (всего 15 см) железобетонной конструкции в условиях арктического побережья и приливного моря. Ввиду исключительности конструкции, способа сооружения и схемы эксплуатации Кислогубская ПЭС признана «Памятником науки и техники России» и ее сохранность регулируется законом РФ об охране и использовании памятников истории и культуры.

Сегодня Кислогубская ПЭС является единственной в России морской научно-производственной базой энергетической отрасли и находится на балансе ПАО «РусГидро». Исследования на ПЭС в течение 50 лет осуществляются АО «НИИЭС» с привлечением специализированных организаций для обоснования проектирования и строительства приливных, волновых, ветровых (на море) энергоустановок и других различных морских энергетических и гидротехнических сооружений. На ПЭС действуют научно-исследовательские морские и атмосферные стенды с опытными образцами, ледовый стенд, опытно-промышленные установки по защите конструкций от морской коррозии и биологического обрастания, экспериментальные новые ортогональные турбины, в бассейне и на прилегающей акватории моря осуществляются экологический и биологический мониторинг.

За полвека на Кислогубской ПЭС были выполнены масштабные работы по освоению энергии Мирового Океана и решению ряда проблемных вопросов для энергетической отрасли страны [4]. Так, оценка режимов эксплуатации Кислогубской ПЭС с 1968 г. в РУ «Колэнерго» позволили признать однобассейновую схему ПЭС двустороннего действия наиболее эффективной для современных ПЭС и определить ее оптимальные водно-энергетические режимы. Исследования колебаний уровня в море и в бассейне ПЭС позволили установить закономерности трансформации приливных колебаний у ПЭС и определить изменения (приращение) их значений для будущих ПЭС.

На основании исследования режимов заполнения бассейна ПЭС была построена модель гидролитодинамических процессов при отсечении плотиной ПЭС морских заливов. Впоследствии на основе этой модели был выбран оптимальный створ расположения плотины Мезенской ПЭС.

Таблица 1

Действующие и проектируемые ПЭС

ПЭС	Название (страна)	Мощность, МВт	Год пуска (проекта)	Макс. высота прилива, м	Способ строительства	Освоение	Тип здания ПЭС	Материал	Габаритные размеры здания ПЭС длина×ширина× высота, м (в т.ч. на 1 агр)	Глубина створа, от ТНГ, м	Объем бетона, т.м <sup>3</sup>	Расход бетона, м <sup>3</sup> /кВт,	Тип гидроагрегата, фирма (количество)/ диаметр колеса, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Ранс (Франция)	240,0	1966	13,5	в перемычках	подготовленное	без волослива	железо-бетон	32,5×53,54×25,05 (18×53,54×25,05)	12	350	1,45	капсульный «Нейрлик» (20) / 5,35
	Кислотубская (Россия)	1,7	1968	3,96	наплавной	подготовленное	совмещено с водосливом	железо-бетон	36×18,3×15,35 (36×9,1×15,35)	8,5	1,8	1,2	капсульный «Нейрлик» (1) / 3,3 ортогональный горно-защит. (1) / 2 ортогональный верхне-кальный (1) / 5
	Цянсянь (Китай)	3	1980	8,93	в перемычках	подготовленное	без волослива	железо-бетон	56,9×45×25 (7,5×45×25)	5,1	10	3,3	капсульный (5) / 2,5
	Аннаполис (Канада)	20	1984	8,7	в перемычках	подготовленное	без волослива	железо-бетон	46,5×24×30 (20×24×30)	10	21	1,05	«Страфикс» (1) / 7,6
	Маяя Мезанская (Россия)	1,5	2007	3,96	наплавной	подготовленное	без волослива	металл	33×10×15 (33×10×15)	8,5	1,02**	(0,7)	ортогональный (1) / 5
	Сихва (Южная Корея)	254,0	2010	7,8	в перемычках	подготовленное	без волослива	железо-бетон	-	20	-	-	капсульный (10) / 7,5
	Северная (Россия) (36*)	12	2012	4,2	наплавной	естественное	попуск через агрегаты	железо-бетон	120×45,4×39 (8×45,4×39)	30	91	0,75	ортогональный трех-ярусный (3) / 5
	Мезанская (Россия)	8000	2008	10,0	наплавной	естественное	попуск через агрегаты	железо-бетон	24000×45,4×39 (8×45,4×39)	30	6000	0,75	ортогональный много-ярусный (2000) / 5 ортогональный трех-ярусный / 5
	Туурская (Россия)	3200	2008	8,0	наплавной	естественное	попуск через агрегаты	железо-бетон	1000×45,4×49,8 (8×45,4×49,8)	35	3300	0,82	ортогональный трех-ярус. (1000) / 5
	Сан-Хосе (Аргентина)	4000	2008	11,0	наплавной	естественное	попуск через агрегаты	железо-бетон	-	21	-	-	капсульный (600) / 8
	Шозе (Франция)	4900	1978	14,0	наплавной	-	-	железо-бетон	-	28,7	5600	-	капсульный (192) / 8,2
	Северн (Англия)	8640	2010	8,7	наплавной	подготовлено	без волослива	железо-бетон	68 73,9 46 (4× агрегатные)				

\* - мощность при строительстве с волномами электростановками

\*\* - металл в тыс. т

Созданы долговечные морские строительные материалы для железобетонных конструкций, эксплуатируемых в сверхсуровых природных условиях Крайнего Севера на арктическом побережье при знакопеременных циклах увлажнения-осушки (до 700 циклов/год в течение каждых шести часов) и замораживания-оттаивания (до 400-500 циклов/год) до 8 месяцев в году с отрицательными температурами воздуха до  $-41^{\circ}\text{C}$ , с влажностью более 80% и океанической соленостью воды в 30-35 ‰. Практически все бетонные сооружения, эксплуатируемые в этих условиях, начинали разрушаться в зоне прилива в первый же зимний период. Тем не менее для Кислогубской ПЭС удалось создать практически водонепроницаемый бетон особо высокой морозостойкости F1000 (при максимально нормируемой F500), прочностью на 50-м году службы выше проектной более чем на 70% на всех участках конструкции, в том числе и в особо опасной зоне прилива [5].

Созданная на ПЭС катодная защита от электрохимической коррозии арматуры в бетоне и гидроэнергетического оборудования позволила сохранить ПЭС без каких-либо повреждений в течение полувека в условиях океанической среды, где естественная коррозия достигает 1мм/год [5].

Созданы необрастающие более 10 лет бетоны, в то время как лучшие марки современных необрастающих красок «работают» максимум 18 мес.

Создана экологически безопасная система защиты от биологического обрастания морских водоводов, обеспечившая практически полную защиту от обрастания водоводов ПЭС на весь срок эксплуатации, тогда как естественное обрастание водовода ПЭС без защиты достигало  $240 \text{ кг/м}^2$  биомассы [5].

Сооруженное в стройдоке Мурманска железобетонное здание ПЭС было оттранспортировано на 99 км по Баренцеву морю в створ губы Кислой и установлено на подготовленное под водой основание. Мониторинг по установленным в конструкцию 600 дистанционным датчикам позволил сделать заключение об исключительной долговечности ПЭС, т.к. она в течение полувека не имеет никаких повреждений и находится в работоспособном состоянии [6].

Все створы проектируемых в России ПЭС находятся в замерзающих морях, поэтому оценка влияния льда на работу ПЭС имеет

существенное значение. Исследования АО «НИИЭС», Института океанологии РАН, НИИ Арктики и Антарктики, НПФ «Эверест» и др. морского льда у здания Кислогубской ПЭС, а также в акваториях будущих ПЭС на Белом и Охотском морях позволили сделать вывод о возможности строительства и эксплуатации ПЭС в условиях замерзающих морей при воздействии на сооружения торосистых полей льда. Натурные испытания установили ледовые нагрузки на сооружения ПЭС и величину заглублиения водоводов для их защиты от подныривания шуги и дрейфующего льда [7].

Мониторинг на Кислогубской ПЭС с 1963 г. (в губе Кислой с 1924 г.) и на ПЭС Ранс с 1961 г. доказали безусловную экологическую безопасность строительства и эксплуатации приливных электростанций. ПЭС не загрязняют атмосферу, не затапливают земель и не угрожают волной прорыва, они безопасны на весь период своей эксплуатации. Наплавной способ строительства ПЭС позволяет также осуществлять практически весь объем строительно-монтажных работ (до 95%) в доках промышленных центров, а не на площадке строительства ПЭС, на которой нет необходимости сооружения промышленной базы и жилья для строителей, что позволяет сохранить естественную природу территории в зоне сооружения ПЭС.

Зоопланктон и рыба в полном объеме проходят через агрегаты ПЭС. Так, натурные испытания на Кислогубской ПЭС доказали, что вся рыба без повреждения проходит как через рабочее колесо капсульного гидроагрегата ПЭС при скорости его вращения в 72 об/мин., так и через ортогональную турбину при скорости ее вращения 37 об/мин и расстоянии между лопастями типового диаметра турбины 2,1 м. [8].

### **Технология строительства морских энергетических объектов**

Сооружение Кислогубской ПЭС наплавным способом дало возможность вести по всему миру строительство многих морских и даже ряда речных энергетических сооружений наплавным способом [9].

В России с применением наплавного способа проектируются будущие ПЭС: Северная на Баренцевом море, Мезенская на Белом море и Тугурская на Охотском море. На наплавных блоках

реализуется проект завода по производству сжиженного природного газа из Ямбургского месторождения.

За рубежом возведение гигаваттных ПЭС под влиянием Кислогубской ПЭС проектируется также наплавным способом. Наиболее показательной в этом плане является гигаваттная ПЭС Северн в Великобритании, строительство которой из наплавных энергоблоков рассматривается в проекте 1989 г., актуализированном в 2010 г. В США на притоках р. Миссури были сооружены две наплавные ГЭС с экономией капитальных затрат до 42%. В 2009 г. на строительстве прибрежной АЭС Кудам-Кулан наплавным способом были выполнены морские водозаборные сооружения.

В мире, в основном в США, Японии и Франции, на морских побережьях работает несколько сот ядерных реакторов АЭС. Авторский коллектив, создавший Кислогубскую ПЭС, разработал проект многократной замены реакторного блока АЭС наплавным способом, что позволяет многократно продлевать срок эксплуатации АЭС [10].

На морских побережьях в мире работают десятки ГАЭС с морскими нижними бассейнами. В России для совместной работы с Мезенской ПЭС предложен проект Морской ГАЭС на побережье полуострова Рыбачий со зданием станции из наплавных блоков.

Авторский коллектив Кислогубской ПЭС выполнил в 1976 г. уникальный проект перехода на наплавных фундаментах высоковольтной линии электропередач ВЛ-330 кВ через Каховское море-водохранилище. Это позволило сократить протяженность ЛЭП в обход водохранилища на 334 км.

Проект сооружения наплавным способом крупных (132×53×14 м) железобетонных блоков русловых водопропускных сооружений в защитной Санкт-Петербургской дамбе осуществлен в русле Финского залива также по проекту авторов Кислогубской ПЭС [11].

Морская газоконденсатная платформа «Приразломная», выполненная по наплавной технологии, летом 2011 г. была установлена на одноименном месторождении в Печорском море.

Наплавным способом осуществлен и проект типового наплавного энергоблока малой Мезенской ПЭС, который был построен в Центре атомного судостроения «ПО «Севмаш». Затем

наплавной блок был отбуксирован за 4,5 суток по Белому морю на расстояние 850 км в створ и за 6 часов установлен на свое подводное основание [12].

### **Оборудование для морских электростанций**

Задача состояла в необходимости значительного сокращения затрат на гидросиловое оборудование ПЭС, которое на низконапорных электростанциях составляет более половины стоимости объекта.

Многолетние работы в АО «НИИЭС» позволили создать для ПЭС новую, поперечно-струйную ортогональную турбину, которая по существу решает проблему широкомасштабного использования морских приливов во всем мире [13].

Преимущество ортогональных машин перед традиционными осевыми заключается, в первую очередь, в простой форме конструкции турбины. Лопasti рабочего колеса прямолинейны, постоянны в сечении и их можно нарезать из прокатного профиля, что позволяет организовать изготовление турбинных колес в необходимых для крупных ПЭС больших количествах (несколько сот единиц в год) и не на специализированных турбинных заводах, а на заводах общего машиностроения. Кроме этого турбинная камера и отсасывающие трубы ортогональных гидроагрегатов не имеют лекальных форм как на ГЭС.

За счет высокой пропускной способности ортогональной машины в холостом режиме можно значительно уменьшить количество или совсем отказаться от водопропускных отверстий гидрозла, а они, как правило, занимают обычно половину напорного бетонного фронта станции.

Ортогональный гидроагрегат работает с неизменными характеристиками, как при прямом, так и при обратном токе воды (в отлив и в прилив), не меняя направления вращения рабочего колеса. Экспериментальный ортогональный гидроагрегат, разработанный в АО «НИИЭС» с диаметром рабочего колеса 2,5 м, был установлен в 2004 г. в донном водоводе Кислогубской ПЭС. Образец серийной промышленной ортогональной турбины с типовым диаметром рабочего колеса турбины 5,0 м, предназначенный для всех будущих гигаваттных ПЭС, был изготовлен на

машиностроительном заводе «ПО «Севмаш» в 2006 г. и установлен в типовом наплавном энергоблоке малой Мезенской ПЭС, пристыкованном к турбинному водоводу Кислогубской ПЭС, где он работает до настоящего времени.

Натурные испытания ортогонального агрегата на ПЭС в 2007 г. определили его к.п.д. равным 72 %, что превосходит к.п.д. капсульных машин при двусторонней работе. Эти характеристики были достигнуты в основном за счет новых решений по геометрии турбинного тракта, в котором установлен оригинальный пристеночный направляющий поток аппарат, и усовершенствования лопастной системы рабочего колеса.

Использование ортогональных машин предложено и для рассматриваемого в настоящее время проекта мегаватной ПЭС Северн в Великобритании, что, по нашим расчетам, позволит сократить капитальные затраты на ее строительство до 20 % (табл. 2) [14].

Для волновых электростанций предлагается разработанная в АО «НИИЭС» и установленная на отечественной волновой электростанции воздушная ортогональная турбина, обладающая преимуществами по сравнению с применяемой в настоящее время на зарубежных установках турбиной Уэльса [15].

Для ветровых электростанций также предлагается разработанная в АО «НИИЭС» и прошедшая испытания на плотине малой ГЭС «Сенеж» ветровая энергоустановка с ортогональными лопастями.

### **Волновые электростанции (ВолнЭС)**

Возможные на сегодня мощности ВолнЭС изменяются от 10,0 до 70 кВт/п.м. в зависимости от используемой величины волны (1,0 ÷ 5,0 м).

Первая волновая электростанция мощностью 85,0 кВт была пущена в эксплуатацию у г. Берген в Норвегии в 1985 г. на волне величиной всего 0,75 м. с к.п.д. воздушной турбины 30%.

Затем были созданы промышленные прибрежные ВолнЭС в Португалии мощностью 400 кВт, ВолнЭС «Лимпет» в Великобритании мощностью 500 кВт, а также построена ВолнЭС на блоке мола в порту Мутрико в Испании (табл. 3).

Представляет интерес осуществленный в настоящие время проект ВолнЭС в Республике Корея у острова Чечжу в виде наплавного железобетонного блока с размерами  $37 \times 31 \times 27$  м, в котором располагаются две воздушные турбины общей мощностью 500 кВт. На подобном блоке возможно совместное размещение различных энергоустановок и их «сухое» обслуживание в период эксплуатации.

В Южной Австралии в порту Макдоннелл в 2013 г. компания «Oceanlinx» построила и ввела в эксплуатацию промышленную ВолнЭС мощностью 1,0 МВт с предполагаемым ее увеличением до 10,0 МВт. Экспериментальный блок станции установлен на естественном дне без его предварительной подготовки на глубине 15 м.

Первая российская ВолнЭС разработана АО «НИИЭС» в 2012 г. с использованием новой воздушной ортогональной турбины. В установке имеется неподвижная пневмогидравлическая камера с подвижной границей воды и воздуха внутри нее. Ветровые волны сообщаются с камерой через открытые в нижней части окна, а воздушный поток сообщается с атмосферным воздухом с помощью напорного воздуховода, в котором установлена воздушная ортогональная турбина, соединенная с генератором [15]. Номинальная мощность ВолнЭС при расчетной высоте волны 2 м с периодом 7–12 сек. составит 30 кВт.

Специфика турбины заключается в ее вращении в одну сторону независимо от направления движения воздуха по воздуховоду. Кроме этого в ней применен пристеночный аппарат, направляющий поток воздуха и позволяющий увеличить значение к.п.д. установки.

Опытный образец ВолнЭС был построен на ПО «Севмаш», смонтирован ООО «Морстройпроект» на территории Мурманского порта и в 2013 г. установлен в Баренцевом море у острова Кильдин. Промышленное применение волновых электростанций в России рассматривается и совместно с приливными электростанциями. Так, в проекте Северной ПЭС в Баренцевом море мощностью 12 МВт заложено размещение ВолнЭС на типовых глухих железобетонных блоках плотины ПЭС.

Таблица 2

**Характеристики гигаваттных Мезенской ПЭС в России и ПЭС Севери в Великобритании с применением ортогональных гидроагрегатов**

№№ п/п	Основные характеристики	Единица измерения	Мезенская ПЭС (проект обоснования инвестиций 2008 г.)	ПЭС Севери	
				Проект 1989 г. с актуализацией 2010 г.	С ортогональными гидроагрегатами (предложение АО «НИИЭС»)
1	2	3	4	5	6
1	Установленная мощность	ГВт	8,0	8,6	4,6
2	Выработка электроэнергии	ТВт·ч/год	39,4	17,0	15,7
3	Величина среднего прилива	м	5,6	8,3	8,3
4	Площадь бассейна	км <sup>2</sup>	2640,0	489,0	489,0
5	Протяженность створа	км.	87,5	15,9	15,9
6	Глубина створа	м.	10-30	20-30	20-30
7	Наплавные энергоблоки		10-агрегатные 3-ярусные	4-агрегатные	10-агрегатные 3-ярусные 2-ярусные
8	Размер энергоблоков (длина×ширина×высота)	м×м×м; шт.	198×(30-45)×(40-51); 200	68×73,9×46; 60	200×55×50 21 15
9	Водопротуская плотина	пролеты	отсутствует	166	отсутствует
10	Бетонные работы	млн. м <sup>3</sup>	6,0	5,6	~2,0
11	Подготовка основания	млн. м <sup>2</sup>	без подготовки	8,0	без подготовки
12	Выемка грунта	млн. м <sup>3</sup>	нет	80,0 (в т.ч. 32 скала)	нет
13	Насыль грунта	млн. м <sup>3</sup>	156,0	30,2	30,2
14	Гидроагрегат	шт. (ярус)	2000 (3)	216 (1)	420 (3) 300 (2)
15	Тип турбины	-	ортогональные	Капеллера	ортогональные
16	Диаметр турбины	м.	5	9	5
17	Срок строительства	год	16	15	14
18	Пуск 1-х агрегатов	год	10	14	10
19	Стоимость: - общая - удельная	млрд. руб. \$ тыс. кВт	599,0 3,2	- 3,4	- 2,7

Таблица 3

**Волновые электростанции**

№№ п/п	Страна (местоположение)	Назначение (название)	Мощность, кВт	Тип	Год пуска	Величина волны, м	КПД, %	Стоимость млн.USD	Вид установки
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Норвегия (г. Берген)	Пионерная в мире	85,0	ОВС*	1985	0,75	30,0	-	-
2	Великобритания	(Relamis P-750)	750,0	ПШС**	2004	-	-	-	-
3	Израиль	Опытная	100,0	ПШС**	-	-	-	-	-
4	Дания	Опытная	140,0+33,0 (волна+ветер)	ПШС**	-	-	-	-	-
5	США	Опытная	866,0	Волновые буи	2011	-	-	-	-
6	Португалия	(Пико)	300,0	Маятниковая система	-	-	-	-	-
7	Великобритания	Промышленная (Limpet OWS)	500,0	ОВС*	-	-	-	-	-
8	Австралия (п. Макдоннел)	Промышленная (Blue Wave)	1000,0	ОВС*	2013	-	-	8,0	На естественном дне, на глубине 15 м.
9	Испания	(Мутрико)	250,0×4	ОВС*	-	-	-	-	На молу порта
10	Ю. Корея (о-в Чечжу)	-	500,0	ОВС*	2012	-	-	-	На ж/б наплавном блоке 37×31×27 м
11	Россия (Баренцево море, о-в Кильдин)	Пионерная в России	30,0	с новой ортогональной турбиной ОАО «НИИЭС»	2013	2,0	-	-	На ж/б фундаменте на глубине 5м, на естественном дне

\* - осциллирующий водяной столб

\*\* - понтоные шарнирные системы

### **Свободнопоточные электростанции на приливных и морских течениях (СвпЭС)**

Свободнопоточные электростанции на приливных и морских течениях (СвпЭС) начали сооружать с целью получения электроэнергии без сооружения дорогостоящих плотин. Однако если на приплотинных напорных ПЭС мощность пропорциональна квадрату величины прилива, то на свободнопоточных ПЭС она зависит лишь от скорости течения, что ведет к значительному увеличению конструктивных размеров турбины. Так, если на приплотинных ПЭС при используемой величине прилива в 4–10 м. диаметр рабочего колеса турбины равен 3 – 7м, то на СвпЭС, при требуемых величинах течений в 2,5÷4,5 м, диаметр колеса турбины (или лопастей) в 3-4 раза больше и достигает 12÷22 м. Первая в мире СвпЭС «Seaflow» на течениях мощностью 300 кВт в Шотландии с 2-лопастной горизонтальной турбиной диаметром 18 м имеет к.п.д. 43 %.

В настоящее время в мире работает несколько экспериментальных СвпЭС: «SeaGen» в Северной Ирландии мощностью 1,2 МВт, установленная в заливе Лох-Стренгфорд и работающая на потоке 2,4-4,0 м/с; «HS1000», сооруженная в 2012 г. на Орклендских о-вах мощностью 10×10 МВт на постоянном потоке 3,0 м/с на глубине 50,0 м (при 3-лопастной турбине диаметром 21 м и высотой 34 м); в Индии в заливе Кач с 2011 г. создается крупная промышленная СвпПЭС на течениях мощностью 250 МВт. Во Франции в 2012 г. начала работу СвпЭС на течениях мощностью 8,0 МВт с турбиной типа «Страфло» диаметром 21,6 м. Эта турбина установлена на дне на якорях на глубине 115,0 м. В Республике Корея фирма «KORDI» сооружает СвпЭС на потоке 6,0 м/с с поперечно-струйной (геликоидной) турбиной с КПД 35%. В США в заливе Фанди в 2008 г. запустили в эксплуатацию СвпЭС на потоке с 4 геликоидными горизонтальными турбинами по 62,5 кВт каждая [16].

В России пока нет опыта создания СвпПЭС. Предполагается, учитывая сложности обслуживания оборудования ПЭС под водой, разместить СвпЭС в отдельно стоящем, типовом для расчетных глубин наплавном железобетонном блоке.

### **Ветроэнергетические электростанции морского базирования (МВЭ)**

Самой распространенной конструкцией ветровых энергетических установок, используемой во всем мире, является конструкция башенного типа с тремя вращающимися лопастями, преобразующими энергию давления ветрового потока в механическую энергию вращения ротора электрического генератора, вырабатывающего электрическую энергию. Длина одной лопасти таких установок достигает 62 м при весе 18 т, высота башни доходит до 200 м, а общая масса установки 600 т.

При вращении лопастей возникает низкочастотный шум и вибрация, что создает экологические проблемы для находящейся вблизи флоры и фауны. В этой связи ветровые электростанции целесообразно размещать в море. К тому же у поверхности воды ветер сильнее и устойчивее, а также решаются и экологические проблемы. В ряде стран вообще запрещено размещать ВЭУ на берегу, поэтому в 2009 г. норвежская компания «Статойл-Гидро» установила первую ветроэлектростанцию мощностью 2,3 МВт в открытом море в 10 км от норвежского острова Карме.

В настоящее время практически во всех развитых странах МВЭ сооружаются на прибрежном континентальном шельфе (в т.ч. и в замерзающих морях) на глубинах до 15 ÷ 73 м, на расстояниях до 50 км от берега в виде ветроферм, включающих в себя 50 и более ветроустановок. Одна из таких последних ветроферм «Бельвинд» общей мощностью 165 МВт, включающая в себя 55 установок мощностью по 3 МВт была сооружена в 2010 г. у побережья Бельгии всего за 15 мес.

Эксплуатация ветроэнергетических установок морского базирования представляет значительные трудности по обслуживанию и передаче выработанной энергии на сушу по подводному кабелю. В этой связи представляется рациональным и экономичным устанавливать ветроэнергетические установки на плотинах будущих ПЭС, где наблюдается ветер промышленного значения, а плотины ПЭС имеют значительную протяженность.

### **Солнечные энергетические установки (СЭ)**

Солнечные энергетические установки (СЭ) широко применяются в настоящее время во всем мире и не только в экваториальных широтах, но и в средних.

Интересен опыт эксплуатации солнечной энергетической установки, установленной на Кислогубской ПЭС в 2010 г. Кислогубская СЭ выдает в летние сутки 14 кВт·ч электроэнергии при среднегодовой выдаче электроэнергии в 5,0 кВт·ч/сут. В связи с этим можно сделать вывод о целесообразности размещения современных моделей СЭ в условиях арктического побережья России. Так, например, при установке СЭ на плотине Мезенской ПЭС, протяженностью 83 км, можно будет в год получать дополнительно 151 млн кВт·ч электроэнергии.

Представляют большой интерес разработки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН по созданию новых солнечных энергоустановок на основе наногетероструктурных концентраторных фотоэлектрических модулей с линзами Френеля и каскадными солнечными элементами с КПД 40 %.

### **Комплексная морская наплавная автономная электростанция (КМЭ)**

Комплексная морская наплавная автономная электростанция (КМЭ) используется для энергетического снабжения транспортно недоступных по суше отдаленных населенных пунктов Арктического и Дальневосточного побережий.

Работы по созданию комплексных электростанций крайне необходимы в настоящее время для начинающегося широкомасштабного освоения районов Крайнего Севера, Арктического шельфа и Северного морского пути.

Идея комбинирования энергоустановок морского базирования была предложена в 2013 г. «НПО Гидроэнергоспецстрой» и ФГУП «Крыловский государственный научный центр», которые предложили схему гидроэнергетического комплекса, предназначенного для защиты побережья от волн с одновременной выработкой электроэнергии на ветровых и солнечных энергоустановках [17].

Представляется, что совмещение энергоустановок различного назначения наиболее целесообразно на наплавном железобе-

тонном блоке, для чего потребуется выбор определенного участка дна для возможности установки блока как можно ближе к берегу и на естественном основании с исключением водолазных работ. Применение наплавного блока для размещения на нем комбинированной электростанции позволит выполнить ее в полной комплектации в стационарном доке в условиях промышленного центра с доставкой на плавучесть к месту работы, установкой на естественное основание и обслуживанием по схеме эксплуатации нефтегазодобывающих платформ в открытом море [18].

### **ПЭС – источник энергии, запасаемой в водороде**

Исключительно важным является в настоящее время использование ПЭС как источника энергии, запасаемой в водороде, что также позволит использовать энергию ПЭС в энергосистемах без сооружения дополнительных ГАЭС.

Таковыми потребителями-регуляторами, способными работать в дискретном или комбинированном режимах, могут быть весьма энергоемкие и малоинерционные процессы электролиза воды с целью получения водорода. Создание этого производства вызвано необходимостью расширения сырьевой базы промышленности, экономии дефицитного углеродного топлива и создания систем аккумуляции и передачи на расстояние произведенной энергии.

АО «НИИЭС» и РНЦ «Курчатовский институт» разработали экспериментальный технологический комплекс для размещения его на Кислогубской ПЭС с целью отработки совокупности и взаимосвязей технологических вопросов производства на основе энергоисточника (ПЭС) непостоянного действия: хранения, транспортировки и применения экологически чистого энергоносителя – водорода – в структуре децентрализованного (локального, регионального) энергообеспечения [19].

Наиболее убедительным завершением технологического цикла в эксперименте представляется создание примера практической реализации локального децентрализованного энергообеспечения на изолированной территории. Потребление водорода может быть организовано, например, в системе децентрализованного энергообеспечения населенного пункта или малого производства с использованием топливных элементов.

### **Извлечение на ПЭС из морской воды ценных микроэлементов**

Мировой Океан содержит  $5 \cdot 10^{16}$  тонн минералов в растворенном виде и является главным возобновляемым источником минерального сырья для человечества.

Исследования по совместной работе ПЭС с извлечением из морской воды ценных микроэлементов были проведены на Кислогубской ПЭС институтом «Гидропроект» совместно с институтом Геохимии и Аналитической химии им. В.И. Вернадского и институтом химии Дальневосточного Научного Центра РАН. Использование ПЭС для извлечения ценных микроэлементов определяется тем, что ПЭС являются источником практически бесплатного потока морской воды, что позволяет получать на ПЭС из океана дефицитные на сегодня металлы.

Принцип совместной работы ПЭС с извлечением микроэлементов заключается в помещении на выходе из водовода ПЭС сорбционной установки с селективными сорбентами, которые химически поглощают металлы, растворенные в морской воде.

Созданная на Кислогубской ПЭС опытная сорбционная установка была совмещена с заградительной решеткой здания ПЭС, а проведенные на ней работы позволили получить опытные порции урана и золота, а также выявить оптимальные составы сорбентов и установить потери электроэнергии при совместной работе ПЭС с извлечением микроэлементов [20].

Промышленные установки по получению дефицитных металлов целесообразно включать в проекты будущих ПЭС, что позволит значительно увеличить экономическую эффективность ПЭС.

### **Стоимость морской энергетики**

На пионерной в России Кислогубской ПЭС итоговая стоимость строймонтажных работ и оборудования к 1968 г. составила 5,7 млн. руб. При стоимости доллара США в этом году 0,62 руб. удельная стоимость 1кВт ПЭС оказалось равной \$22,98 тыс./кВт. Такая высокая стоимость Кислогубской ПЭС по сравнению с ГЭС объясняется тем, что на первой в России ПЭС была использована лишь половина возможной энергоемкости бассейна и к тому же для станции был приобретен в единичном экземпляре

дорогостоящий французский гидроагрегат. И тем не менее проектная стоимость ПЭС, благодаря применению наплавного способа строительства, была сокращена на 33 %.

Однако стоимость строительства типового наплавного энергоблока малой Мезенской ПЭС в 2006 г. при стоимости доллара США в 26,7 руб. составила уже \$9,96 тыс./кВт. И эту, тоже завышенную, стоимость ПЭС можно объяснить тем, что ее энергоблок изготавливался в Центре атомного судостроения из дорогостоящего металла, предназначенного для специализированных изделий. Кроме этого лопасти нового ортогонального гидроагрегата изготавливались вручную на специализированном станке, а не прокатным способом, как предусматривается для типовых ПЭС.

Стоимость Северной ПЭС в проекте 2011 г. (с учетом предполагаемой установки на ПЭС волновых установок) удалось снизить до \$7,25 тыс. /кВт.

Стоимость Мезенской ПЭС по незавершенному в полном объеме из-за начавшегося кризиса 2008 г. разделу проекта «Обоснование инвестиций» составила по ПЭС, замещающей ГАЭС и ЛЭП в центре европейской части страны 1042,0 млрд. руб., в том числе собственно по ПЭС – 599,0 млрд. руб. с удельной стоимостью \$2,35 тыс./кВт.

В 2011 г. была пущена в эксплуатацию промышленная ПЭС Сихва в Республике Корея мощностью 252 МВт. Ее строительство обошлось в 250 млн. дол. США с удельной стоимостью \$2,5 тыс. /кВт.

В 2010 г. стоимость актуализированного проекта 1989 г. ПЭС Северн в Англии мощностью 8,66 ГВт и с годовой выработкой 17 ТВт·ч. с использованием наплавных блоков была оценена по удельной стоимости в \$3,40 тыс./кВт. Но при применении на ПЭС Северн предлагаемых АО «НИИЭС» новых российских ортогональных гидроагрегатов удельная стоимость этой ПЭС может составить \$2,70 тыс./кВт.

В 2008 г. АО «НИИЭС» в технических предложениях, выполненных по заказу аргентинской фирмы «AUSRAL CONSTRUCCIONESSA» по сооружению ПЭС Сан-Хосе на полуострове Вальде в Аргентине мощностью 4,0 ГВт оценил ее удельную стоимость в \$2,08тыс./кВт.

Показательно, что стоимость электроэнергии на первой в мире промышленной ПЭС Ранс во Франции (введена в эксплуатацию в 1966 г.) в настоящее время дешевле, чем стоимость электроэнергии во французской энергосистеме ЭДС на всех других типах электростанций: ГЭС, ТЭС и АЭС. ПЭС Ранс полностью автоматизирована и управляется из Парижа, что объясняется возможностями точного прогнозирования мощности и выработки ПЭС в каждый момент времени на весь ее срок службы в отличие от ГЭС.

По оценке Международного энергетического агентства (IEA) в 2012 г. капитальные вложения на 1кВт мощности в строительство ПЭС на 2020 г. оцениваются в \$2,2 тыс./кВт, а на традиционную гидроэнергетику в \$2,2-2,5 тыс./кВт.

Вышеприведенные оценки показывают, что апробированные на Кислогубской ПЭС в течение полувека технологии наплавного способа строительства и использования нового ортогонального гидроагрегата позволили кардинально снизить стоимость сооружения ПЭС и конкурировать с сооружением ГЭС.

Удельная стоимость современной волновой электростанции с промышленной мощностью 1,0 МВт в австралийском порту Макдонелл составила \$8,0 тыс./кВт.

Удельная стоимость пионерной свободнопоточной энергоустановки на течениях «Seaflo» мощностью 300 кВт в 2013 г. составила \$18,0 тыс./кВт, а на промышленной ЭС на течениях «АК1000» на Оркнейских островах \$25,0 тыс./кВт.

Капитальные вложения в ветровые электростанции морского базирования по данным IEA планируются на 2020г. в \$1.5÷2,5 тыс./кВт (при стоимости наземной ветровой электростанции в \$0,9-1,1кВт).

### **Выводы:**

1. Мировой энергопотенциал напорной приливной энергии оценивается в 892 ГВт с годовой выработкой 2107 ТВт электроэнергии на электростанциях, предлагаемых для сооружения в 123 створах мирового побережья, где наблюдается максимальный прилив 4 м и более (в России соответственно 110 ГВт и 250 ТВт). Энергетические мощности современных волновых электростанций оцениваются от 10 до 70 кВт

- на 1 п. метр морского побережья в зависимости от величины волны в пределах от 1,0 до 5,0 м. Современные ветровые электроустановки морского базирования, размещаемые в виде ветроферм, достигают единичной мощности в 5,0 МВт.
2. Пионерная в России приливная электростанция – Кислогубская ПЭС – признана одним из выдающихся сооружений XX века, единственным в мире долговечным бетонным сооружением в районах Арктики, зарегистрирована в России как «Памятник науки и техники» и является единственной в России морской научной базой, на которой происходит обоснование всех видов морской энергетики.
  3. На Кислогубской ПЭС впервые в мировой практике гидроэнергетического строительства применена наиболее эффективная в наше время для строительства в условиях моря наплавная технология, принятая сейчас в мире практически для всех проектов морских сооружений. Наплавная технология сокращает время строительства объектов практически вдвое и уменьшает капитальные затраты на 33-42%.
  4. Созданные для Кислогубской ПЭС современные морские строительные материалы и технологии их защиты от коррозии океанической среды и биологического обрастания обеспечивают уникальную долговечность наплавных конструкций топливно-энергетических сооружений на Арктическом и Дальневосточном шельфе без каких-либо ремонтов на весь срок эксплуатации (более 50 лет).
  5. Новая ортогональная турбина, созданная в АО «НИИЭС» и апробированная на Кислогубской ПЭС, наиболее эффективна для применения ее на современных приливных, волновых и ветровых (морского базирования) электростанциях и превосходит классические для ПЭС капсульные машины по энергетике, экологии и экономике. Производство ортогональных турбин технологически исключительно простое (лопасти изготавливаются прокатом) и возможно не на специализированных турбостроительных предприятиях, а на любом механическом заводе большими сериями. В настоящее время производство ортогональных машин освоено на Северном машиностроительном производственном объединении «Севмаш».

6. Мировой Океан содержит  $5 \cdot 10^{16}$  т минералов в растворенном виде и является главным возобновляемым источником минерального сырья для человечества. Созданная на Кислогубской ПЭС опытная сорбционная установка для извлечения из морской воды ценных микроэлементов была совмещена с заградительной решеткой здания ПЭС, а проведенные на ней работы позволили получить опытные порции урана и золота, а также выявить оптимальные составы сорбентов.
7. В настоящее время исключительно актуальным является создание комплексной морской электростанции, совмещающей свободнопоточные (на приливной волне), волновые, ветровые и солнечные энергоустановки, размещаемые на локальном наплавном железобетонном блоке, изготавливаемом в существующих доках промышленных центров, доставляемом на плаву к месту службы и устанавливаемом на естественном основании для обеспечения локального энергоснабжения различных объектов Арктического шельфа и Северного морского пути. Работы по созданию комплексной электростанции возможно осуществить на морской научной базе Кислогубской ПЭС.
8. Оценки стоимости современных морских энергоустановок показывают, что апробированные на Кислогубской ПЭС технологии наплавного способа строительства и применение новой ортогональной турбины позволяют кардинально снизить капитальные затраты на строительство объектов морской энергетики и конкурировать им с возведением речных сооружений.

### Литература

1. *Усачев И.Н.* О развитии в России возобновляемой и экологически чистой энергии Мирового Океана // «Энергетика» №2, 2014 г.
2. *Бернштейн Л.Б., Гельфер С.Л., Усачев И.Н. и др.* Приливные электростанции // Гидропроект, М. 1994 г., (на русском языке); Сеул, Корея, KORDI, 1996г. (на английском языке); Ханчжоу, Китай, ROAD-MAHGYOO, 1996г. (на китайском языке).
3. *Бернштейн Л.Б., Гаврилов В.Г., Усачев И.Н. и др.* Кислогубская ПЭС// «Энергия», М., 1972 г.
4. *Усачев И.Н.* Значение Кислогубской ПЭС для российской гидроэнергетики (к 45-летию Кислогубской приливной электростанции) // «Гидротехника» №2, 2014 г.

5. *Розенталь Н.К., Усачев И.Н. Галаилов А.В.* Долговечность железобетонных конструкций Кислогубской ПЭС в Арктике // «Технологии бетонов» №1, 2014 г.
6. *Усачев И.Н., Историк Б.Л., Шполянский Ю.Б.* Мониторинг морской энергетической установки на Арктическом побережье и перспективы крупномасштабного использования приливной энергии // «Гидротехническое строительство» №7, 2004 г.
7. *Усачев И.Н., Данилов А.И., Моносов Л.М. и др.* Обеспечение надежной службы энергетических сооружений России в тяжелых ледовых условиях // «Hydropower and Dams», Marine Energy Supplement, 2009 г.
8. *Усачев И.Н.* Гидробиологический мониторинг выживаемости рыбного стада и планктона на низконапорных ГЭС и ПЭС // «Безопасность энергетических сооружений» Сб. ОАО «НИИЭС», Вып. 12, 2003 г.
9. *Усачев И.Н., Воробьев И.Н.* Современные наплавные энергетические сооружения России // «Гидротехническое строительство» №7, 2003г.
10. *Велихов Е.П., Галустов К.З., Усачев И.Н. и др.* Способ возведения крупномасштабного сооружения в прибрежной зоне водоема и комплекс для осуществления способа (продление срока службы прибрежных АЭС) // Патент РФ №21955531, БИ №36, 2002 г.
11. *Михайлов Л.П., Бернштейн Л.Б., Усачев И.Н. и др.* Наплавные конструкции комплекса защиты Ленинграда от наводнения (проект и осуществление) // «Энергетическое строительство» №11, 1985 г.
12. *Усачев И.Н., Шполянский Ю.Б., Историк Б.Л. и др.* Сооружение типового наплавного энергоблока для ПЭС // «Гидротехническое строительство» № 9, 2004 г.
13. *Историк Б.Л., Шполянский Ю.Б., Усачев И.Н.* Новый ортогональный гидроагрегат для ПЭС // «Гидротехническое строительство» №4, 2007г.
14. *Шполянский Ю.Б.* О сооружении приливных электростанций гигаваттного класса с ортогональными турбинами на примерах проектов Мезенской ПЭС в России и ПЭС Северн в Великобритании. // «Гидротехническое строительство» № 11, 2013 г.
15. *Шполянский Ю.Б., Историк Б.Л., Усачев И.Н.* Развитие в России приливной и волновой энергетики на основе наплавного способа строительства и применения новой ортогональной турбины. // «Энергетический вестник» № 18, 2014 г.
16. *Башкин Н.В., Усачев И.Н.,* Свободнопоточные энергоустановки // «Малая энергетика» № 1-2, 2013 г.
17. *Ершов В.И.* Строительство морских ветроферм в Европе // «Гидротехника» № 2, 2013 г.
18. *Усачев И.Н., Историк Б.Л., Золотов А.Л.* Об использовании энергии моря для автономного энергоснабжения // «Новое в российской электроэнергетике» сентябрь, 2014 г.
19. *Усачев И.Н., Шполянский Ю.Б., Историк Б.Л., Кузнецов В.П., Фадеев В.Н., Князев В.А.* Приливная электростанция (ПЭС) источник энергии, запасаемый в водороеде // «Малая энергетика» №1-2, 2008 г.
20. *Усачев И.Н.* Исследования по совместной работе приливной электростанции с извлечением из морской воды ценных макроэлементов. // ГРП Гидропроекта на Кислогубской ПЭС, п. Мурмаши. (архив РУ «Колэнерго»). 1977 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Бельшиев В.С.</i> Об уточнении понятий «безопасность» и «надёжность» гидротехнических сооружений в системе нормативного обеспечения функционирования ГЭС .....	3
<i>Коновалов И.К.</i> О повышении метрологической надёжности дистанционной закладной КИА .....	16
<i>Воронин С. Г., Евдокимова И. В., Хрипакова Ю. В., Шевкин А. Л.</i> Разработка и испытание технологии восстановления чувствительности закладных напорных пьезометров непрямолинейной формы в ответственных зонах ГТС .....	25
<i>Хрипакова Ю.В., Евдокимова И.В.</i> Краткий обзор методов разборки бетона при реконструкции энергетических сооружений ..	41
<i>Владимирский В.М., Дмитриев С.Г., Красильников А.М., Минаков В.А., Козлов Д.Д., Карпинский А.В., Назмеев А.Р.</i> Основные результаты натурных энергетических испытаний гидроагрегатов, выполненных АО «НИИЭС» с 2005 по 2015 гг. ...	55
<i>Куприянов В.П.</i> Применение теории принятия решений для выбора варианта реконструкции водосбросной плотины Зейской ГЭС .....	73
<i>Новикова И.С., Максимович В.А., Федорков А.М., Шакиров Р.Р.</i> Гидравлические исследования эксплуатационного водосбросного туннеля ЭВТ-3 Рогунской ГЭС с гашением энергии в закрученном потоке на отводящем тракте .....	93
<i>Историк Б.Л., Соболев В.Ю., Городничев Р.М., Золотов А.Л., Крылов А.П.</i> Натурные испытания мини-ГЭС блочного исполнения в створе Хоробровского гидроузла (Этап 1) .....	106
<i>Усачев И.Н.</i> Морская энергетика. Современное состояние и перспективы .....	122