

## Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-63-72>

УДК 627.8: 69.059: 624(075.8)

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОДОПРОЯВЛЕНИЯ В ЗОНЕ КОНСТРУКЦИЙ ШАХТ ТУРБИН РЫБИНСКОЙ И УГЛИЧСКОЙ ГЭС****О.Д. Рубин<sup>1,2✉</sup>, Ю.А. Ильин<sup>3</sup>, А.Л. Шевкин<sup>3</sup>, И.В. Евдокимова<sup>3</sup>**<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия<sup>2</sup> АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт Гидропроект им. С.Я. Жука»; 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 2, Россия<sup>3</sup> Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт Гидропроект им. С.Я. Жука» – «НИИ энергетических сооружений»; 125362, г. Москва, Строительный проезд, 7А, Россия

**Аннотация.** На внутренних конструкциях гидротехнических сооружений ряда ГЭС отмечается водопроявление, то есть появление следов влаги вне пределов водопропускного тракта, что может привести к изменению эксплуатационного состояния конструкции или повреждению дорогостоящего оборудования. При этом процессы, вызывающие подобное проявление, крайне разнообразны. Образование очагов фильтрации может быть обусловлено: постепенным изменением состояния блочных швов; деградацией цементного камня вследствие коррозии или под воздействием нагрузок, превышающих проектные; повышением фильтрационных расходов; особенностями возведения сооружений. В качестве примера сооружений, для которых характерно водопроявление, необходимо привести Рыбинскую и Угличскую ГЭС, для которых в течение всего периода эксплуатации наблюдается наличие водопроявления вблизи шахт турбин гидроагрегатов и на поверхностях стаканов спиральных камер. В 2019-2021 гг. с целью установления причин данных явлений специалистами филиала АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС» проведено обследование бетонных конструкций Угличской и Рыбинской ГЭС, в ходе которого установлено, что основные причины появления воды на рассматриваемых участках для каждой станции во многом схожи, но не являются идентичными.

**Ключевые слова:** водопроявление, очаги фильтрации, обследование бетонных конструкций, состояние блочных швов, деградация цементного камня, Рыбинская и Угличская ГЭС

**Формат цитирования:** Рубин О.Д., Ильин Ю.А., Шевкин А.Л., Евдокимова И.В. Анализ результатов исследований водопроявления в зоне конструкций шахт турбин Рыбинской и Угличской ГЭС // Природообустройство. 2025. № 1. С. 63-72. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-63-72>

Scientific article

**ANALYSIS OF THE RESULTS OF STUDIES OF WATER MANIFESTATION IN THE ZONE OF TURBINE SHAFT STRUCTURES OF THE RYBINSK AND UGLICH HPPS****O.D. Rubin<sup>1,2✉</sup>, Yu.A. Ilyin<sup>3</sup>, A.L. Shevkin<sup>3</sup>, I.V. Evdokimova<sup>3</sup>**<sup>1</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering; 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russia<sup>2</sup>Design, Survey and Research Institute Hydroproject named after S.Y. Zhuk; 125080, Moscow, Volokolamskoe shosse, 2, Russia<sup>3</sup>Branch of JSC "Design, Survey and Research Institute Hydroproject named after S.Y. Zhuk" – "Research Institute of Power Structures"; 125362, Moscow, Stroitelny proezd, 7A, Russia

**Abstract.** On the internal structures of hydraulic structures of a number of HPPs, water manifestations are noted, that is, the appearance of traces of moisture outside the culvert, which can lead to a change in the operational condition of the structure or damage to expensive equipment. At the same time, the processes that cause such manifestations are extremely diverse. The formation of filtration foci can be due to a gradual change in the condition of block joints; degradation of cement stone due to corrosion or

under the influence of loads exceeding the design ones; increase in filtration costs, as well as the features of the construction of structures. As an example of structures that are characterized by water manifestation, it is necessary to cite the Rybinsk and Uglich hydroelectric power plants, for which during the entire period of operation there is a water manifestation near the turbine shafts of hydroelectric units and on the surfaces of the barrels of spiral chambers. In 2019-2021, in order to establish the causes of these phenomena, specialists of the branch of JSC Institute Hydroproject-NIIES conducted a survey of the concrete structures of the Uglich and Rybinsk hydroelectric power plants, during which it was found that the main causes of water in the areas under consideration for each station are largely similar, but not identical.

**Keywords:** water inflows, filtration foci, inspection of concrete structures, condition of block joints, degradation of cement stone, Rybinsk and Uglich HPPs

**Format of citation:** Rubin O.D., Plyin Yu.A., Shevkin A.L., Evdokomova I.V. Analysis of the results of studies of water manifestation in the zone of turbine shaft structures of the Rybinsk and Uglich HPPs // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. № 1. P. 63-72. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-63-72>

**Введение.** С целью обеспечения долгосрочной эксплуатации появление следов влаги на внутренних конструкциях гидротехнических сооружений за пределами водопропускных трактов требует контроля. Процессы, вызывающие подобное проявление, крайне разнообразны: образование очагов фильтрации может свидетельствовать: о строительных неточностях при монтаже гидроизоляционных шпонок в блочных швах; о постепенном изменении состояния самих блочных швов; о деградации цементного камня вследствие коррозии или под воздействием нагрузок, превышающих проектные; о повышении фильтрационных расходов, а также о возникновении состояний, постепенное развитие которых может привести к изменению эксплуатационного состояния конструкции или повреждению дорогостоящего оборудования. Вместе с тем в некоторых случаях присутствие влаги во внутренних помещениях гидроэлектростанций обусловливается особенностями их возведения (1935-1950 гг.): при необходимости проведения строительных работ в сжатые сроки в условиях нехватки цемента и недоступности качественного инертного заполнителя неизбежно принимались некоторые допущения, сделавшие наличие фильтрационных проявлений неизбежным, однако одновременно в период строительства разрабатывались меры, минимизировавшие воздействие таких проявлений на окружающие конструкции. Проведение мероприятий по снижению объема водопроявления для подобных участков зачастую было нерациональным ввиду высокой стоимости работ и их потенциальной невысокой эффективности, поскольку за подавлением фильтрации в определенной зоне можно ожидать ее появления в зоне, сопряженной с рассматриваемой. В качестве примера сооружений, при возведении которых были приняты подобного рода допущения, необходимо привести Рыбинскую и Угличскую ГЭС, для которых

в течение всего периода эксплуатации наблюдается наличие водопроявления вблизи шахт турбин гидроагрегатов и на поверхностях стаканов спиральных камер. Для Рыбинской ГЭС скопление воды вокруг шахт турбин на отметке 92,50 м наблюдается преимущественно в холодное время года, для Угличской ГЭС на отметке 107,80 м – в холодное время года и при высоких уровнях воды в верхнем бьефе. В 2019-2021 гг. с целью установления причин данных явлений специалистами филиала АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС» проведено обследование бетонных конструкций Угличской и Рыбинской ГЭС, в ходе которого установлено, что основные причины появления воды на рассматриваемых участках для каждой станции во многом схожи, но не являются идентичными. При этом был использован опыт проведения обследования бетонных и железобетонных конструкций ГЭС/ГАЭС [1-6].

**Материалы и методы исследований.** *Особенности конструкций шахт турбин ГЭС.* Поскольку в случае и Угличской, и Рыбинской ГЭС наблюдающиеся процессы водопроявления в зоне шахт турбин неразрывно связаны с особенностями существовавшей сырьевой базы, начать обсуждение причин их возникновения следует с краткого обсуждения материалов, применявшихся при проведении бетонных работ. При возведении обеих станций применялись портландцементы и пуццолановые портландцементы различных заводов. В бетон подводных частей плотины и здания ГЭС при замесах вводили мокрым путем трепел активностью 180-250 мг/г СаО в количестве не менее 20% от массы цемента. Во всех составах бетона применялся речной песок с модулем крупности 1,9-2,85. В качестве крупного заполнителя применялся в основном аллювиальный гравий фр. 5-40 и 5-120. Водоцементное отношение для всех типовых составов было не ниже 0,45. Укладка бетона в блоки бетонируемые производилась с использованием

ручного уплотнения виброиглами и виброулава-ми. В основном используемыми марками бетона были марки М110, М130 и М170, марка бетона плит оболочек – М250 [7].

Введение в состав бетонной смеси дополнительного количества гидравлически активной добавки – трепела – позволило снизить стоимость строительства, добиться значительного снижения термических напряжений, неизбежных в массивных блоках (однако не подавить их полностью), и в итоге получить материал, в значительной степени устойчивый к коррозии выщелачивания и сульфатной коррозии. При этом, однако, при производстве бетонных работ подобного вида бетонная смесь не отличалась удобоукладываемостью: мелкие частицы трепела способны оттягивать на себя часть воды затворения, образуя на поверхности гидратные оболочки, что приводит к значительному снижению осадки нормального конуса.

Как указано, водоцементные отношения для всех типовых составов были выше 0,45 (при этом реальные значения В/Ц при укладке материала на месте проведения работ наверняка были выше ввиду сложности укладки жесткой смеси с применением ручного виброинструмента). В свою очередь, это не могло не привести к возникновению в теле затвердевшего камня развитой системы капиллярных пор – образование сети капилляров всегда происходит на начальном этапе формирования цементного камня, но со временем, по мере перехода коагуляционной структуры цементного камня в кристаллизационную, капиллярная сеть распадается на отдельные сегменты, однако при высоких водоцементных отношениях этого может не произойти. Также следует отметить более низкую скорость достижения проектной марки бетоном на пуццолановом портландцементе, его повышенную ползучесть и склонность к значительным деформациям усадки-набухания при смене циклов сушки-увлажнения [8, 9].

На момент возведения как Угличской, так и Рыбинской ГЭС подобные особенности твердения пуццолановых цементов уже были хорошо известны, что привело, с одной стороны, к широкому использованию изготавливаемых на заводе плит оболочек, а с другой стороны – включению в схему обоих зданий конструкций и элементов, призванных сделать неизбежные фильтрационные проявления со стороны водопропускного тракта менее заметными и гарантировать безопасную эксплуатацию. В случае и Угличской, и Рыбинской ГЭС мероприятия по исключению фильтрации воды со стороны водопропускного

тракта во внутренние помещения включали в себя создание дренажных слоев в перекрытиях спиральных камер и устройство диафрагм в массиве бетона шахт турбин. Схема устройства противофильтрационных элементов Угличской ГЭС приведена на рисунке 1 (а, б), Рыбинской ГЭС – на рисунке 2 (а, б).

На Угличской ГЭС для сбора профильтрованной воды по верху монолитной плиты перекрытия устроена стяжка из тощего бетона прочностью 30 кгс/см<sup>2</sup>, поверх которой устроена песчаная отсыпка. Поверх песчаной отсыпки уложен слой цементной бумаги, затем – стяжка из бетона прочностью 90 кгс/см<sup>2</sup>. Стяжка из тощего бетона имеет уклон к водосточным канавкам, дренирующимся со стороны верхнего бьефа в смотровой колодец, расположенный в отдельном бычке между двумя агрегатами, со стороны нижнего бьефа – через трубы диаметром 107 мм (5 дюймов), выходящие на внешнюю сторону стакана спиральной камеры и выпущенные в дренаж перекрытия на отметке 96,00 м (по проекту, на сегодняшний день данные элементы отсутствуют и разгрузка перекрытия происходит непосредственно на внешние конструкции стакана спиральной камеры). Стенки уложенных в перекрытие каналов выполнены из бетона М110, в стенках каналов, пересекающих путь дренажей, предусмотрены отверстия. Для предотвращения поднятия капиллярной влаги из перекрытия в конструкции шахты турбины устроен строительный шов, плоские части которого прикрыты битумной мембраной толщиной 2 см, а наклонная мембрана пропитана битумной краской.

Конструкция дренажа в перекрытии спиральной камеры Рыбинской ГЭС несколько иная: по верху монолитной плиты перекрытия устроена стяжка из тощего бетона, поверх которой устроены призмы гравийного дренажа. Поверх призм дренажа нанесены слой бетонной подготовки и напольное покрытие. Стяжка имеет уклон к водосточным канавкам, дренирующимся со стороны верхнего бьефа в смотровой колодец, расположенный в отдельном бычке между двумя агрегатами в секции, со стороны нижнего бьефа – через выпуски на внешнюю сторону стаканов спиральных камер на отметке 82,0 м. Отвод воды также возможен через слой крупного песка в осадочный шов. Уложенные в перекрытие кабельные каналы изолированы от бетона слоем асфальтовой облицовки толщиной 1 см. Для предотвращения поднятия капиллярной влаги из перекрытия в конструкции шахты турбины предусмотрена битумная мембрана (рис. 1). Для стока конденсата, образующегося вблизи

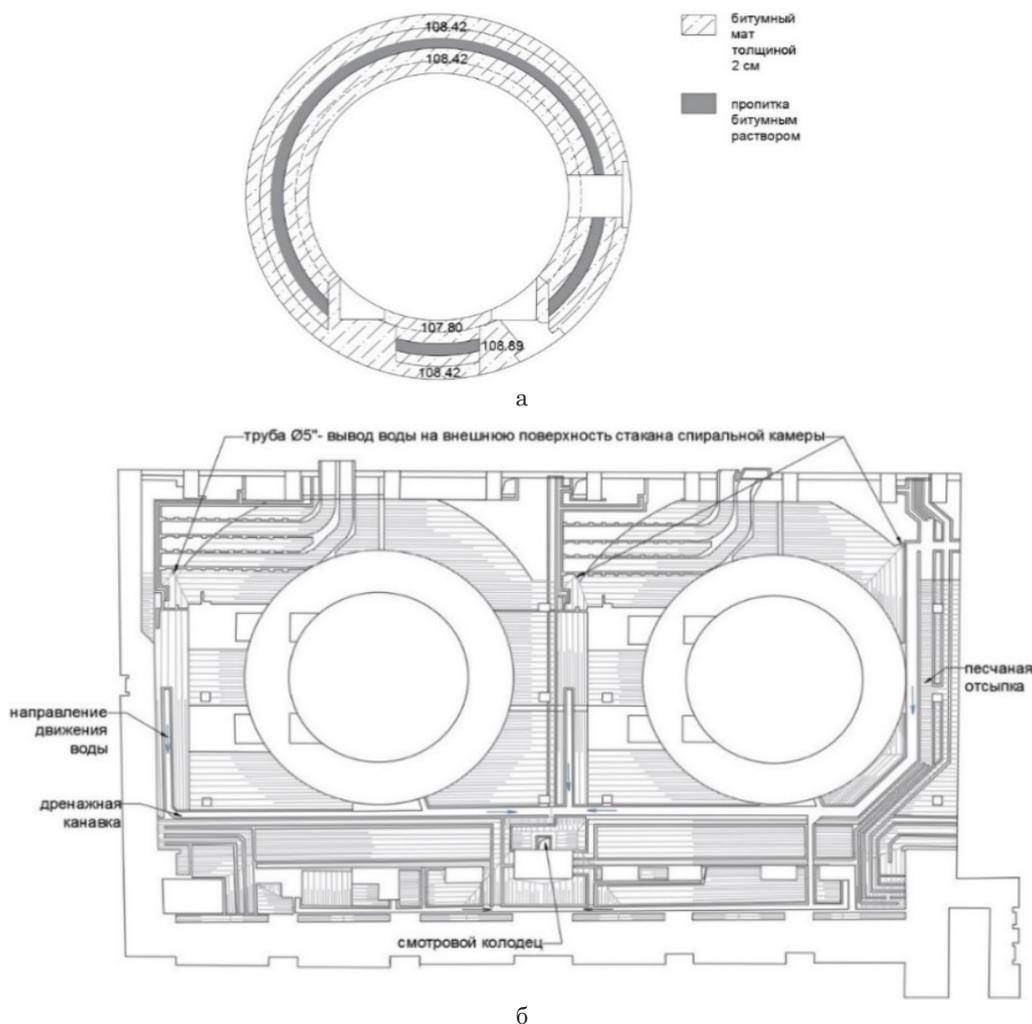


Рис. 1. Система противофильтрационных элементов на Угличской ГЭС:

- а) противофильтрационная мембрана шахты турбины;  
 б) устройство дренажа в перекрытии на отметке 92,50 м

Fig. 1. A system of impervious elements at the Uglich HPP:

- a) impervious membrane of the turbine shaft, b) drainage device in the ceiling at an elevation of 92.50 m

опорных колонн статора в стены шахты турбины, встроены дренажные трубки, выведенные в перекрытие на отметке 92,5 м.

Таким образом, на этапе анализа данных проектной и исполнительной документации становится понятно, что появление воды вокруг шахт турбин и Рыбинской, и Угличской ГЭС вполне может быть прямым следствием решений, принятых при возведении станций. Однако при этом не следует упускать из внимания то, что за годы эксплуатации могла произойти деградация цементного камня под действием динамической нагрузки от работающих гидроагрегатов, постепенного разрушения конструкций вследствие некачественной укладки отдельных блоков при возведении либо коррозии. С целью исключения возможности протекания данных процессов был проведен визуальный осмотр строительных конструкций, а также осуществлены

мероприятия инструментального контроля, включавшие в себя отбор кернов из бетона спиральных камер, основного бетона и штрабного бетона омоноличивания шахт турбин Рыбинской ГЭС, основного бетона и бетона омоноличивания шахт турбин Угличской ГЭС.

**Результаты и их обсуждение.** Анализ данных выполненных исследований строительных конструкций. При проведении осмотра бетонных конструкций спиральных камер Рыбинской ГЭС на отметке 82,00 м в декабре 2019 г. установлено, что наблюдаемые на этой отметке водопроявления связаны с разгрузкой дренажа перекрытия на отметке 92,50 м. Согласно рисунку 2.б вода на этой отметке должна была отводиться на внешнюю сторону спиральных камер через специально организованные дренажные выпуски. Однако это происходит лишь отчасти: по всей видимости, по причине спешки

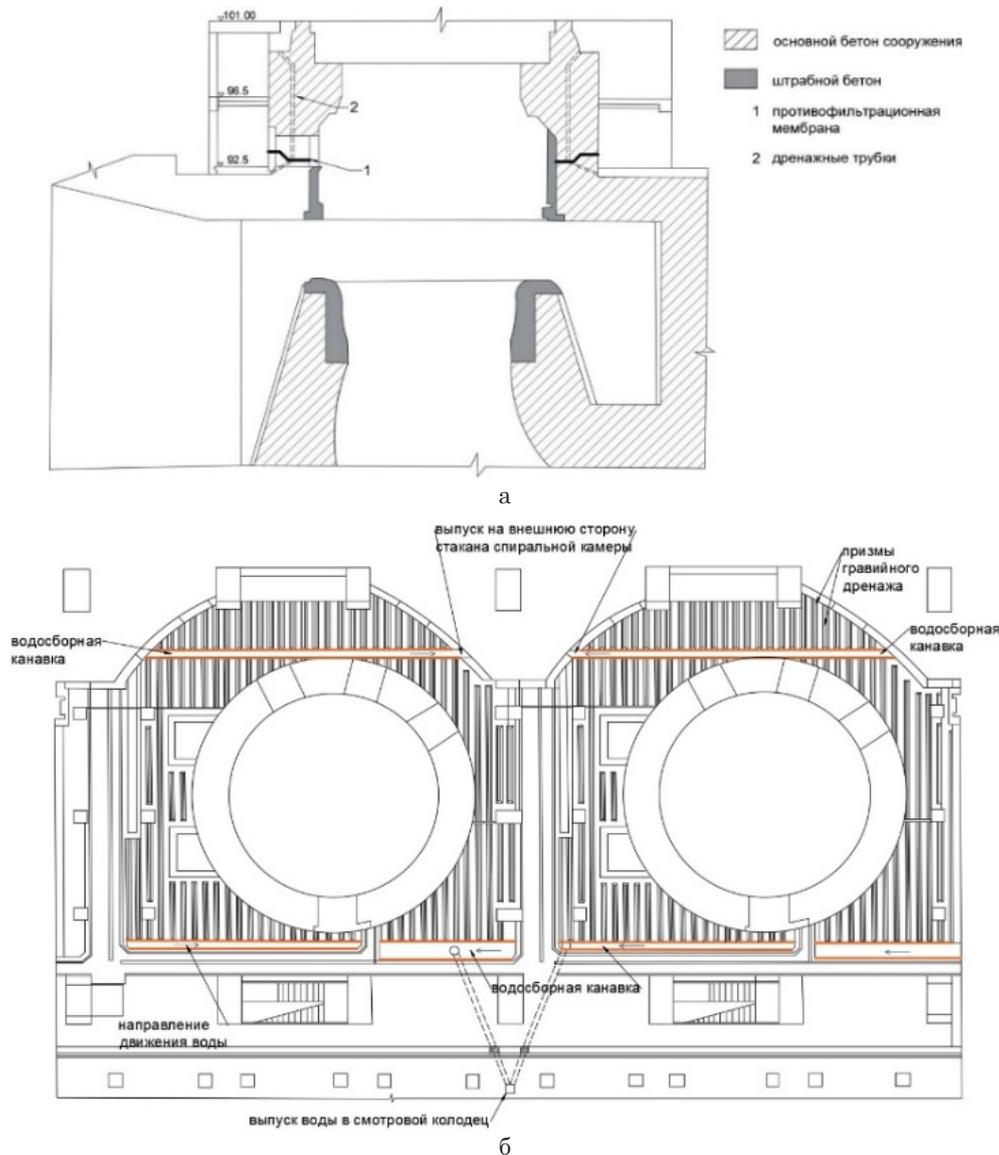


Рис. 2. Система противофильтрационных элементов на Рыбинской ГЭС:

а) противофильтрационная мембрана шахты турбины; б) устройство дренажа в перекрытии на отметке 92,50 м

Fig. 2. A system of impervious elements at the Rybinsk HPP:

a) impervious membrane of the turbine shaft, b) drainage device in the ceiling at an elevation of 92.50 m

при возведении конструкции строительные швы внутри перекрытия в месте стыков водосборной канавки и плит-оболочек гидроагрегата не были достаточно проработаны. Помимо этого, не было до конца удалено деревянное уплотнение, использовавшееся при монтаже плит-оболочек, вследствие чего разгружающаяся из перекрытий вода имеет возможность растекаться по строительным швам и примыкающим к ним дефектам плит и создавать видимость наличия фильтрации со стороны спиральной камеры.

Визуальный осмотр бетона спиральной камеры гидроагрегата 5 со стороны водопропускного тракта, проведенный в мае 2021 г., показал наличие на стенках спиральной камеры участков аккумуляции продуктов коррозии бетона

в месте примыкания стен камеры к конструкциям перекрытия, особенно выраженных в местах пролегания в перекрытии дренажных канавок. Наличие данных участков аккумуляции также отмечалось при обследовании на данном участке в 1972 г., проведенном сотрудниками ВНИИГ им. Веденеева [10]. Также в ходе визуального осмотра обнаружены трещины в бетоне перекрытия спиральной камеры, образование которых связано с промерзанием верхнего строения здания ГЭС в зимнее время, незаваренные швы в металлических облицовках шахты турбины раскрытием до нескольких миллиметров. Данные дефекты при определенных условиях могут способствовать поступлению воды в перекрытие. При простукивании металлических облицовок

шахты турбины гидроагрегата 5 бухтение отмечалось для всех участков конструкции, однако это могло быть связано со значительной усадкой пуццоланового цемента в отсутствие воды: на момент осмотра производились работы по замене гидросилового оборудования гидроагрегата 5, и проточный тракт был осушен на протяжении длительного времени.

Осмотр шахт турбин Рыбинской ГЭС был произведен 19-20 мая 2021 г. сразу после окончания весеннего паводка. При осмотре на отм. 92,50 м отмечалось образование луж, разливающихся от шахт турбин на расстояние до 50 см (присутствовавшие, однако, на поверхности перекрытия следы высыхания свидетельствовали о том, что объем фиксируемых проявлений может быть и больше). На участках перекрытия, примыкающих к шахтам турбин (в особенности внутри вентиляционных отверстий), наблюдалось отслоение полимерного наливного пола. На стороне, обращенной к нижнему бьефу, отмечался рост белых вытянутых кристаллов: под полевым микроскопом с 50-кратным увеличением были различимы единичные двойниковые кристаллы гипса и скопления тонких нитяных кристаллов мирабиллита  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O}$ , постепенно разрушающихся вследствие снижения влажности окружающей среды с образованием белого порошка тенардита  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Для всех шахт турбин отмечалось наличие следов стока воды из технологических отверстий в перекрытии на отм. 96,50 м, в некоторых случаях стекающая по конструкции шахты турбины вода растекалась по горизонтальным строительным швам. При осмотре строительных конструкций на отм. 96,50 м установлено, что образование данных участков водопроявления связано с образованием конденсата в местах ввода системы водяного охлаждения между опорами статора генератора. Также при осмотре на отм. 92,50 м отмечается наличие повреждений лакокрасочного покрытия шахт турбин, вызванное капиллярным подъемом влаги по штукатурному слою: для машин 2, 3, 4 высота наблюдаемых участков повреждений лежит в пределах 50-70 см, для машины 6 высота капиллярного подъема влаги по штукатурному слою составляла до 2,5 м. В ходе проведения осмотра с использованием тепловизора следов аккумуляции продуктов коррозии бетона вблизи гидроизоляционной мембраны не обнаружено, также отсутствуют и следы протечек воды из-под мембраны. Для блока агрегата 4 отмечался застой воды в перекрытии (рис. 3).

Осмотр конструкций шахт турбин гидроагрегатов 1 и 2 Угличской ГЭС на отметке 107,80 м

был произведен в конце мая 2021 г. При этом так же, как и для Рыбинской ГЭС, отмечались следы стока конденсата с отметкой 111,00 м, приуроченные к местам ввода в шахту турбины системы водяного охлаждения генератора. В отличие от Рыбинской ГЭС при проведении обследования конструкций шахт гидроагрегатов с использованием тепловизора отмечались следы протечек из-под гидроизоляционной мембраны, под мембраной отмечалась аккумуляция продуктов выноса (рис. 4). Основная концентрация следов водопроявления для обоих гидроагрегатов приходилась на участок на отметке 107,80 м, ограниченный с двух сторон шахтами сервоприводов, а сверху – противофильтрационной мембраной. На данном участке наблюдался рост кристаллов сульфатов натрия и кальция. Визуальный осмотр внутренних конструкций спиральной камеры гидроагрегата 1 Угличской ГЭС показал наличие плотного слоя глинистых отложений толщиной до 1 см, надежно прикрывающего все дефекты.

Измерение параметров влажного воздуха производилось на отметке 92,50 м; 96,5 м; 101,0 м Рыбинской ГЭС (табл. 1) и 107,80 м; 111,00 м; 116,00 м Угличской ГЭС (табл. 2).

Как следует из таблиц 1 и 2, образования конденсата на конструкциях Рыбинской ГЭС следует ожидать при снижении температуры ниже  $11^\circ\text{C}$ , для конструкций Угличской ГЭС на отм. 107,80 м – ниже  $10-13^\circ\text{C}$ . Следует отметить, что при проведении тепловизионной съемки в мае 2021 г. для Рыбинской ГЭС на поверхностях перекрытия, прилегающих к шахтам турбин на отметке 92,50 м, присутствовали участки, температура поверхности которых была ниже  $11^\circ\text{C}$ . Это подтверждалось при проведении замеров с использованием контактного термометра, что

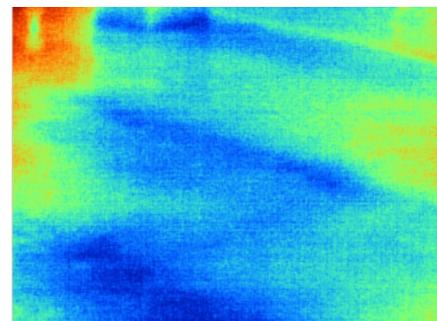


Рис. 3. Подтопление гравийных дренажных призм, уложенных в перекрытие блока ГА4 Рыбинской ГЭС (по данным тепловизионной съемки)

Fig. 3. Flooding of gravel drainage prisms laid in the ceiling of Unit GA4 of the Rybinsk HPP (according to thermal imaging data)

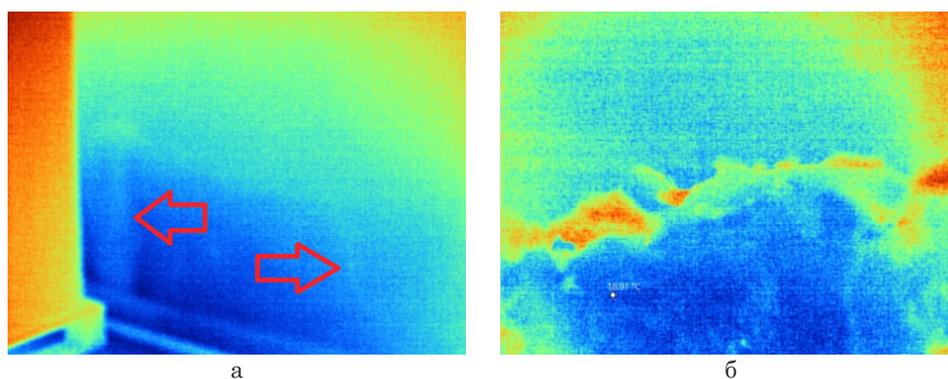


Рис. 4. Следы протечек из-под гидроизоляционной мембраны на конструкциях шахты ГА1:  
а) участок аккумуляции продуктов выноса в строительном шве, содержащем мембрану;  
б) (по данным тепловизионной съемки)

Fig. 4. Traces of leaks from under the waterproofing membrane on the structures of the shaft GA1  
a) and the area of accumulation of removal products in the construction joint containing the membrane  
b) (according to thermal imaging data)

Таблица 1. Параметры рабочей среды для машинного зала Рыбинской ГЭС  
Table 1. Operating environment parameters for the turbine hall of the Rybinsk HPP

Отметки, м Marks, m	Диапазон изменения температур воздуха, °С Air temperature range, °C	Диапазон изменения влажности воздуха, % Air moisture change range, %	Влажность сухого воздуха, г/кг Dry air moisture content, g / kg	Температура точки росы, °С Dew point temperature, °C
92,50	11,67-15,28	92,96-74,84	8,2-8,4	10,5-11
96,50	16,28-20,42	73,86-53,52	8,4	11
101,00	20,65-23,01	51,63-44,42	8,4	11

Таблица 2. Параметры рабочей среды для машинного зала Угличской ГЭС  
Table 2. Operating environment parameters for the turbine hall of the Uglich HPP

Отметки, м Marks, m	Номер агрегата Unit number	Температура воздуха при обследовании, °С Air temperature during inspection, °C	Влажность воздуха при обследовании, % Air moisture during inspection, %	Влажность сухого воздуха, г/кг Dry air moisture content, g / kg	Температура точки росы, °С Dew point temperature, °C
107,80	1	17,4	72,1	8	10
107,80	2	18,35	70,56	9,5	13
111,00	1	20,53	55,2	8,7	11,5
111,00	2	21,58	36,0	5,5	5
116,00	1	18,61	36,07	5,2	4,5
116,00	2	18,91	40,02	5,2	4,5

говорит о возможности появления конденсата на данных конструкциях и в теплое время года. Для Угличской ГЭС полученные на отм. 111,00 м результаты объяснялись возведением на момент проведения обследования гипсокартонной перегородки между агрегатами 1 и 2, вследствие чего шахта турбины гидроагрегата 2 оказалась изолированной в сравнительно небольшом объеме с хорошим воздухообменом, обеспечиваемым вытяжным вентилятором.

При возведении конструкций спиральной камеры Рыбинской ГЭС для укладки за плиты-оболочки использовался основной бетон марки М170, для промежуточных и направляющих

бычков – марки М110. Проектная марка по прочности бетона плит-оболочек составляла М250. При возведении шахт турбин гидроагрегатов также использовались основной бетон марки М170 и штабной бетон омоноличивания металлических облицовок, данные о проектной марке которого отсутствуют. Определение в настоящее время прочностных характеристик бетона проводилось неразрушающими методами: ультразвуковым и методом упругого отскока. Получены данные о среднем классе бетона в конструкциях Рыбинской ГЭС:

– основной бетон спиральных камер (отм. 82,00) – В27,7 МПа;

– бетон плит-оболочек спиральных камер (отм. 82,00) – В38,4 МПа;

– бетон шахты турбин (выше отм. 92,50) – В30,1 МПа.

Таким образом, фактический класс прочности бетона обследованных конструкций водопропускного тракта Рыбинской ГЭС превышает проектные значения (В13,6 для марки М170). Понижение прочности бетона (18,4 МПа) отмечается для конструкций плит-оболочек внутренней части спиральной камеры гидроагрегата 5 (проектная марка М200, что соответствует классу прочности В20). Однако следует отметить, что снижение содержания СаО в пробах цементного камня, отобранных из плит-оболочек, находящихся в контакте с водой, наблюдалось уже на ранних этапах эксплуатации [11], что могло быть вызвано его вымыванием из поверхностного слоя мягкой водой водохранилища. По данным обследования 1972 г., прочность бетона плит-оболочек соответствовала классу В14,1 при определении ультразвуковым методом, классу В16,1 – при определении по методу пластической деформации [10]. Это позволяет сделать вывод о том, что состояние бетона конструкций на этом участке за прошедшие 50 лет эксплуатации не менялось.

Определение марки по водонепроницаемости бетона проводилось по образцам, отобранным из конструкций для штрабного бетона и бетона омоноличивания шахт турбин гидроагрегатов 4 и 5 по методу мокрого пятна и неразрушающим способом по воздухопроницаемости по ГОСТ 12780.5 для конструкций плит-оболочек внутренней части спиральной камеры гидроагрегата 5. Полученные результаты представлены в таблице 3.

При возведении Угличской ГЭС на рассматриваемом участке применялся бетон марки М170 для зоны спиральной камеры и в качестве основного бетона шахт турбин, для омоноличивания металлических облицовок шахт турбин применялся литой бетон марки М200, состав которого в документации отсутствует. Определение прочности бетона конструкций производилось неразрушающими методами: ультразвуковым по ГОСТ 17624 и по методу упругого отскока по ГОСТ 22690, а также по образцам, отобранным из конструкции шахты турбины, по ГОСТ 28570. Отбор образцов-кернов из конструкций шахты турбины производился на участке, локализованном между шахтами сервоприводов и характеризовавшимся наибольшим водопроявлением, и на смежном участке, для которого подобные явления отсутствовали. На поверхности керна, извлеченного на участке наибольшего водопроявления, присутствовало большое количество округлых воздушных пор, что говорило об использовании пластифицирующей добавки пептизатора (типа омыленного древесного пека) или пенообразователя (типа серной кислоты). Это позволяет сделать вывод о том, что участок шахты турбины между сервоприводами до противодиффузионной мембраны выполнен из литого бетона марки М200, использованного для омоноличивания металлических облицовок турбин и шахт сервоприводов несмотря на то, что проектом в этом месте был предусмотрен обычный бетон марки М170. Данное решение было принято, возможно, в связи со значительным армированием на данном участке: в ходе определения параметров армирования магнитным способом было установлено, что расстояние между арматурными стержнями составляет здесь 7-10 см.

Таблица 3. Результаты определения водонепроницаемости бетона конструкций Рыбинской ГЭС

Table 3. Results of determining the concrete waterproofness of the Rybinsk HPP structures

Конструкция <i>Structure</i>	Марка по водонепроницаемости <i>Waterproofness brand</i>
Гидроагрегат 4, штрабной бетон омоноличивания шахты гидроагрегата <i>Hydroelectric unit 4, strained concrete for sealing hydraulic unit shaft</i>	W2
Гидроагрегат 4, основной бетон шахты гидроагрегата <i>Hydroelectric unit 4, the main concrete of the hydroelectric unit shaft</i>	не обладал маркой по водонепроницаемости <i>did not have a waterproof brand</i>
Гидроагрегат 5, штрабной бетон омоноличивания шахты гидроагрегата <i>Hydroelectric unit 5, strained concrete for sealing hydraulic unit shaft</i>	W4
Гидроагрегат 5, штрабной бетон омоноличивания шахты гидроагрегата <i>Hydroelectric unit 5, strained concrete for sealing hydraulic unit shaft</i>	W2
Плиты-оболочки внутренней зоны спиральной камеры <i>Shell plates of the inner zone of the spiral chamber</i>	W2

Полученные данные о среднем классе бетона в конструкциях Угличской ГЭС:

– основной бетон спиральных камер (отм. 82,00) – 24,2 МПа;

– бетон шахты турбин (выше отм. 107,80) – 31,1 МПа.

Таким образом, фактический класс прочности бетона обследованных конструкций водопропускного тракта Угличской ГЭС превышает проектные значения (В13,6 для марки М170).

Определение марки по водонепроницаемости бетона проводилось по образцам, ото-

бранным из конструкций для штрабного бетона и бетона омоноличивания шахты турбины гидроагрегата 1 по методу мокрого пятна, и неразрушающим способом по воздухопроницаемости по ГОСТ 12780.5 для бетонных конструкций внутренней части спиральной камеры гидроагрегата 1. Полученные результаты представлены в таблице 4.

Следует отметить, что при проведении испытаний на водонепроницаемость серии штрабного бетона протечка воды происходила мгновенно после включения установки по воздушным порам.

Таблица 4. Водонепроницаемость бетона конструкций Угличской ГЭС

Table 4. Concrete waterproofness of the Uglich HPP structures

Конструкция <i>Structure</i>	Марка по водонепроницаемости <i>Waterproofness grade</i>
<b>Гидроагрегат 1, штрабной бетон омоноличивания шахты гидроагрегата</b> <i>Hydroelectric unit 1, strained concrete for sealing hydraulic unit shaft</i>	<b>не обладал маркой по водонепроницаемости</b> <i>did not have a waterproof brand</i>
<b>Гидроагрегат 1, основной бетон шахты гидроагрегата</b> <i>Hydroelectric unit 1, the main concrete of the hydroelectric unit shaft</i>	W2
<b>Гидроагрегат 1, бетон внутренних конструкций спиральной камеры</b> <i>Hydroelectric unit 1, concrete of the inner structures of the spiral chamber</i>	W2

### Выводы

1. Определены причины наблюдаемых процессов водопроявления вокруг шахт турбин гидроагрегатов Рыбинской и Угличской ГЭС:

– образование конденсата в холодное время года вследствие отсутствия систем поддержания температурно-влажностного режима зданий;

– для Рыбинской ГЭС – сезонное раскрытие строительных швов и трещин бетонных конструкций потолка спиральной камеры;

– для Угличской ГЭС – фильтрация через штрабной бетон омоноличивания металлических облицовок шахт турбин и ниш сервоприводов.

2. Выявлено, что источник водопроявления (единный для обеих станций) также связан со склонностью цементного камня на пуццолановом портландцементе и цементного камня, полученного при высоком соотношении В/Ц, к значительным деформациям набухания-усадки при изменении влажностного режима. Вместе с тем, к примеру, при неработающем

гидроагрегате с осушенным проточным трактом возможно повышенное поступление воды через раскрывшиеся в результате усадки при высыхании межблочные швы и через пространство между бетоном омоноличивания и металлическими облицовками.

3. Отмечается, что несмотря на длительный срок эксплуатации, дренажные системы (рис. 1б, 2б) в перекрытиях и Рыбинской, и Угличской ГЭС в целом выполняют свое функциональное назначение. При этом возможно улучшение их работы посредством инъектирования примыканий к конструкциям стакана спиральной камеры низковязкими эластичными полиуретановыми смолами.

4. Рекомендуются при возникновении водопроявления вблизи конструкций шахт-турбин создание штукатурного слоя с использованием цементных шпатлевок типа Бирсс С-3 и Bergauf Finish Zement. Для окраски следует использовать паропроницаемые силикатные краски: например, Рунит или Rezolux Silicate.

### Список использованных источников

1. Lisichkin S.E., Rubin O.D., Lyapin O.B., Nefedov A.V. Research of concrete and reinforced-concrete power-generating structures // Hydrotechnical Construction Consultants bureau. New York: August-September, 1999. February. Vol. 33, № 8-9. Pp. 459-466.

2. Рубин О.Д. Инструментальные и расчетные исследования низовых подпорных стен Загорской ГАЭС

### References

1. Lisichkin S.E., O.D. Rubin, O.B. Lyapin, A.V. Nefedov "Research of concrete and reinforced-concrete power-generating structures" // Hydrotechnical Construction Consultants bureau. Vol. 33., No. 8-9, New York, August-September, 1999, February, 2000 pp. 459-466.

2. Rubin O.D., Instrumental and computational studies of the bottom retaining walls of the Zagorskaya PSPP

/ О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, И.В. Баклыков, А.С. Антонов, К.Е. Фролов // Природообустройство. 2019. № 2. С. 80-88.

3. Беллендир Е.Н. Проведение обследований фундаментной плиты водоприемника в проточной части водоводов № 5 и № 6 эксплуатируемой Загорской ГАЭС / Е.Н. Беллендир, О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, А.С. Антонов, А.Н. Катунин // Природообустройство. 2019. № 4. С. 61-68.

4. Рубин О.Д. Особенности состояния бетонных сооружений Богучанской ГЭС / О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, А.Н. Волынчиков, А.Л. Воробьев, В.П. Гребенщиков // Гидротехническое строительство. 2007. № 11. С. 26-30.

5. Рубин О.Д. Исследования бетонных и железобетонных энергетических сооружений / О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, О.Б. Ляпин, А.В. Нефедов // Гидротехническое строительство. 1999. № 8/9. С. 22-28.

6. Рубин О.Д. Осуществление контроля за безопасностью шлюзовых и подпорных сооружений путем оценки их фактического состояния на основе расчетных и натурных исследований / О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, Ю.А. Ильин // 5-й Международный конгресс ЭКВАТЭК-2002. Вода: экология и технология: сборник материалов конгресса / Под общ. ред. проф. Л.И. Эльпиера. М., 2002. 948 с.

7. Технический отчет по работе «Научно-технический анализ и обобщение проектно-строительного опыта Волгостроя». Л.: ВНИИГ, 1952.

8. Штарк И., Вихт Б. Долговечность бетона. Киев: Обратна, 2004. 294 с.

9. Бутт Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов / Ю.М. Бутт, М.М. Сычев, В.В. Тимашев. М.: Высшая школа, 1980. 472 с.

10. Технический отчет «Проведение изыскательских работ по определению состояния бетона конструкций спиральной камеры агрегата № 6 Рыбинской ГЭС и разработка рекомендаций по его ремонту». Л.: ВНИИГ, 1972.

11. Евко А.В. Опыт гидрохимических исследований бетонных сооружений Верхневолжских ГЭС / А.В. Евко П.Ф., Кузьмищев П.А. Михалевич. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1958. 85 с.

#### Об авторах

**Олег Дмитриевич Рубин**, д-р техн. наук, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; директор по научной деятельности<sup>2</sup>; SPIN-код: 2720-6627, AuthorID:423001, Scopus 7004427140, ResearcherID AAE-6688-2022, ORCID0000-0002-0630-3251; rubinOD@mgsu.ru

**Юрий Алексеевич Ильин**, канд. техн. наук, заместитель директора филиала; yu.ilin@hydroproject.ru

**Александр Леонидович Шевкин**, инженер, начальник отдела; a.shevkin@hydroproject.ru

**Ирина Владимировна Евдокимова**, инженер, главный специалист; evdokimova@hydroproject.ru

#### Критерии авторства / Criteria of authorship

Ханов Н.В., Черных О.Н., Шукин С.Н., Жукова Т.Ю., Алексеев Д.А. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов / Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests / Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

#### Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 06.08.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 21.10.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 25.10.2024

/ Lisichkin S.E., Baklykov I.V., Antonov A.S., Frolov K.E. // Prirodoobustroyctvo. 2019. No. 2, P. 80-88.

3. Bellendir E.N. Conducting surveys of the foundation plate of the water intake in the flowing part of the pipelines No. 5 and No. 6 of the operated Zagorskaya PSPP / Rubin O.D., Lisichkin S.E., Antonov A.S., Katunin A.N. // Prirodoobustroyctvo. 2019. No. 4. P. 61-68.

4. Rubin O.D. Features of the state of concrete structures of the Boguchanskaya HPP / Lisichkin S.E., Volynchikov A.N., Vorobyov A.L., Grebenshchikov V.P. // Hydrotechnical construction. 2007. No. 11, pp. 26-30.

5. Rubin O.D. Research of Concrete and Reinforced Concrete Power Structures / Lisichkin S.E., Lyapin O.B., Nefedov A.V. // Hydrotechnical Construction. 1999. № 8/9, P. 22-28.

6. Rubin O.D. Control over the Safety of the Sluice and Retaining Structures by Evaluating Their Actual State on the Basis of the Calculation and Field Studies / Lisichkin S.E.; Ilyin Yu.A. // 5th International Congress ECWATEC – 2002 Water: Ecology and Technology. Proceedings of the Congress. Proceedings of the Congress // under the general editorship of Prof. L.I. Elpierre. L.I. Elpierre, Moscow, 2002, 948 p.

7. Technical report on the work “Scientific and technical analysis and generalization of the design and construction experience of “Vologostroy”. L.: VNIIG, 1952.

8. Stark I, Viht B. Durability of concrete. Kiev: Reverse, 2004. 294 p

9. Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. Chemical technology of binding materials. Moscow: Higher School, 1980. 472 p.

10. Technical report “Conducting survey work to determine the condition of concrete structures of the spiral chamber of unit No. 6 of the Rybinsk HPP and developing recommendations for its repair”, L.; VNIIG, 1972.

11. Evko A.V., Kuzmishchev P.F., Mikhalevich P.A. Experience of hydrochemical studies of concrete structures of Verkhnevolzhsky HPPs. M. – L.: Gosenergoizdat, 1958. 85 p.

#### About the authors

**Oleg D. Rubin**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; Director of Scientific Activity<sup>2</sup>; SPIN code: 2720-6627, AuthorID:423001, Scopus 7004427140, ResearcherID AAE-6688-2022, ORCID0000-0002-0630-3251; rubinOD@mgsu.ru

**Ilyin Yu. Alekseevich**, Candidate of Technical Sciences, Deputy. Branch directors yu.ilin@hydroproject.ru

**Alexander L. Shevkin**, Engineer, Head of Department a.shevkin@hydroproject.ru

**Irina V. Evdokimova**, Engineer, Chief Specialist; evdokimova@hydroproject.ru

Khanov N.V., Chernykh O.N., Shchukin S.N., Zhukova T.Y., Alekseev D.A., carried out practical and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Khanov N.V., Chernykh O.N., Shchukin S.N., Zhukova T.Y., Alekseev D.A. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.