# ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER УДК 627:628 DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.270-280

## Оценка вибрационного состояния и определение напряженно-деформированного состояния сороудерживающих решеток гидроэлектростанций

## Антон Сергеевич Антонов<sup>1,2</sup>, Никита Павлович Караблин<sup>1</sup>, Константин Юлиевич Бод<sup>1</sup>, Игорь Вячеславович Баклыков<sup>1</sup>

 <sup>1</sup> Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт "Гидропроект" им. С.Я. Жука» — «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» (Филиал АО «Институт Гидропроект» — «НИИЭС»); г. Москва, Россия;
<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

#### аннотация

Введение. Представлен подход по выявлению причины повреждения отдельных ключевых элементов металлоконструкций сороудерживающей решетки (СУР) гидроэлектростанции при техногенных динамических воздействиях. Выполнены прочностные и гидравлические расчеты, а также модальный анализ конструкции. Определен подход и проведены инструментальные измерения фактических динамических характеристик СУР при различных напорах. Материалы и методы. Для выполнения замеров динамических техногенных воздействий разработана методика, состоящая из двух блоков. Первый блок — инструментальное и визуальное обследование для определения соответствия конструкций проектным решениям, а также выявления характерных дефектов СУР. Измерение собственных частот колебаний и виброускорений конструкций при различных напорах выполнялось при помощи пьезоэлектрических вибропреобразователей АР90, измерение виброускорений — сейсмоприемниками А16 и приемной станцией MIC-200. Второй блок — математическое моделирование. Проводилось уточнение гидравлического режима, напяяженно-деформированного состояния и определялись частоты и формы собственных колебаний конструкции. Расчетные исследования осуществлены в универсальном промышленном программном комплексе ANSYS Mechanical и ANSYS CFX.

**Результаты.** Обследование выявило наличие систематически возникающих трещин в несущем каркасе, несоответствие положения раскосов проекту. Уточнены гидродинамические нагрузки, определен диаметр и частота образования вихрей. При расчетах напряжения в металлических раскосах не превосходят нормативных величин для используемой стали. Выполненное прямое измерение вибрации элементов конструкции продемонстрировало, что наиболее опасный частотный диапазон — это 40,30–41,75 Гц.

**Выводы.** Установлено, что основной причиной повреждения конструкции СУР является смещение вынужденных частот и формы собственных колебаний в зону работы гидроагрегатов, что и приводило к концентрации напряжений на концах раскосов в зоне примыкания к фасонкам. Стыковка раскосов к фасонке имела недостаточную длину, что приводило к передаче напряжений на край фасонки, и, как следствие, к концентрации напряжений и образованию трещин по направлению главных напряжений в узле.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** гидромеханическое оборудование, гидроэлектростанции, металлоконструкции, динамические испытания, напряженно-деформированное состояние, гидравлический режим, ANSYS, ANSYS CFX, расчетные исследования, метод конечных элементов

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Антонов А.С., Караблин Н.П., Бод К.Ю., Баклыков И.В. Оценка вибрационного состояния и определение напряженно-деформированного состояния сороудерживающих решеток гидроэлектростанций // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 270–280. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.270-280

Автор, ответственный за переписку: Антон Сергеевич Антонов, Antonov.An.S@yandex.ru.

## Evaluation of the vibration state and determination of the stress-strain state of the trash-rack structure of the hydroelectric power plants

### Anton S. Antonov<sup>1,2</sup>, Nikita P. Karablin<sup>1</sup>, Konstantin Ju. Baud<sup>1</sup>, Igor V. Baklykov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Branch of JSC "Design and survey and research Institute «Hydroproject» named after S.Y. Zhuka" "Research Institute of Energy Structures" (Branch of JSC "Institute Hydroproject" — "NIIES"); Moscow, Russian Federation; <sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

#### ABSTRACT

**Introduction.** The study presents an approach for detecting and identifying the causes of damage to individual key elements of metal structures of the hydroelectric power plant's trash-rack structure under anthropogenic dynamic impacts. Strength and hydraulic calculations were performed, as well as modal analysis of the structure. The approach is determined and instrumental measurements of actual dynamic characteristics of the trash-rack structure at different pressures are carried out. **Materials and methods.** A methodology consisting of two blocks was developed to perform measurements of dynamic anthropogenic impacts. The first block is an instrumental and visual inspection to determine the compliance of structures with design solutions, as well as to identify characteristic defects of the trash-rack structure. The measurement of natural frequencies of vibrations and vibration accelerations of structures at different pressures was carried out using piezoelectric vibration transducers AR90, the measurement of vibration accelerations by seismic receivers A16 and the receiving station MIC-200. The second block is mathematical modelling. The hydraulic regime and the stress-strain state were specified, frequencies and forms of natural vibrations of the structure were determined. Computational studies were carried out in the universal industrial software complex ANSYS Mechanical and ANSYS CFX.

**Results.** The survey revealed the presence of systematically occurring cracks in the load-bearing frame, the mismatch of the position of the struts to the design. Hydrodynamic loads are specified, diameter and frequency of vortex formation are determined. The stresses in the metal struts do not exceed the standard values for the steel used. The performed direct measurement of vibration of structural elements demonstrated that the most dangerous frequency range is 40.30–41.75 Hz. **Conclusions.** It is revealed that the main cause of damage to the trash-rack structure is the displacement of forced frequencies and the shape of natural oscillations to the zone of operation of hydraulic units, which led to the concentration of stresses at the ends of the struts in the zone adjacent to the gussets. The junction of struts to the gusset had insufficient length, which led to the transfer of stresses to the edge of the gusset and, as a result, to the concentration of stresses and the formation of cracks in the direction of the main stresses in the node.

**KEYWORDS:** hydromechanical equipment, hydroelectric power plants, metal structures, dynamic tests, stress-strain state, hydraulic mode, ANSYS, ANSYS CFX, computational studies, finite element method

**FOR CITATION:** Antonov A.S., Karablin N.P., Baud K.Ju., Baklykov I.V. Evaluation of the vibration state and determination of the stress-strain state of the trash-rack structure of the hydroelectric power plants. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):270-280. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.270-280 (rus.).

Corresponding author: Anton S. Antonov, Antonov.An.S@yandex.ru.

#### введение

В настоящее время в Российской Федерации эксплуатируется свыше 200 гидроэлектростанций (ГЭС), многие из которых приближаются к проектному сроку службы. При этом гидромеханическое оборудование на гидротехнических сооружениях (ГТС) также имеет длительный срок эксплуатации. На основании опыта эксплуатации затворов и сороудерживающих решеток (СУР) обнаружены различные дефекты как заводские, так и повреждения от неучтенных на момент проектирования техногенных и динамических нагрузок.

Современные средства измерения позволяют обнаружить и выявить причины повреждения отдельных ключевых элементов металлоконструкций, а математический аппарат — оценить степень влияния различных факторов. Зачастую неучтенными факторами, вызывающими существенные повреждения гидромеханического оборудования, являют-

ся динамические воздействия от водного потока при различных режимах работы гидроагрегатов. Ключевым аспектом служит то, что при проектировании за основу принимаются проектные уровни воды и достаточно равномерное растекание потока вокруг элементов конструкции. Исходя из начальной предпосылки на стадии проекта, наихудшим для работы конструкции становится прохождение водного потока от нормального подпорного уровня (НПУ). На практике присутствуют существенные отличия от проектных постановок ввиду изменений условий эксплуатации и внешних воздействий или выявления дополнительных нагрузок, неучтенных или заниженных на этапе проектирования. К примеру, в результате длительной работы гидроагрегатов происходит изменение коэффициента полезного действия (КПД), что ведет к увеличению расходных характеристик через гидроагрегат. В изменение расходных функций вносят значительный вклад частотные спектры колебания конструкций. Учет изменившихся нагрузок ведет к изменению напряженно-деформированного состояния (НДС) гидромеханического оборудования.

Применение методов математического моделирования совместно с натурными данными инструментальных обследований и замеров дает возможность дать актуальные рекомендации для поддержания оборудования в работоспособном состоянии и обеспечить его нормальную эксплуатацию, в отличие от проектных рекомендаций, основывающихся на устаревших сведениях.

Рассматривается сороудерживающая решетка ГЭС, на которой возникают типовые дефекты (трещины) каждые 2–3 года, независимо от регулярно проводимых ремонтно-восстановительных работ. В результате научно-исследовательской работы удалось установить причины образования дефектов, а также разработать мероприятия по их устранению и предотвращению повторного появления.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения динамических техногенных воздействий на гидромеханическое оборудование изучен российский и мировой опыт проведения инструментальных обследований, научно-техническая информация в части природы возникновения различных дефектов, анализ которой позволяет сделать вывод о необходимости исследования динамических нагрузок на СУР при различных режимах работы гидроагрегатов на напорах, близких к максимальному, минимальному и среднему. Для выполнения замеров динамических техногенных воздействий разработана методика выполнения работ, которая разделена на два блока.

Первый — инструментальный, включающий инструментальное и визуальное обследование для определения соответствия конструкций проектным решениям, уровень коррозионных повреждений СУР, а также виброобследование, направленное на получение виброускорений различных элементов конструкции. Для измерения виброускорений СУР использовались пьезоэлектрические вибропреобразователи герметичного исполнения АР90 производства ООО «ГлобалТест» (г. Саров). Крепление вибропреобразователей производилось шпильками к шайбам, приваренным на элементы силового каркаса. Для измерения виброускорений применялся трехкомпонентный пьезоэлектрический сейсмоприемник А16 производства ЗАО «ГЕОАКУСТИКА» (г. Зеленоград). Направления координат: ось Х по потоку, ось Y — поперек потока, ось Z — вертикально. При обработке полученной информации использовался программный продукт WinПОС (ООО НПП «Мера»), поставляемый с комплексом MIC-200. Данный программный продукт предназначен для обработки измерительной информации с помощью математических и статистических алгоритмов, графического представления данных и их документирования.

Второй блок — математическое моделирование. Наиболее перспективным междисциплинарным комплексом, позволяющим одновременно учитывать большое количество факторов, является ANSYS. Данный программный продукт имеет различные модули, так ANSYS CFX [1–14] позволяет решать задачи течения потока, ANSYS Mechanical — выполнять прочностные расчеты металлоконструкций, принимая во внимание различные нагрузки при учете геометрической и физической нелинейности [15–21].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассматриваемые СУР размеры 14,7 × 22,0 × 2,0 м находятся в эксплуатации более 15 лет и предназначены для удержания плавающих тел на поверхности воды и защиты гидротурбин. Сороудерживающая решетка состоит из сороудерживающих полос, опирающихся на несущий каркас, выполненный по типу сквозной конструкции. Каркас при этом представлен шестью типовыми секциями, верхняя дополнительно используется для крепления траверс, соединенных между собой при помощи сцепов. Металлические конструкции имеют прекоробчатые сечения опорно-концевых стоек и фасонок — используемая сталь 09Г2С-Св-12 ГОСТ 19281–89, раскосы — трубы В20 ГОСТ 8731–74.

Несущий каркас представлен в виде ферм с параболическим или сегментным очертанием в плане, передающих усилия на опорно-концевые стойки. Сороудерживающие полосы выполнены из прокатной стали 14 × 100 мм и объединены в 10 пакетов, соединенных стяжками диаметром 30 мм (один средний по ширине пролета пакет состоит из пяти полос). В период эксплуатации неоднократно выявлялись сквозные трещины на вертикальных и диагональных элементах каркаса. Рекомендации завода-изготовителя по восстановлению работоспособности СУР заключались в удалении дефектных фасонок (распустив сварные швы) и установке новых толщиной 12 мм. После выполнения замены фасонок через год при плановом ремонте выявлялись аналогичные разрушения и трещинообразования, кроме того, дефекты также были обнаружены на фасонках крепления опорно-концевых конструкций в верхней и нижней части.

Для определения причин повреждений проведен инструментальный и визуальный контроль решеток, изучена проектная документация, установлено, что на объекте используется три типа конструкции. На рис. 1 показаны варианты конструкций в пределах одной секции СУР, красным отмечены раскосы, которые имеют конструктивные различия.

Анализ архивных материалов и результатов расчетов прочности конструкции СУР позволил



**Рис. 1.** Существующие схемы расположения раскосов, красным выделены различия в установке: *a* — конструкция типа *A*; *b* — конструкция типа *B*; *c* — конструкция типа *C* 

Fig. 1. The existing strut layouts, differences in installation are highlighted in red: a — type A construction; b — type B construction; c — type C construction

выявить, что ранее все исследования выполнялись только на конструкции типа A, определение НДС фактически собранных конструкций B и C, а также секций в сборе не производилось. Еще одной важной особенностью является то, что опорно-концевые стойки сконструированы таким образом, что размеры сечения потока после СУР меньше, чем до нее. В результате этого увеличивается скорость потока и нагрузка на узлы и раскосы.

Для выявления фактических нагрузок от водного потока проведены расчетные исследования гидродинамического режима СУР, которые осуществлены в программном комплексе (ПК) ANSYS CFX, представляющем собой полноценный CFD-пакет (Computational Fluid Dynamics), в состав которого входят пре- и постпроцессоры, решатель и отдельный сеточный генератор ANSYS Meshing.

В связи с тем, что секция СУР симметричная с целью оптимизации вычислительных ресурсов для расчетов гидродинамики принято решение моделировать одну часть секции, объемная модель представлена на рис. 2.

Анализ результатов показал, что изменение сечения потока существенно меняет нагрузки на конструкции СУР. На рис. 2, *b* зона увеличенных скоростей представлена красным цветом, при этом за счет уменьшения сечения скорость течения возросла

практически в 2 раза, также заметна зона турбулентного течения с пониженным давлением. За счет сопротивления металлических конструкций несущего каркаса движению водного потока за раскосами возникает зона пониженных скоростей и давлений. Наибольшее влияние оказывается на пакет ригелей, расположенный в первом ряду у бетонной стенки, при этом давление направлено не вдоль ригеля, а под некоторым углом. Это отчетливо заметно в местах поворота несущего каркаса. В связи с этим подбор сечений ригелей и труб несущего каркаса, а также их пространственного расположения при разработке проекта позволяет значительно снизить действующие на конструкцию нагрузки. Увеличение скоростей наблюдается как на несущих трубах большого диаметра, так и на раскосах, диаметр которых почти в 2 раза меньше основных. Отдельного внимания заслуживает образование вихревой дорожки Кармана за трубами каркаса, которые могут увеличить вибрации как всей конструкции, так и ее отдельных элементов. Общий вид вихревой дорожки за трубой силового каркаса СУР представлен на рис. 3, *а*.

Определены частоты вихрей при различных диаметрах труб СУР. В соответствии с известной формулой (1) частоту вихрей f в первом приближении можно найти через скорость потока v и без-



**Рис. 2.** Гидравлическая модель для расчета течения потока (*a*); распределение скоростей в рассматриваемом сечении, м/с (*b*) **Fig. 2.** Hydraulic model for calculating the flow (*a*); velocity distribution in the section under consideration, m/s (*b*)



**Рис. 3.** Образование вихревой дорожки Кармана при прохождении потока (*a*); зависимость от: *l* — частоты вихря, Гц, *2* — скорости, м/с и *3* — диаметра, м (*b*)

Fig. 3. Karman vortex track formation during flow (*a*); dependence on: 1 — vortex frequency, Hz, 2 — velocity, m/s, and 3 — diameter, m (*b*)

размерного критерия Sh (число Струхаля), а также ширины тела обтекания *d*:

$$f = \frac{\mathrm{Sh} \cdot v}{d}.$$
 (1)

Результаты показаны на рис. 3, *b* в виде зависимости распределения частот вихрей от скорости потока и диаметра трубы. Выявлено, что при снижении диаметра трубы и увеличении скорости потока частота вихрей увеличивается.

На основании полученных данных гидравлического моделирования потока проведен модальный анализ конструкции, а также выполнены расчеты НДС СУР. При этом в соответствии с возможностями решения междисциплинарных задач в ПК ANSYS осуществлен пересчет скоростей в гидродинамическое давление на конструкции. Принятые давления для дальнейших расчетов представлены на рис. 4. В результате анализа расчетов можно сделать вывод, что наблюдается увеличение горизонтального давления на раскос, находящийся на грани несущего каркаса, обращенной в сторону гидроагрегата.

В связи с тем, что визуальное обследование показало, что секции каркаса отличаются от проектных схем, расчеты НДС выполнены для 3 типов секций в соответствии с фактической установкой раскосов. При расчетах учтены следующие нагрузки: нагрузка от собственного веса секции; нагрузка от веса вышележащих секций; гидродинамическая нагрузка на опорную раму.

Расположение раскосов по типу *А* показало, что максимальные напряжения в основных конструкциях составляют 155,96 МПа, что не превышает нормативных значений. Направление главных напряже-



**Рис. 4.** Распределение гидродинамического давления, Па (*a*); вертикальное сечение (*b*) **Fig. 4.** Distribution of hydrodynamic pressure, Pa (*a*); vertical cross section (*b*)

ний в верхней фасонке и максимальные главные напряжения направлены в соответствии с обнаруженными дефектами.

При расположении раскосов по типу *В* наблюдается перераспределение напряжений и общий рост в пределах 5 % до 163,57 МПа. Наихудшим расположение раскосов является тип С, в котором фиксируется рост величин напряжений в элементах секции до 246,1 МПа или на 57 %, но при этом максимальные величины напряжений не превосходят нормативных величин для стали 09Г2С-Св-12 ГОСТ 19281–89. Наиболее нагруженной стороной рамы является тыловая грань, обращенная к гидроагрегатам. Изменение угла внутреннего раскоса, соединяющего напорную грань и грань со стороны гидроагрегатов, имеет незначительное влияние на НДС СУР.

Точки экстремума эквивалентных напряжений в конструкциях СУР изменяются, так, при непроектном расположении раскосов напряжения в нижнем поясе рамы больше, чем в верхнем, при этом фиксируется расположение локального максимума вблизи центрального вертикального раскоса. С учетом непроектного расположения раскосов по типу А напряжения в верхнем поясе рамы больше, чем в нижнем. Расчеты показали, что напряжения в фасонках, соединяющих раскосы, находятся в допустимых величинах, однако направления главных напряжений соответствуют фиксируемым инструментальными методами дефектам. В связи с эти сделан вывод о существенном вкладе динамической составляющей нагрузки, принято решение выполнить инструментальное определение частот и форм собственных колебаний конструкций СУР и проверить эффект резонанса при различных режимах течения потока расчетными методами.

Модальный анализ секции СУР выполнен на объемной модели секции, при анализе определены 50 первых собственных частот колебаний конструкции. На рис. 5 представлен график частоты и форм собственных колебаний конструкции.

По данным инструментальных обследований дефекты фиксировались на фасонках раскосов, расположенных на тыловой грани несущего каркаса, со стороны гидроагрегатов, при анализе выделены частоты, оказывающие наибольшее влияние, различно установленные раскосы (выделены красным на рис. 1). На основании выделенных частот проводился прочностной расчет элементов. Главные частоты выделяются по направлению воздействия, так, в направлении вдоль потока основные формы 8-13, которым соответствуют частоты в диапазоне 40,389-44,140 Гц. В вертикальном и поперек потока направлении основные формы вибрации 30, 31, 35 и 39, которым соответствуют частоты 55,63, 56,18, 59,57 и 62,54 Гц. Инструментальные замеры сейсмоприемниками А16 производства ЗАО «ГЕОАКУСТИКА» и комплексом МІС-200 показали, что фактические частоты при работающих гидроагрегатах составляют 41-43 Гц, а расчетные собственные частоты конструкции находятся в диапазоне 40-50 Гц. Соответственно на этих частотах может происходить эффект резонанса, приводящий к существенному увеличению усилий в конструкции. Пример расстановки датчиков для секции типа В и получаемого сигнала при номинальной мощности гидроагрегата приведен на рис. 6.

Выполненные расчеты НДС показали, что при 23,24 Гц, т.е. при 2-й форме колебаний, напряжения в конструкции не превосходят нормативных значений для стали 09Г2С-Св-12 ГОСТ 19281–89 и В20 ГОСТ 8731–74. Результат расчета НДС при 43,765 Гц показан на рис. 7, при частоте 43,765 Гц





**Рис. 6.** Расстановка датчиков для натурных испытаний (*a*); пример частотного сигнала (*b*) **Fig. 6.** Arrangement of sensors for field tests (*a*); example of a frequency signal (*b*)



Рис. 7. Эквивалентные напряжения, МПа, при частоте 43,765 Гц

Fig. 7. Equivalent stresses, MPa, at a frequency of 43.765 Hz

эквивалентные напряжения достигают предела текучести металла, что приводит к трещинообразованию в фасонках. Увеличение толщины фасонки незначительно сказывается на общем НДС конструкции. На рис. 8 приведено направление векторов главных напряжений, приводящих к трещинам отрыва в фасонках, а также фактическое трещинообразование и разрушение, зафиксированное при инструментальном контроле состояния СУР.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Инженерно-техническое обследование СУР выявило наличие трещин в металлических деталях несущего каркаса, вызванных повышенными вибрациями конструктивных элементов. При этом все проектные расчеты проведены без учета фактической схемы монтажа и типов конструкций.

На основании натурных и архивных данных разработана гидродинамическая математическая модель для расчетов движения жидкости через СУР. Результаты расчета показали неравномерность нагрузки по ширине СУР, а также позволили уточнить величины нагрузок. Расчеты вихреобразования за элементами круглых сечений продемонстрировали, что при диаметре раскоса 70 мм частота образования вихрей составляет 23 Гц.

Для расчетов НДС разработаны математические конечно-элементные модели СУР, на базе которых исследованы конструкции по типам *A*, *B* и *C*. В результате расчета определены максимальные напряжения в металлическом каркасе, не превышающие нормативных величин для стали 09Г2С-Св-12 ГОСТ 19281–89.

С целью оценки вибрационных воздействий на НДС СУР выполнен модальный анализ конструкций, при этом основные частоты имеют существенные различия по направлению воздействия, так, в направлении вдоль потока основные формы 8–13, которым соответствуют частоты в диапазоне 40,39–44,14 Гц. В вертикальном и поперек потока направлении основные формы вибрации 30, 31, 35 и 39, которым соответствуют частоты 55,63, 56,18, 59,57 и 62,54 Гц. Натурные испытания показали, что максимальные амплитуды вибрации на резонансных частотах 40–43 Гц наблюдались на всех элементах



**Рис. 8.** Направление векторов главных напряжений (*a*); фактическое трещинообразование и разрушение (*b*, *c*)

**Fig. 8.** Direction of the vectors of the main stresses (a); actual cracking and destruction (b, c)

каркаса СУР при нагрузке, равной номинальной мощности гидроагрегатов, при этом данные частоты являются наиболее опасными для элементов СУР.

Исходя из результатов натурных испытаний и многовариантных расчетов на математических моделях выявлено, что основной причиной значительной вибрации СУР является изменение вынужденных форм и частот собственных колебаний и смещение их величины в зону работы гидроагрегатов при исполнении по типам *B* и *C* вследствие измененного расположения раскосов, что при определенных режимах работы агрегатов приводило к появлению резонанса и концентрации напряжений на концах раскосов в зоне примыкания к фасонкам.

При этом стыковка раскосов к фасонке имела недостаточную длину, что влекло за собой передачу напряжений на край фасонки и концентрацию напряжений, что приводило к образованию трещин по направлению главных напряжений в узле.

Для устранения причин возникновения дефектов рекомендовано рассмотреть возможность изменения конструкции фасонки или ее усиление для обеспечения достаточного прочностного запаса узла. Кроме того, возможно рассмотреть наращивание площади опирания раскосов на фасонку или стыковку осей раскосов в одной точке, что приведет к образованию «правильной» формы фермы и перераспределению напряжений.

Изменение формы стыковки фермы или конструкции узла фасонки позволит увеличить жесткость конструкции и изменить форму и частоту вынужденных колебаний, вероятно, сместив их в диапазон безопасных величин.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Селезнев В.Н. Прогнозирование энергетических характеристик обратимой гидромашины на напор до 250 м // Известия МГТУ МАМИ. 2022. Т. 16. № 1. С. 13–19. DOI: 10.17816/2074-0530-104580. EDN TAWRPF.

2. Жарковский А.А., Щур В.А., Мохаммад О. Прогнозирование энергетических и кавитационных характеристик быстроходных радиально-осевых гидротурбин // Известия МГТУ МАМИ. 2022. Т. 16. № 3. С. 225–324. DOI: 10.17816/2074-0530-105208. EDN VJRJGU.

3. Антонов А.С., Караблин Н.П., Минаков В.А., Карпинский А.В. Разработка и обоснование универсальной конструкции для энергетических испытаний в проточных трактах гидроэлектростанций // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 7. С. 933–943. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.933-943. EDN FSMPFY.

4. Schiffer J., Benigni H., Jaberg H., Ehrengruber M. Reliable prediction of pressure pulsation in the draft tube of a Francis turbine at medium and deep part load: A validation of CFD-results with experimental data // Proceedings of Hydro 2018. Progress through Partnerships. 2018.

5. Yang L.F., Zhang S.R., Liu W.N., Yang Y., Zhang Y.J. Application ANSYS CFX in modeling turbine Blade // Materials Science Forum. 2009. Vol. 626– 627. Pp. 593–598. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ MSF.626-627.593

6. *Mohammed O., Aziz Y.* CFD Modeling of simultaneous flow over broad crested weir and through pipe culvert using different turbulence models // Zanco Journal of Pure and Applied Sciences. 2018. Vol. 30. Issue 5. DOI: 10.21271/ZJPAS.30.5.11

7. Twayna R., Manandhar R., Singh B., Dahal D., Kayastha A., Thapa B.S. Numerical investigation of cavitation in Francis turbine // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1037. Issue 1. P. 012017. DOI: 10.1088/1755-1315/1037/1/012017

8. Мураева М.А., Гумеров А.В., Каримов Т.Р. Верификация методики газодинамического расчета осевой турбины в программном комплексе Ansys CFX на базе экспериментальных исследований плоских решеток // Вызовы современности и стратегии развития общества в условиях новой реальности : сб. мат. Х Междунар. науч.-практ. конф. 2022. С. 132–137. DOI: 10.34755/IROK.2022.32.24.045. EDN PNMEFL.

9. *Ahmed S., Aziz Y., Aziz Y.* Numerical modeling of flow in side channel spillway using ANSYS-CFX // Zanco Journal of Pure and Applied Sciences. 2018. Vol. 30. Issue s1. DOI: 10.21271/ZJPAS.30.s1.10

10. *Mohammed O.K., Aziz Y.W.* CFD modeling of simultaneous flow over broad crested weir and through pipe culvert using different turbulence models // Zanco Journal of Pure and Applied Sciences. 2018. Vol. 30. Issue 5. DOI: 10.21271/ZJPAS.30.5.11

11. *Majeed H.Q., Ghazal A.M.* CFD simulation of velocity distribution in a river with a bend cross section and a cubic bed roughness shape // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 928. P. 022038. DOI: 10.1088/1757-899X/928/2/022038

12. Kadia S., Kumar B., Pummer E., Ruther N., Ahmad Z. Experimental and CFD simulation studies on the flow approaching a type-a piano key weir // EGU General Assembly. 2021. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-10030

13. Saleh S.M., Husain S.M. Numerical study to evaluate the performance of nonuniform stepped spillway using ANSYS-CFX // Polytechnic Journal. 2020. Vol. 10. Issue 2. Pp. 1–9. DOI: 10.25156/ptj.v10n2y2020.pp1-9

14. Власов В.А., Клопотов А.А., Пляскин А.С., Буньков В.Е., Устинов А.М. Оценка напряженно-деформированного состояния вертикального резервуара, усиленного углекомпозитным бандажом, на основе численных исследований в ПК ANSYS // Современные строительные материалы и технологии : сб. науч. ст. III Междунар. конф. 2020. С. 111–120. EDN FQWIJC.

15. Фабричная К.А., Фаррахова Ч.Ф. Исследование напряженно-деформированного состояния узла

Поступила в редакцию 21 октября 2023 г. Принята в доработанном виде 23 октября 2023 г. Одобрена для публикации 1 декабря 2023 г. сталежелезобетонного каркаса здания в ПК ANSYS // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2019. № 4 (11). С. 25–35. EDN MMZSRF.

16. Фабричная К.А., Саубанова А.М. Исследование напряженно-деформированного состояния элементов опорного узла консоли в ПК ANSYS // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2019. № 3 (10). С. 24–33. EDN MCSCSA.

17. Трастьян Н.А., Линьков Н.В. Разработка рамных узлов стальных конструкций с учетом пластических деформаций // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1.

18. Галиева А.Б., Галиев Г.Н. Моделирование конструкций многоярусной однопролетной рамы в ПК ANSYS с учетом регулирования усилий в узлах сопряжения ригелей с колоннами // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2015. № 2. С. 90–92. EDN UCTJTZ.

19. Грибанов Я.И., Калугин А.В., Балакирев А.А. Расчетный комплекс для прочностного анализа несущих конструкций покрытия спортивного сооружения // Вестник МГСУ. 2012. № 8. С. 85–90.

20. Голоднов А.И., Иванов А.П., Псюк В.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния стальных конструкций по результатам выполненного обследования // Металлические конструкции. 2011. Т. 17. № 3. С. 167–175. EDN OBVAOT.

21. Кравченко Г.М., Костенко Д.С. Моделирование узлового соединения элементов облегченных стальных конструкций // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2019. № 4 (204). С. 51–56. DOI: 10.17213/032 1-2653-2019-4-51-56. EDN WYAHRR.

ОБ АВТОРАХ: Антон Сергеевич Антонов — кандидат технических наук, главный инженер по оборудованию и гидротехническим сооружениям; Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт "Гидропроект" им. С.Я. Жука» — «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» (Филиал АО «Институт Гидропроект» — «НИИЭС»); 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2; доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7374-6867, Scopus: 57197566337, ResearcherID: AAC-7597-2022, ORCID: AAC-7597-2022; Antonov.An.S@yandex.ru;

Никита Павлович Караблин — главный инженер по турбинному и гидромеханическому оборудованию; Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт "Гидропроект" им. С.Я. Жука» — «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» (Филиал АО «Институт Гидропроект» — «НИИЭС»); 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2; n.karablin@hydroproject.ru;

Константин Юлиевич Бод — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник; Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт "Гидропроект" им. С.Я. Жука» — «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» (Филиал АО «Институт Гидропроект» — «НИИЭС»); 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2; baudk@yandex.ru;

Игорь Вячеславович Баклыков — главный специалист; Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт "Гидропроект" им. С.Я. Жука» — «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» (Филиал АО «Институт Гидропроект» — «НИИЭС»); 125080, г. Москва,

C. 270-280

Волоколамское шоссе, д. 2; РИНЦ ID: 915462, Scopus: 56538614100, ORCID: 0000-0002-8374-9046; moscow\_igor88@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Seleznev V.N. Forecasting the energy characteristics of a reversible hydraulic machine for a head up to 250 m. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2022; 16(1):13-19. DOI: 10.17816/2074-0530-104580. EDN TAWRPF. (rus.).

2. Zharkovskiy A.A., Schur V.A., Mohammad O. Prediction of energy and cavitation characteristics of high specific speed Francis hydraulic turbines. *Izvestiya MGTUMAMI*. 2022; 16(3):225-324. DOI: 10.17816/2074-0530-105208. EDN VJRJGU. (rus.).

3. Antonov A.S., Karablin N.P., Minakov V.A., Karpinsky A.V. Development and justification of universal designs for energy tests in flow paths of hydroelectric power plants. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(7):933-943. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.933-943. EDN FSMPFY. (rus.).

4. Schiffer J., Benigni H., Jaberg H., Ehrengruber M. Reliable prediction of pressure pulsation in the draft tube of a Francis turbine at medium and deep part load: A validation of CFD-results with experimental data. *Proceedings of Hydro 2018. Progress through Partnerships.* 2018.

5. Yang L.F., Zhang S.R., Liu W.N., Yang Y., Zhang Y.J. *Application ANSYS CFX in modeling turbine blade. Materials Science Forum.* 2009; 626-627:593-598. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.626-627.593

6. Mohammed O., Aziz Y. CFD modeling of simultaneous flow over broad crested weir and through pipe culvert using different turbulence models. *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences*. 2018; 30(5). DOI: 10.21271/ZJPAS.30.5.11

7. Twayna R., Manandhar R., Singh B., Dahal D., Kayastha A., Thapa B.S. Numerical investigation of cavitation in Francis turbine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 1037(1):012017. DOI: 10.1088/1755-1315/1037/1/012017

8. Muraeva M.A., Gumerov A.V., Karimov T.R. Axial turbine gas-dynamic calculation procedure verification in the Ansys CFX software based on linear turbine grids experiments. *Challenges of our time and strategies for the development of society in the new reality : collection of materials from the X International Scientific and Practical Conference.* DOI: 10.34755/IROK.2022.32.24.045. EDN PNMEFL. (rus.).

9. Ahmed S., Aziz Y., Aziz Y. Numerical modeling of flow in side channel spillway using ANSYS-CFX. *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences*. 2018; 30(s1). DOI: 10.21271/ZJPAS.30.s1.10

10. Mohammed O.K., Aziz Y.W. CFD modeling of simultaneous flow over broad crested weir and through pipe culvert using different turbulence models. *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences.* 2018; 30(5). DOI: 10.21271/ZJPAS.30.5.11

11. Majeed H.Q., Ghazal A.M. CFD simulation of velocity distribution in a river with a bend cross section and a cubic bed roughness shape. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 928:022038. DOI: 10.1088/1757-899X/928/2/022038

12. Kadia S., Kumar B., Pummer E., Ruther N., Ahmad Z. Experimental and CFD simulation studies on the flow approaching a type-a piano key weir. *EGU General Assembly.* 2021. DOI: 10.5194/egusphereegu21-10030

13. Saleh S.M., Husain S.M. Numerical study to evaluate the performance of nonuniform stepped spillway using ANSYS-CFX. *Polytechnic Journal*. 2020; 10(2):1-9. DOI: 10.25156/ptj.v10n2y2020.pp1-9

14. Vlasov V., Klopotov A., Plyaskin A., Bunkov V., Ustinov A. Evaluation of the stressed-deformed state of the vertical reservoir of a reinforced carbon bandage based on numerical researches in ANSYS PC. *Modern building materials and technologies : collection* of scientific articles of the III International Conference. 2020; 111-120. EDN FQWIJC. (rus.).

15. Fabrichnaya K.A., Farrahova Ch.F. Research stressed-deformed state of the node steel-concrete building frame in ANSYS PC. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2019; 4(11):25-35. EDN MMZSRF. (rus.).

16. Fabrichnaya K.A., Saubanova A.M. Investigation of the stress-strain state of the elements of the console support node in the ANSYS PC. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2019; 3(10):24-33. EDN MCSCSA. (rus.).

17. Trastyan N.A., Linkov N.V. Development of steel framework frames with regard to plastic deformations. *Engineering Journal of Don.* 2019; 1. (rus.).

18. Galieva A.B., Galiev D.N. Modeling of multistoried single-span frame structure with a force control in the beam-to-column nodes in ANSYS software. *Akademicheskiy vestnik UralNIIproekt RAASN*. 2015; 2:90-92. EDN UCTJTZ. (rus.).

19. Gribanov Ya.I., Kalugin A.V., Balakirev A.A. System for the strength analysis of the bearing structures of the sports facility covering. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 8:85-90. (rus.).

20. Golodnov O., Ivanov A., Psyuk V. Simulation of stress-strain state of steel structures due to the results of the survey. *Metall Constructions*. 2011; 17(3):167-175. EDN OBVAOT. (rus.).

21. Kravchenko G.M., Kostenko D.S. Behaviour

of screw connections in cold-formed steel structures. University News. North-Caucasian Region. *Technical*  *Sciences Series.* 2019; 4(204):51-56. DOI: 10.17213/ 0321-2653-2019-4-51-56. EDN WYAHRR. (rus.).

Received October 21, 2023. Adopted in revised form on October 23, 2023. Approved for publication on December 1, 2023.

BIONOTES: Anton S. Antonov — Candidate of Technical Sciences, chief engineer for equipment and hydraulic structures; Branch of JSC "Design, survey and research institute «Hydroproject» named after S.Y. Zhuka" — "Research institute of energy structures" (Branch of JSC "Institute Hydroproject" — "NIIES"); 2 Volokolamskoye shosse, Moscow, 125080, Russian Federation; Associate Professor, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7374-6867, Scopus: 57197566337, ResearcherID: AAC-7597-2022, ORCID: AAC-7597-2022; Antonov.An.S@yandex.ru;

Nikita P. Karablin — chief engineer for turbine and hydro-mechanical equipment; Branch of JSC "Design, survey and research institute «Hydroproject» named after S.Y. Zhuka" — "Research institute of energy structures" (Branch of JSC "Institute Hydroproject" — "NIIES"); 2 Volokolamskoye shosse, Moscow, 125080, Russian Federation; n.karablin@hydroproject.ru;

Konstantin Ju. Baud — Candidate of Technical Sciences, leading researcher; Branch of JSC "Design, survey and research institute «Hydroproject» named after S.Y. Zhuka" — "Research institute of energy structures" (Branch of JSC "Institute Hydroproject" — "NIIES"); 2 Volokolamskoye shosse, Moscow, 125080, Russian Federation; baudk@yandex.ru;

Igor V. Baklykov — chief specialist; Branch of JSC "Design, survey and research institute «Hydroproject» named after S.Y. Zhuka" — "Research institute of energy structures" (Branch of JSC "Institute Hydroproject" — "NIIES"); 2 Volokolamskoye shosse, Moscow, 125080, Russian Federation; ID RSCI: 915462, Scopus: 56538614100, ORCID: 0000-0002-8374-9046; moscow igor88@mail.ru.

*Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.*