

УДК 626/627

А. С. АНТОНОВ^{1,2}, канд техн. наук, доц., гл. инж. по оборудованию и гидротехническим сооружениям; **Н. П. КАРАБЛИН¹**, гл. инж. по турбинному и гидромеханическому оборудованию; **И. А. ФЕДОСЕЕВ¹**, нач. отдела неразрушающего контроля

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
КРЕСТОВИН ГИДРОАГРЕГАТОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПРОЕКТНЫХ
НАГРУЗОК**

¹Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект им. С. Я. Жука» – «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2.

Тел.: (495) 727-36-05, (495) 727-36-06; эл. почта: a.antonov@hydroproject.ru, n.karablin@hydroproject.ru, i.fedoseev@hydroproject.ru

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. Тел.: (495) 781-80-07, эл. почта: Antonov.An.S@yandex.ru

Ключевые слова: турбинное оборудование, крестовина рабочего колеса, групповое регулирование гидроагрегата, дефект, периодическое обследование, напряженно-деформированное состояние, расчетные исследования, техническое состояние, остаточный ресурс.

На примере металлической крестовины гидротурбины показано изменение проектных нагрузок при работе гидроагрегата в системе группового регулирования активной и реактивной мощности. Предложены необходимые меры в части проведения инструментального контроля и расчетных исследований по определению остаточного ресурса наиболее ответственных узлов оборудования при работе в указанной системе для уменьшения экономического ущерба эксплуатирующих организаций.

По состоянию на 2022 год в Российской Федерации эксплуатируются свыше 200 гидроэлектростанций (ГЭС) с установленной мощностью более 48 000 МВт, что составляет порядка 20 % от суммарной установленной мощности электростанций в стране. При этом парк гидрогенерирующего оборудования требует замены и модернизации, которая выполняется постепенно в соответствии с приказами и методиками министерства энергетики России.

В настоящее время ряд единиц оборудования эксплуатируется свыше нормативного или нескольких нормативных сроков службы. Данное оборудование имеет высокий индекс эксплуатационной готовности, при этом зачастую модернизация оборудования выполняется не комплексно, а адресно по отдельным узлам и системам. Такой подход позволяет оптимизировать затраты при сохранении высокой работоспособности и надежности генерирующего оборудования, а финансирование направить на наиболее актуальные проекты.

В ходе многолетнего опыта работы по обследованию состояния генерирующего оборудования было зафиксировано, что большинство ГЭС оснащено системами группового регулирования активной и реактивной мощности (ГРАМ) [1]. Данные системы позволяют осуществлять автоматизированное управление технологиче-



скими процессами энергообъектов, повышают надежность единой энергетической системы за счет увеличения скорости регулирования агрегатами с минимальными отклонениями нагрузки от графика, дополнительно возможна оптимизация расхода воды через гидроагрегаты.

Работа в ГРАРМ кроме положительного эффекта для энергосистемы несет в себе и скрытые угрозы для прочности отдельных элементов гидрогенерирующего оборудования. На момент проектирования оборудования (1970–1980 гг.) нагрузки и воздействия от эксплуатации с многократным изменением частоты и мощности не учитывались в проектных расчетах ввиду недостаточных вычислительных возможностей систем. По проведенному анализу, выполненному авторами, значительное увеличение нагрузок фиксируется на органах регулирования оборудования ГЭС [2].

В настоящее время возможности вычислительной техники шагнули далеко вперед, появились универсальные промышленные программные комплексы, позволяющие выполнять сложные междисциплинарные расчетные исследования различных конструкций с учетом геометрической и физической нелинейности поведения как материалов, так и самих конструкций. Следует отметить, что каждый гидроагрегат уникален по причине различных объемов капитальных и текущих ремонтов, особенностей эксплуатации, кроме того, имеет различные допустимые зоны благоприятной и неблагоприятной работы.

Например, увеличение нагрузки характеризуется отклонениями от нормального режима эксплуатации органов управления (увеличение режима работы насосов и температуры масла маслonaпорной установки (МНУ)). Для направляющего аппарата и рабочего колеса (РК) изменение проектных нагрузок может привести к изменению напряженно-деформированного состояния (НДС), выраженное в трещинообразовании на деталях кинематики механизма поворота.

При оснащении системой ГРАРМ оборудования, находящегося в эксплуатации более 20 лет, в большинстве случаев не проводятся ни комплексное инструментальное обследование, ни расчетные исследования по определению остаточного ресурса конструктивных элементов оборудования и закладных деталей сооружений. Отсутствие данных работ влечет за собой увеличение риска аварийного отключения оборудования.

Примером, подтверждающим необходимость проведения подобного рода расчетов, может служить повреждение крестовины РК гидротурбины типа Д45 (ввод в эксплуатацию осуществлен в 1976 г.), которое привело к вынужденному простоем оборудования в течение 6 месяцев и значительным ущербам для энергетической компании.

Конструктивно крестовина РК состоит из цилиндрической центральной части (цилиндра) Ø 1,9 м, высотой 0,755 м и из 9 лучей длиной 0,96 м каждый, расположенных радиально вокруг цилиндрической части. Материал крестовины – сталь 20ГСЛ. Фрагмент сборочного чертежа РК гидротурбины приведен на рис. 1 цв. вклейки. Данная конструкция луча крестовины представлена как консольная балка с приложением к ней момента от перестановочных усилий, обуславливающего возникновение условий изгиба [3].

Конструкция гидротурбины рассчитана так, что полный поворотный момент при всех эксплуатационных напорах и на всех режимах действует на «закрытие» лопастей. Вследствие этого необходимый перепад давления в сервомоторе РК на закрытие снижается, и требуется давление только для удержания лопастей в заданном положении или на «открытие» [4].

**К СТАТЬЕ А. С. АНТОНОВА, Н. П. КАРАБЛИНА,
И. А. ФЕДОСЕЕВА «НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОЕ СОСТОЯНИЕ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КРЕСТОВИН ГИДРОАГРЕГАТОВ
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПРОЕКТНЫХ НАГРУЗОК»**

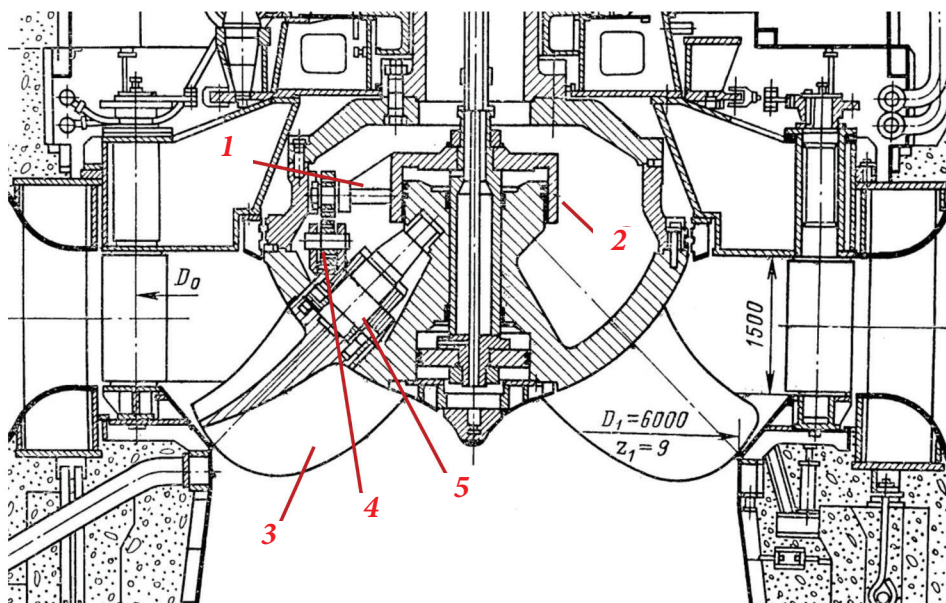


Рис. 1. Фрагмент сборочного чертежа рабочего колеса: 1 – луч крестовины, 2 – цилиндрическая центральная часть крестовины; 3 – лопасть рабочего колеса; 4 – рычаг; 5 – цапфа

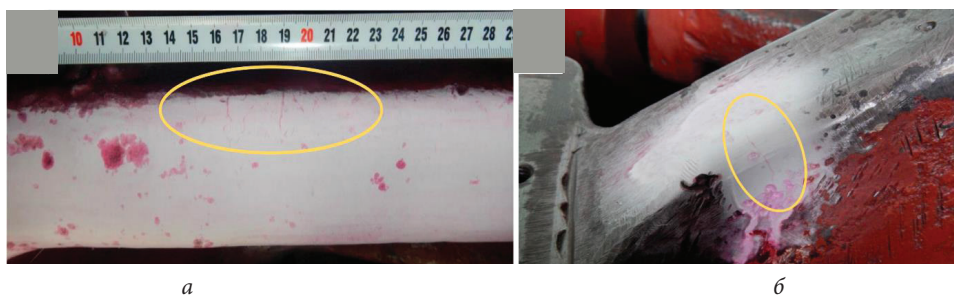


Рис. 2. Дефекты на лучах крестовины: а – в виде сетки поверхностных трещин (овалом отмечена зона наиболее явных трещин); б – трещина на луче крестовины № 6 (овалом отмечена трещина)

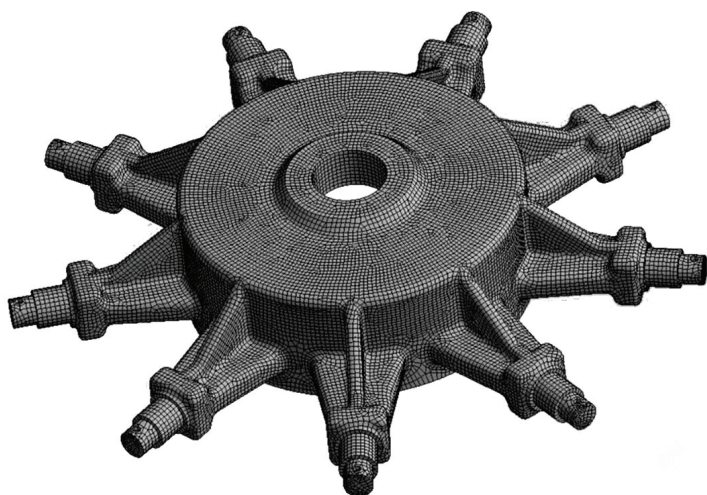


Рис. 3. Конечно-элементная аппроксимация математической модели крестовины рабочего колеса

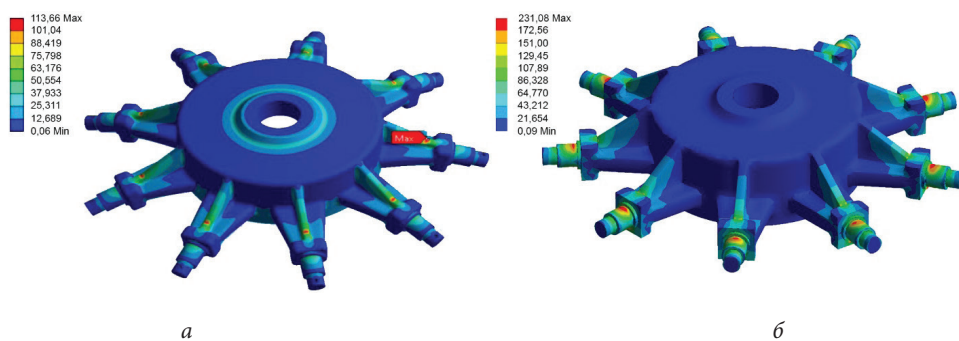


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений Мизеса в материале крестовины: *а* – расчет без учета работы ГРАММ; *б* – расчет при учете работы ГРАММ



За весь период эксплуатации до момента установки системы ГРАРМ (2008 г.) дефектов на крестовине или самом РК не фиксировалось. Впервые трещины обнаружены во время проведения капитального ремонта в 2014 г. При контроле неразрушающими методами выявлены поверхностные трещины в виде сетки на верхних гранях лучей (вертикальных ребрах жесткости) крестовины (рис. 2 цв. вклейки), а также трещина протяженностью до 26 мм и глубиной до 5 мм. Дефекты устранены методом выборки металла, способом, описанным в [5].

В связи с тем, что ГА на момент обнаружения дефектов отработал нормативный срок службы [6], для определения причин возникновения трещин проведены дополнительные исследования, направленные на определение возможности дальнейшей безопасной эксплуатации оборудования. Для этого проведено лазерное сканирование проточной части гидротурбины [7] и проверка отклонений в относительных положениях лопастей рабочего колеса с целью определения влияния данного отклонения на повреждения крестовины.

Для проверки прочности и несущей способности крестовины при воздействии штатной нагрузки в форме перестановочных усилий, возникающих при выполнении операций регулирования агрегатом, построена математическая модель крестовины РК в программном комплексе “ANSYS” и проведены расчеты напряженно-деформируемого состояния элементов оборудования. Общий вид математической модели, аппроксимированной сеткой конечных элементов, приведен на рис. 3 цв. вклейки.

Нагрузки от перестановочных усилий прикладывались к каждой лапе крестовины; полученные эквивалентные напряжения в металле представлены на рис. 4а цв. вклейки. Выполненный расчет показал, что напряжения в сечении луча с наименьшим моментом инерции не превосходят предел текучести стали 20ГСП [9]. Коэффициент запаса по прочности равен 4,7, что больше минимального отраслевого коэффициента запаса по прочности 1,7. При этом важно отметить, что расчеты выполнялись из расчета 700 пусков/остановок в год (согласно инструкции по эксплуатации гидротурбины и механической части генератора) [10]. Исходя из полученных результатов исследований, оборудование не полностью выработало свой ресурс и было допущено к дальнейшей эксплуатации.

При проведении капитального ремонта в 2020 г. методами неразрушающего контроля обнаружены множественные трещины на рабочих поверхностях галтельных переходов в сопряжении луча и посадочного диаметра, которые имеют протяженность, охватывающую всю рабочую поверхность узла. Месторасположение и протяженность обнаруженных трещин позволили сделать вывод об усталостном характере выявленных дефектов. За основную версию принято предположение, что данные нарушения напрямую связаны с работой ГРАРМ, увеличением числа пусков, остановок и нахождением гидроагрегата в неблагоприятном режиме работы при наборе и сбросе мощности. Повторный расчет НДС крестовины рабочего колеса выполнялся уже с прогнозом работы системы ГРАРМ (рис. 4б цв. вклейки).

Расчеты показали, что при учете множественных пусков-остановок при работе ГРАРМ фиксируется увеличение максимальных растягивающих напряжений в 2 раза, при этом они достигают предельных величин для металла данной марки. На рассмотренном примере крестовины, учитывая протяженность трещин, их усталостный характер и отсутствие остаточного ресурса, принято решение о замене крестовины рабочего колеса на новую ввиду невозможности ремонта.

Основные выводы

По результатам проделанной работы определена необходимость:



1. Учета режимов работы гидроэнергетического и гидросилового оборудования при частичной или полной замене узлов и элементов;
2. Учета влияния ГРАРМ на режимы работы гидроагрегатов (количество пусков/остановок) при расчете остаточного ресурса конструктивных элементов гидротурбин;
3. Выполнения комплексных расчетных исследований отдельных элементов оборудования и гидротехнических сооружений для подтверждения возможности безопасной замены, модернизации или эксплуатации оборудования;
4. Проведения инструментального контроля и расчетных исследований наиболее ответственных узлов оборудования при работе ГА в системе ГРАРМ;
5. Учета техногенных воздействий на элементы гидротехнических сооружений и узлы оборудования для оценки их прочности и надежности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СТО РусГидро 02.02.060-2011. Гидроэлектростанции. Технические и автоматизированные системы. Условия поставки. Нормы и требования. – Москва : РусГидро, 2011. – 50 с. – Текст : непосредственный.
2. СТО РусГидро 07.01.063-2011. Гидроэлектростанции. Условия предоставления продукции (услуг). Нормы и требования. – Москва : РусГидро, 2011. – 49 с. – Текст : непосредственный.
3. Кривченко, Г. И. Гидравлические машины: Турбины и насосы : учебник для вузов. – Москва : Энергия, 1978. – 320 с. – Текст : непосредственный.
4. СТО РусГидро 02.03.70-2011. Гидротурбины. Общие технические условия на капитальный ремонт. Нормы и требования. – Москва : РусГидро, 2011. – 70 с. – Текст : непосредственный.
5. СТО ЦКТИ 10.049-2013. Устранение дефектов в литых деталях энергооборудования с применением сварки без последующей термической обработки. – Санкт-Петербург : НПО ЦКТИ, 2013. – 32с. – Текст : непосредственный.
6. СТО РусГидро 02.03.77-2015. Гидроэлектростанции. Продление срока службы основного оборудования в процессе эксплуатации. Нормы и требования. – Москва : РусГидро, 2017. – 52 с. – Текст : непосредственный.
7. СТО 17330282.27.140.001 – 2006. Гидроэлектростанции. Методики оценки технического состояния основного оборудования. – Москва : ЕЭС России, 2006. – 378 с. – Текст : непосредственный.
8. Потапова, Л. Б. Механика материалов при сложном напряженном состоянии : как прогнозируют предел. напряжения? / Л. Б. Потапова, В. П. Ярцев. – Москва : Машиностроение-1, 2005. – 242 с. : ил., табл. – ISBN 5-94275-197-8. – Текст : непосредственный.
9. Марочник сталей и сплавов / составитель Ю. Г. Драгунов [и др.] ; под редакцией Ю. Г. Драгунова и А. С. Зубченко. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2015. – 1215 с. : табл. – ISBN 978-5-94275-788-5. – Текст : непосредственный.
10. СТО 17330282.27.140.005-2008. Гидротурбинные установки. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. – Москва : ЕЭС России, 2008. – 86 с. – Текст : непосредственный.

ANTONOV Anton Sergeevich^{1,2}, candidate of technical sciences, chief engineer for equipment and hydraulic structures; KARABLIN Nikita Pavlovich¹, chief engineer for turbine and hydro-mechanical equipment; FEDOSEEV Ivan Aleksandrovich¹, chief of the department of non-destructive inspection

STRESS-STRAIN STATE OF RUNNER CROSS HEAD METAL BY CHANGING PROJECT LOADS



¹JSC «Design, survey and research institute «Hydroproject» named after. S. Y. Zhuka» – «Research institute of energy structures»

2, Volokolamskoe highway, Moscow, 125993, Russia. Tel.: +7 (495) 727-36-05;

e-mail: a.antonov@hydroproject.ru, n.karablin@hydroproject.ru, i.fedoseev@hydroproject.ru

²Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)

Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russia. Tel.: +7 (495) 781-80-07;

e-mail: Antonov.An.S@yandex.ru

Key words: turbine equipment, runner cross head, complex control of hydroelectric installation, defect, inspection, stress-strain state, computational research, technical condition, residual life.

In the article, using the example of a runner cross head metal the change in design load during the operation of a hydropower unit in the complex control of hydroelectric installation is shown and the recommended guidelines are proposed of non-destructive control and calculation of stress-strain state of residual life of the most critical equipment units during the operation in it to reduce economic damage of operation organization.

REFERENCES

1. STO RusHydro 02.02.060-2011. Gidroelektrostantsii. Tekhnicheskie i avtomatizirovannye sistemy. Usloviya postavki. Normy i trebovaniya [Hydropower stations. Engineering and mechanized systems. Term of delivery. Standards and requirements]. Moscow, RusHydro, 2011, 50 p.
2. STO RusHydro 07.01.063-2011. Gidroelektrostantsii. Usloviya predstavleniya produktov (uslug). Normy i trebovaniya [Hydropower stations. Terms of service. Standards and requirements]. Moscow, RusHydro, 2011, 49 p.
3. Krivchenko G. I. Gidravlicheskie mashiny: Turbiny i nasosy [Hydraulic Machines: Turbines and Pumps] : uchebnik dlya vuzov. Moscow, Energiya, 1978, 320 p.
4. STO RusHydro 02.03.70-2011. Gidroturbiny. Obschie tekhnicheskie usloviya na kapitalny remont. Normy i trebovaniya [Turbines. Overhaul general specification. Standards and requirements]. Moscow, RusHydro, 2011, 70 p.
5. STO TsKTI 10.049-2013. Ustraneniye defektov v litykh detal'yakh energooborudovaniya s primeneniyyem svarki bez posleduyushey termicheskoy obrabotki [Elimination of defects in cast parts of power equipment using welding without subsequent heat treatment]. Saint-Petersburg, TsKTI, 2013, 32 p.
6. STO RusHydro 02.03.77-2015. Gidroelektrostantsii. Prodlenie sroka sluzhby osnovnogo oborudovaniya v protsesse ekspluatatsii. Normy i trebovaniya [Hydropower stations. Extending the service life of the main equipment during operation. Standards and requirements]. Moscow, RusHydro, 2017, 52 p.
7. STO 17330282.27.140.001 – 2006. Gidroelektrostantsii. Metodiki otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya osnovnogo oborudovaniya [Hydropower stations. Methods for assessing the technical condition of the main equipment]. Moscow, EES Rossii, 2006, 378 p.
8. Potapova L. B., Yartsev V. P. Mekhanika materialov pri slozhnom napryazhyonnom sostoyanii. Kak prognoziruyut predelnye napryazheniya? [Mechanics of materials in a complex stress state: how to predict the ultimate stress?]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2005, 242 p.: il., tabl. – ISBN 5-94275-197-8.
9. Dragunov Yu G., Zubchenko A. S., et al. Marochnik staley i splavov [Steels and alloys grade]. – 4-e izd., pererab. i dop. Moscow, Mashinostroenie, 2015. 1215 p.: tabl. – ISBN 978-5-94275-788-5.
10. STO 17330282.27.140.005-2008. Gidroturbinnyye ustanovki. Organizatsiya ekspluatatsii i tekhnicheskogo obsluzhivaniya. Normy i trebovaniya [Hydropower units. Organization of operation and maintenance. Standards and requirements]. Moscow, EES Rossii, 2008, 86 p.

© А. С. Антонов, Н. П. Караблин, И. А. Федосеев, 2022

Получено: 24.01.2022 г.