

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРОАГРЕГАТОВ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ПРОЕКТНОГО СРОКА СЛУЖБЫ

Е.В. Георгиевская

ОАО «НПО ЦКТИ», г.Санкт-Петербург, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-9894-8868>, e_georgievskaya@mail.ru,
GeorgievskaiEV@ckti.ru

Резюме: С увеличением срока службы энергетического оборудования, в том числе и гидроагрегатов ГЭС, вопросы обеспечения надежности и безопасности его эксплуатации становятся все более актуальными. Большая длительность эксплуатации и индивидуальные особенности гидроагрегатов не позволяют за пределами проектного срока службы применять методики оценки состояния гидроэнергетического оборудования, основанные на простой экстраполяции результатов предыдущих обследований.

Комплексный подход, объединяющий использование современных возможностей диагностических систем, достижений вычислительных технологий, обобщение теоретического опыта и результатов многочисленных экспериментальных исследований на модельных и натурных гидроагрегатах, дает возможность достоверно и обоснованно прогнозировать изменение технического состояния гидроагрегатов, не допуская снижения уровня их надежности и безопасности ниже приемлемого.

Материалы статьи были частично представлены на заседании круглого стола «Развитие гидроэнергетики Сибири» в рамках VII Сибирского энергетического форума 2016.

Ключевые слова: гидроагрегат, гидротурбина, ресурс, дефект, повреждение, рабочее колесо, надежность, безопасность, диагностирование, техническое состояние.

THE RELIABILITY AND OPERATION SAFETY OF HYDRAULIC UNITS BEYOND DESIGN LIFETIME

E.V. Georgievskai¹

¹JSC «NPO CKTI», St. Petersburg, Russia

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-9894-8868>, e_georgievskaya@mail.ru,
GeorgievskaiEV@ckti.ru

Abstract: The issues of reliability and operation safety of power equipment, including hydraulic units of hydropower plants, are becoming more and more relevant with the increasing the service life. The long operation period and the individual characteristics of hydraulic units do not allow to apply outside the design lifetime the methodology for assessing the technical condition based only a simple extrapolation of the results of previous surveys. The integrated approach that combines application of modern diagnostic systems capabilities and achievements of computing technologies, the generalization of theoretical experience and the results of numerous experimental investigations using model and full-scale hydraulic units makes it possible to reliably and reasonably predict changes in the technical condition of hydraulic units, not allowing to reduce the reliability and safety below acceptable level. The

material of this article was partially presented at the round table "Siberia Hydropower Development" at the VII Siberian energetic forum in 2016.

Keywords: hydropower unit, hydraulic turbine, lifetime, defect, fault, runner, reliability, safety, diagnosing, technical condition

В настоящее время большинство гидроагрегатов (ГА), эксплуатируемых на российских ГЭС, выработали свой проектный (назначенный) ресурс, равный 30 годам [1, 2]. Многие введенные в эксплуатацию еще в 60-70-е годы XX века агрегаты, в том числе и мощные, сейчас имеют наработку уже свыше 350 тыс. час. (или более 40–50 лет) и не планируются для замены в ближайшее время.

Вопросы надежности и безопасности эксплуатации энергооборудования тесно переплетаются с понятием ресурса. При этом надежность прежде всего подразумевает способность безотказно выполнять заданные функции, т.е. вырабатывать электроэнергию, а безопасность связывается с отсутствием недопустимого риска для людей и окружающей среды. Ресурс оборудования трактуется как продолжительность нахождения объекта в работоспособном состоянии, т.е. наработка до перехода в предельное состояние. Предельное состояние может быть вызвано не только физическим износом невосстанавливаемых элементов оборудования, но и, например, невозможностью дальнейшего применения агрегата по назначению вследствие недопустимых отклонений от требований безопасности, экономичности или эффективности.

Следует отметить, что индивидуальный ресурс гидроагрегата, зависящий от совокупности особенностей сборки и монтажа, фактических свойств используемых материалов, реальных параметров эксплуатации, проведенных ремонтных операций и ряда других факторов, может значительно превышать проектный, иногда в 2–3 раза. Именно индивидуальность каждого конкретного гидроагрегата, его преимущества над «среднестатистическим», с точки зрения фактического технического состояния, и позволяют допускать дальнейшую надежную и безопасную эксплуатацию ГА за пределами проектного срока службы.

Кроме того, важно понимать, что в процессе эксплуатации ГЭС ресурсом основного гидроэнергетического оборудования можно и нужно управлять, планируя своевременные восстановительные ремонты, замену и модернизацию его ресурсоограничивающих элементов, оптимизируя режимы работы агрегатов в рамках имеющихся возможностей по регулированию.

Очевидно, что с увеличением срока службы гидроагрегатов вопросы обеспечения надежности и безопасности их эксплуатации становятся все более актуальными вследствие повышения риска возникновения следующих негативных ситуаций:

- техногенных аварий или катастроф;
- угрозы здоровью и жизнедеятельности населения;
- нарушения энергообеспечения населения;
- материальных потерь в связи с отказом или разрушением оборудования;
- увеличения времени простоя агрегатов в ремонте и пр.

Кроме того, следует помнить, что после длительной наработки ГА меняются и основные приоритеты, определяющие задачи эксплуатации оборудования: вместо эффективности, экономичности, снижения сроков самоокупаемости на первый план зачастую выходят обеспечение возможности дальнейшей эксплуатации, поддержание работоспособности на необходимом уровне, т.е. выполнение хотя бы части заданных функций.

Изменение приоритетов влечет за собой и изменение принципов диагностики гидроагрегатов, что, прежде всего, отражается на решаемых задачах (рис. 1). В рамках 30-

летнего проектного срока службы для своевременного выявления повреждений, препятствующих дальнейшей эксплуатации, как правило, достаточно проводить периодический осмотр и штатный контроль гидротурбинного оборудования в соответствии с требованиями нормативных документов, рекомендациями завода-изготовителя и сложившимся опытом эксплуатации аналогичных агрегатов. При этом основанием для установления сроков, методов и объема контроля служит статистическая база данных об отказах, повреждениях и выявленных дефектах оборудования данного типа или аналогичного. После длительной наработки подход к диагностированию должен быть существенно изменен: выбор методов, средств, объемов и сроков проведения диагностирования должен быть направлен на оценку индивидуального ресурса ГА.



Рис. 1. Задачи диагностики на различных стадиях жизненного цикла

* НТД – нормативно-техническая документация

Целесообразно отметить основные факторы, определяющие отличительные особенности, на которые необходимо обращать внимание при решении вопроса о продлении дальнейшей эксплуатации.

Во-первых, заложенные на стадии проектирования и монтажа особенности конструкции. В отличие от других энергетических машин статор гидроагрегата представляет собой строительную конструкцию, а сборка происходит прямо на площадке строительства ГЭС. Многие нормируемые параметры, такие как уклон вала, неперпендикулярность подпятника, зазоры между вращающимися и неподвижными частями, имеющие большое значение для надежности и безопасности эксплуатации гидрооборудования, а также оказывающие существенное влияние на продолжительность его безотказной работы, устанавливаются именно в процессе монтажа агрегата. Это приводит к уникальности каждого агрегата, даже относительно установленных в одном машинном зале аналогичных ГА [3, 4].

Во-вторых, особенности эксплуатации оборудования. В настоящее время, как на российских, так и на зарубежных ГЭС, весьма актуальным является вопрос изменения режимов работы ГА относительно заложенных на стадии проектирования [5, 6, 7, 8]. Это связано с использованием высокой маневренности гидроагрегатов для покрытия пиков мощности и обеспечения стабильности энергетических систем, а также все более широким использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии (ветровой, солнечной, приливной, волновой и т.п.). Следует отметить, что режимы работы ГА могут существенно отличаться не только на разных ГЭС, но и в пределах групп

агрегатов одной станции.

При оценке возможности дальнейшей эксплуатации необходимо учитывать, что выработка ресурса агрегатом определяется не только (а иногда и не столько) временем его наработки на номинальном режиме. Значительные динамические нагрузки на элементы ГА возникают в режимах «пуск-останов» и на переходных режимах [9]. Кроме того, существует опасность возникновения резонансных явлений [10, 11] и повышенных вибрационных нагрузок на режимах частичной мощности или при эксплуатации гидроэнергетического оборудования на форсированных по мощности или расходу режимах. Даже кратковременные (в масштабах сроков эксплуатации ГА), но высокочастотные нагрузки могут привести к быстрому зарождению и росту дефектов вплоть до критических размеров, что вызывает необходимость вывода оборудования из эксплуатации или его аварийный останов [5, 6, 7, 8, 12, 13].

В третьих, ремонтные операции по устранению или предотвращению развития появляющихся повреждений. Это, прежде всего, относится к выборкам в зонах зарождения трещин и наплавкам металла в зонах развитой кавитации. Многократное проведение указанных операций может не только изменить локальную геометрию в зоне проведения работ, но и повлиять на распределение внешних нагрузок и остаточных напряжений в основных элементах ГА, что будет сказываться на его фактическом ресурсе. С учетом ограниченности возможностей проведения ремонтно-восстановительных работ в пределах ГЭС не всегда удастся обеспечить необходимый уровень соответствия геометрических и технологических параметров исходным проектно-конструкторским значениям.

В четвертых, временной фактор, который обуславливает степень деградации материала под действием коррозионно-агрессивной среды и уровень развития дефектов в условиях фактической эксплуатации.

Известно, что усталостные характеристики металла в водной среде существенно снижаются со временем, не ограничиваясь, как на воздухе, некоторым асимптотическим значением (рис. 2). На больших базах циклического нагружения (порядка 10^{10} циклов), что соответствует примерно 30 и более годам эксплуатации с частотой 40–50 Гц – характерной частотой внешних нагрузок для радиально-осевых (РО) гидротурбин – условный предел усталости для распространенных в гидротурбостроении сталей не превышает 10–30 МПа и значительно уступает пределу усталости в воздушной среде. Кроме того, с увеличением времени наработки увеличивается и разброс усталостных характеристик материала. Использование «среднестатистических» значений характеристик значительно снижает достоверность выполняемых оценок прочности, надежности и ресурса ГА после продолжительной эксплуатации, что может привести к необоснованно оптимистическим прогнозам.

Аналогичные соображения касаются и скорости развития дефектов, которая определяется размерами и положением исходных дефектов, фактически действующими нагрузками, а также характеристиками трещиностойкости материала. Наибольшую опасность с точки зрения нарушения надежности и безопасности эксплуатации представляют трещины и трещиноподобные дефекты. Неадекватный учет этих факторов может привести к существенно завышенным значениям ресурсных параметров, что существенно повышает риск аварийной ситуации или незапланированного останова оборудования.

Все выше отмеченные факторы в совокупности отражаются на техническом состоянии гидроэнергетического оборудования, что подтверждается богатым накопленным в ОАО «НПО ЦКТИ» опытом освидетельствований, проведенных на отработавших длительный период агрегатах (рис. 3). Для обеспечения необходимого уровня надежности и безопасности ГА простой экстраполяции изменения технического состояния по данным предыдущих обследований становится недостаточно (рис. 4), т.к.

это может привести к катастрофической ошибке при оценке сроков возможной эксплуатации.

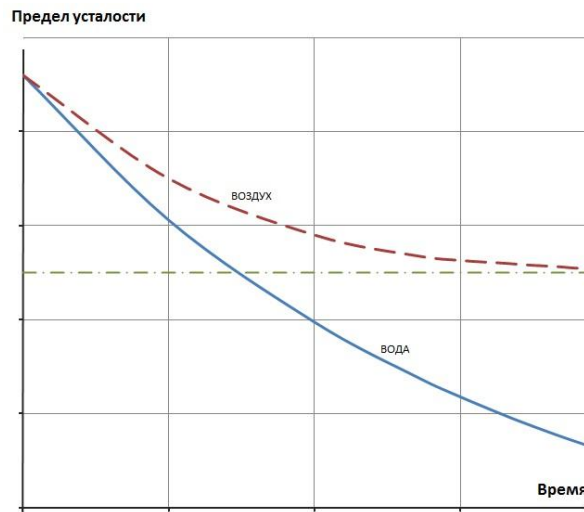


Рис. 2. Изменение предела усталости во времени



а) трещина в зоне перехода пера во фланец лопасти поворотной лопасти гидротурбины



б) трещина в зоне конического перехода вала радиально-осевой гидротурбины



в) выкрашивание резьбы на крепежных элементах ПЛ гидротурбины



г) дефект в зоне приварки лопасти к ободу РО гидротурбины

Рис. 3. Примеры повреждений элементов ГА

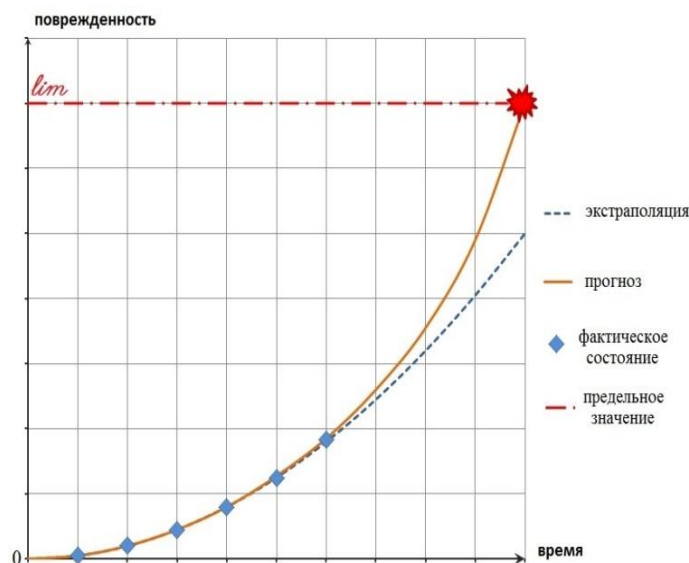


Рис. 4. Прогнозирование поврежденности ГА

Альтернативой является построение расчетного индивидуального прогноза накопления поврежденности оборудования с учетом всех его существенных особенностей, влияющих на ресурс, как это широко используется в других областях энергетики и машиностроения [14, 15, 16]. Для гидроагрегата за пределами проектного срока службы прогноз должен позволять:

- не допускать возникновения аварий и неплановых остановов;
- не допускать снижения безопасности и надежности эксплуатации ниже приемлемого уровня;
- обнаруживать дефекты и отклонения на ранних стадиях развития, пока они не оказывают существенного влияния на безопасность и надежность;
- своевременно выявлять подлежащие ремонту, замене или модернизации узлы и детали, препятствующие дальнейшей эксплуатации;
- обоснованно продлевать срок службы ГА.

Для построения такого прогноза необходимо разработать и нормативно закрепить систему критериев предельных состояний (критериев разрушения) и соответствующих им коэффициентов запаса, отражающих основные механизмы накопления поврежденности и истощения ресурса. Также должны быть разработаны требования к математическим моделям накопления поврежденности ресурсопределяющими узлами ГА (рабочее колесо, вал, крышка гидротурбины, ответственные крепежные элементы и т.п.), позволяющие проследить изменение технического состояния ГА от момента ввода в эксплуатацию до достижения предельного состояния. В настоящее время в полном объеме для объектов гидроэнергетики такой подход не разработан, но периодически предпринимаются попытки решения вопроса о достоверной оценке ресурса и прогнозировании технического состояния отдельных элементов на продлеваемый период [17, 18, 19].

Индивидуальный характер и необходимая глубина (не менее межремонтного периода 5–7 лет) прогноза требуют большого объема исходных данных, которые могут быть получены на основании следующих работ:

- анализа проектной, конструкторской, ремонтной и эксплуатационной документации с целью определения особенностей ГА, в том числе наиболее нагруженных элементов, расчетных параметров, режимов работы и пр.;

- всестороннего контроля состояния металла неразрушающими методами (визуально-измерительный контроль, цветная дефектоскопия, ультразвуковая диагностика, вихре-токовый контроль, толщинометрия и пр.) с целью выявления местоположения, ориентации и размеров видимых и/или скрытых дефектов, развитие которых в межремонтный период может привести к отказу оборудования;

- лабораторных исследований вырезок металла основных элементов ГА с целью определения фактических физико-механических, усталостных свойств и характеристик трещиностойкости;

- проведения специальных испытаний и измерений с целью уточнения фактически действующих нагрузок на элементы ГА (определение жесткостных характеристик опорных узлов, собственных частот, тензометрирование, кавитационные испытания и т.п.);

- определения остаточных напряжений в сварных швах и зонах ремонтных наплавов с целью их учета при оценке усталостной прочности и долговечности.

Современный уровень развития методов и средств неразрушающего контроля, широкие возможности диагностических систем, достижения вычислительной техники, большие возможности многофункциональных расчетных пакетов программ на основе метода конечных элементов позволяют в настоящее время строить обоснованные и достоверные прогнозы, по крайней мере, на период до следующего обследования (5–7 лет). Но важно помнить, что указанные инструменты сами по себе еще не являются залогом успешного решения задачи об обеспечении надежности и безопасности эксплуатации гидроэнергетического оборудования. Достоверные прогнозы базируются на глубоком знании теоретических основ физических процессов, определяющих поведение ГА в процессе эксплуатации, богатом опыте экспериментальных исследований на модельных и натурных гидроагрегатах, широких и глубоких компетенциях специалистов, а также многолетних практических наработках по данному направлению работ. Все перечисленное объединено в разработанном в ОАО «НПО ЦКТИ» комплексном подходе к оценке ресурса с позиций обеспечения надежности и безопасности гидроагрегатов, опробованном на ряде ГЭС.

Выводы

1. Достоверная оценка индивидуального ресурса гидроагрегата позволяет обеспечить надежность и безопасность его работы за пределами проектного срока службы, сократить затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание ГА, обоснованно и своевременно запланировать замену или модернизацию его элементов и узлов.

2. Для построения достоверного прогноза технического состояния оборудования за пределами проектного срока службы разработан комплексный подход, объединяющий расчетные и экспериментальные методы и учитывающий индивидуальные конструктивные, технологические и эксплуатационные особенности.

3. Разработанный на основании оценки индивидуального ресурса подход во многих случаях позволяет гарантировать безопасную и надежную работу оборудования на длительный период даже за пределами проектного срока службы и/или при наличии дефектов и отклонений от требований НТД.

Литература

1. ГОСТ 26945-91. Турбины гидравлические вертикальные. Общие технические требования.

2. СТО РусГидро 02.03.77-2011. Гидроэлектростанции. Правила продления срока службы основного оборудования в процессе эксплуатации. Нормы и требования.

3. Мигуренко В.Р., Станкевич В.Л. Радикальные изменения в подходе к монтажу

гидроагрегатов // Гидротехника. 2009. № 1. С. 65–67.

4. Ключац А.А. Влияние асимметрии спиральной камеры на вибрации гидроагрегата // Гидротехническое строительство. 2013. № 10. С. 10–18.

5. Huang X., Chamberland-Lauzon J., Oram C., Klopfer A., Ruchonnet N. Fatigue analyses of the prototype Francis runners based on site measurements and simulations // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Volume 22. Number 1. Pp. 12014-12021. doi: 10.1088/1755-1315/22/1/012014.

6. Huang X., Oram C., Sick M. Static and dynamic stress analyses of the prototype high head Francis runner based on site measurement // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Volume 22. Number 3. Pp. 32052-32061. doi:10.1088/1755-1315/22/3/032052.

7. Seidel U., Mende C., Hübner B., Weber W., Otto A. Dynamic loads in Francis runners and their impact on fatigue life // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Volume 22. Number 3. Pp. 32054-32062. doi:10.1088/1755-1315/22/3/032054.

8. Thibault D., Gagnon M., Godin S. Bridging the gap between metallurgy and fatigue reliability of hydraulic turbine runners // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Volume 22. Number 1. Pp. 12019-12029. doi: 10.1088/1755-1315/22/1/012019.

9. Георгиевская Е.В. Влияние режимных факторов на прочность и ресурс лопастных систем мощных гидротурбин // Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, 9–10 июня 2016 года. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2016. С. 13–20.

10. He L.Y., Wang Z.W., Kurosawa S., Nakahara Y. Resonance investigation of pump-turbine during startup process // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Volume 22. Number 3. Pp. 32024-32031. doi: 10.1088/1755-1315/22/3/032024.

11. Конаков А.А. Об исследовании резонансных явлений в конструкции вертикального гидроагрегата // Гидротехническое строительство. 2016. № 1. С. 14–17.

12. Storli P.-T., Nielsen T. K. Dynamic load on a Francis turbine runner from simulations based on measurements // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Volume 22. Number 3. Pp. 32056-32064. doi: 10.1088/1755-1315/22/3/032056.

13. Xin Liu, Zhengwei Wang, Lingjiu Zhou, Xavier Escaler, Yongyao Luo. Failure investigation of a Francis turbine under the cavitation conditions // ISROMAC 2016 International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. Hawaii, Honolulu. April 10-15, 2016.

14. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Часть 2: Обоснование ресурса и безопасности. Новосибирск: Наука, 2005. 610 с.

15. Махутов Н.А. Управление ресурсом безопасной эксплуатации объектов техносферы // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81, № 12. С. 5–7.

16. Москвичев В.В., Анискович Е.В., Буров А.Е., Доронин С.В., Зырянов И.А., Лепихин А.М., Черняев А.П. Чернякова Н.А. Проблемы конструкционной прочности и безопасности технических систем. Красноярск: ИВМ СО РАН, 2006. 100 с.

17. Судаков А.В., Георгиевская Е.В. Проблемы нормативного и методологического обеспечения оценки прочности и ресурса гидротурбин // Гидротехническое строительство. 2014. № 2. С. 52–58.

18. Гончар А.В., Руденко А.Л., Мишакин В.В., Ключников В.А., Байков А.И. Оценка ресурса лопаток направляющего аппарата ГЭС с учетом дефектности и коррозионной поврежденности // Гидротехническое строительство. 2016. № 6. С. 11–15.

19. Левина С.М., Новкунский А.А., Шевченко Ю.В. Оценка остаточного ресурса металлической облицовки турбинных водоводов с учётом её фактической толщины // Гидротехническое строительство. 2016. № 3. С. 31–37.

Авторы публикации

Георгиевская Евгения Викторовна – канд. физ.–мат. наук, заведующая лабораторией прочности турбин ТЭС, АЭС и ГЭС, ОАО «НПО ЦКТИ», г. Санкт-Петербург. E-mail: e_georgievskaya@mail.ru.

References

1. GOST 26945-91 Hydraulic-conversion turbines. General-purpose requirements [Hydraulic vertical turbines. General technical requirements]. (In Russian).
2. STORus Hidro 02.03.77-2011 Hydroelectric power station. Rule of production in accordance with the requirements laid down in the technical rationale. Maintenance. Maintenance. The duration of the extension of the main equipment during operation. Standards and requirements. (In Russian).
3. Migurenko V.R., Stankevich V.L. Radical changes in the approach to the Mounting of Hydra aggregates [Radical changes in the approach to the installation of hydraulic assemblies]. *Gidrotehnika*. 2009. № 1. P. 65–67. (In Russian).
4. Klyukach AA [Effect of the spiral chamber]. *Hydrotechnical development [Hydraulic engineering]*. 2013. № 10. P. 10–18. (In Russian).
5. Juan H., Camerlend-Lauzon J., Oram K., Klopfer A., Ruhonnet H. Analysis of the fatigue of Francis prototypes based on measurements and site modeling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*. 2014. Volume 22. Number 1. Pp. 12014–12021. Doi: 10.1088 / 1755-1315 / 22/1/012014.
6. Juan H., Oram S., Strong M. Static and dynamic stress analysis of the prototype of the High Francis-runner on the basis of the measurement of the site. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*. 2014. Volume 22. Number 3. Pp. 32052–32061. Doi: 10.1088 / 1755-1315 / 22/3/032052.
7. Seidel U., Mende S., Hübner B., Weber V., Otto A. Dynamic loads in Francis runners and their influence on the life of fatigue. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*. 2014. Volume 22. Number 3. Pp. 32054–32062. Doi: 10.1088 / 1755-1315 / 22/3/032054.
8. Thibault D., Gagnon M., Godin S. Bridging the gap between metallurgy and fatigue reliability of hydraulic turbines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*. 2014. Volume 22. Number 1. Pp. 12019–12029. Doi: 10.1088 / 1755-1315 / 22/1/012019.
9. Georgievskaya E.V. Influence of the Factor Factors on the Prophecy of the Fighter Flyers Mistematic hydroturbines [The influence of fashion factors on the structural strength and durability of blade systems Power turbines]. *Hydraulic machines, hydropneumatic and hydropneumatic automation. Current status and development prospects. International Scientific Conference, 2016. Saint Petersburg*. 13–20. (In Russian).
10. He L.Ya., Van Z.V., Kurosawa S., Nakahara J. Rezonans Investigation of the pumping turbine during start-up. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*. 2014. Volume 22. Number 3. Pp. 32024–32031. Doi: 10.1088 / 1755-1315 / 22/3/032024.
11. Konakov A.A. RESEARCH OF RESONANT PHENOMENA IN THE DESIGN OF VERTICAL HYDROGENAGRATE [On the study of resonant phenomena in a vertical hydraulic block]. *Hydrotechnical development [Hydraulic engineering]* .. 2016. № 1. P. 14–17. (In Russian).
12. Stoli P.-T., Nielsen TK Dynamic load on the runner from the Francis turbine from simulations based on measurements. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*. 2014. Volume 22. Number 3. Page. 32056–32064. Doi: 10.1088 / 1755-1315 / 22/3/032056.
13. Xin Liu, Zhengwei Wang, Lingjiu Zhou, Xavier Escaler, Yongyao Luo. Failure Investigation of the Francis turbine in cavitation conditions. *International Symposium ISROMAC 2016 on the phenomena of transport and dynamics of rotating machines. Hawaii, Honolulu. April 10-15, 2016*.
14. Makhutov NA, "Constructive Technology", "Resources Security Technology". Part 2: Review Resursay Security. [Structural strength, life expectancy and technical safety. Part 2: Justification of life expectancy and safety. Novosibirsk: Science, 2005. 610 p. (In Russian).

15. NA Makhutov. MANAGEMENT OF THE RESPUSE OF SAFE EXPOSURE "ektov Tehhnosfery. [Lifetime Management for safe operation of the technosphere] .Zavodskaya laboratory. Diagnostics of materials. Diagnosis of materials .2015. 81. T. number 12. S. 5–7.
16. Moskvichev VV, Aniskovich EV, Burov AE, Doronin SV, Zyryanov IA, Lepikhin AM, Chernyaev AP, Chernyakova NA Problems of constructional technology Safety Technical systems. Krasnoyarsk: IVMSORAN, 2006. 100 p.
17. Sudakov AV, Georgievskaya EV The problem of a normalized and methodological justification of the evaluation of the strength and remaining service life of hydraulic turbines. Energy technology and technology. 2014. T. 48. № 2.C.C.C. 117–122.
18. Gonchar AV, Rudenko AL, Mishakin VV, Klyushnikov VA, Baikov AI From the price, a shortage of fodders for the HPP was taken into account, taking into account the shortcomings of the electrical equipment. [Evaluation of the operating characteristics of the guide vanes, taking into account the presence of defects and damage to corrosion]. Hydrotechnical development [Hydraulic engineering]. 2016. № 6. P. 11–15. (In Russian).
19. Levina SM, Novkunsky AA, Shevchenko Yu.V. Estimation of the residual life of the metal lining of turbine conduits taking into account its actual thickness // Hydrotechnical construction. 2016. № 3. P. 31-37.

Authors of the publication

Georgievskaya Evgeniia – Ph.D. (Physics & Mathematics), Head of the Turbine Strength Test Laboratory for the Thermal, Nuclear and Hydro Power Plants, JSC «NPO CKTI».

Поступила в редакцию

25 апреля 2017 г.