

DOI: 10.18721/JEST.230217

УДК 621.224

Ю.С. Васильев¹, Ю.К. Петреня², Е.В. Георгиевская³

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация
2 — ПАО «Силловые машины», Санкт-Петербург, Российская Федерация
3 — ОАО «НПО ЦКТИ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

О РЕСУРСАХ ГИДРОТУРБИН: ОБЗОР ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

В статье приведен обзор за последние несколько лет зарубежных публикаций, касающихся проблем оценки ресурса, диагностирования повреждений элементов гидротурбин, а также оптимизации режимов работы и сроков проведения плановых ремонтно-восстановительных работ для обеспечения безаварийной работы агрегатов. На примере ряда аварий, зафиксированных на зарубежных ГЭС и нашедших отражение в открытых источниках информации, подтверждается усталостный характер повреждений, свойственный оборудованию после длительной эксплуатации. Особое внимание уделено влиянию на ресурсные характеристики непроектных режимов работы гидроагрегатов, учету конструктивных и технологических концентраторов напряжений, условиям образования и развития дефектов (трещины). Представлены используемые методы определения напряженно-деформированного состояния наиболее напряженных узлов и деталей гидротурбин как одного из основных этапов оценки ресурса. Отмечены особенности и проблемы их применения на практике, определяемые характерными условиями эксплуатации оборудования, техническими и финансовыми возможностями. В обзоре обозначены основные тенденции развития подходов к проблеме оценки ресурса гидрооборудования, которые следуют из высоких современных требований, предъявляемых к условиям использования гидроэнергетических мощностей. По тексту статьи приводятся принятые в англоязычных источниках устоявшиеся аббревиатуры, понятия и термины, касающиеся затрагиваемых в статье вопросов. На основе анализа отраженных в обзоре публикаций оценена возможность и целесообразность использования зарубежного опыта для оценки ресурса оборудования российских ГЭС за пределами проектного срока службы и намечены перспективы развития подходов к оценке ресурса гидротурбин на ближайшее время. ГИДРОТУРБИНА; РЕСУРС; ПОВРЕЖДЕНИЕ; КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ; ТРЕЩИНА; СОБСТВЕННАЯ ЧАСТОТА; РЕЗОНАНС; ДЕМПФИРОВАНИЕ.

Ссылка при цитировании:

Ю.С. Васильев, Ю.К. Петреня, Е.В. Георгиевская. О ресурсах гидротурбин: обзор зарубежной литературы // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 2. С. 184–204. DOI: 10.18721/JEST.230217

Yu.S. Vasiliev¹, Yu.K. Petrenya², E.V. Georgievskaya³

1 — Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, Saint-Peterburg, Russian Federation
2 — PJSC «POWER Machines», Saint-Peterburg, Russian Federation
3 — JSC «NPO CKTI», Saint-Peterburg, Russian Federation

LIFETIME OF HYDRO TURBINES: A REVIEW OF FOREIGN LITERATURE

The article presents a review of foreign literary sources over the past few years relating to problems of lifetime estimation, diagnostics of turbine damage, optimization of operation modes and planning of

repair works for ensuring trouble-free operation of units. The damages, typical for equipment after long operation, have a fatigue nature that is confirmed by the analysis of causes of several accidents at foreign hydroelectric power stations described in open sources of information. Particular attention is paid to the impact on the lifetimes of off-design operating conditions of hydraulic units, taking into account the constructive and technological stress concentrators, appearance and growth of defects (cracks). The article presents the methods currently used for stress-strain estimation of the most important turbine components as one of the main stages of lifetime estimation, the features and problems of their practical application, which are determined by typical operating conditions, technical and financial capabilities. The review highlights the main tendencies in developing the approaches to the problem of lifetime estimation of hydraulic equipment which determined by the highest modern requirements to the conditions of using the hydropower generation capacities. The established English abbreviations, concepts and terms relating to matters covered in this paper are given in the text. The possibility and feasibility of using foreign experience for lifetime estimation of Russian hydroelectric equipment outside the design lifetime are assessed based on the analysis of the publications discussed in this review. The prospects for developing the approaches to lifetime estimation of hydro turbines in the near future are also presented.

HYDROTURBINE; LIFETIME ESTIMATION; DAMAGE; STRESS CONCENTRATION; CRACK; EIGENFREQUENCY; RESONANCE; DAMPING.

Citation:

Yu.S. Vasiliev, Yu.K. Petrenya, E.V. Georgievskaya, Lifetime of hydro turbines: a review of foreign literature, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (02) (2017) 184–204, DOI: 10.18721/JEST.230217

Введение

До недавнего времени как в России, так и за рубежом надежность и безопасность в гидроэнергетике ассоциировалась прежде всего с крупными плотинами, которые рассматривались как основной источник потенциальной крупномасштабной аварии. При этом вопросам оценки ресурса (lifetime/service life estimation) гидроагрегатов (ГА) не уделялось достаточного внимания, поскольку спроектированное более 40–50 лет назад гидрооборудование, как правило, имело значительные запасы по прочности, что позволяло его безаварийно эксплуатировать в течение десятков лет.

Однако далеко не полная статистика повреждений и отказов гидротурбин (ГТ) [1–17] показывает, что только за счет избыточной прочности конструкции обеспечить длительную безаварийную работу оборудования не представляется возможным.

На рис. 1 приведены некоторые примеры поврежденных узлов двух наиболее распространенных в России типов турбин: радиально-осевых (РО) и поворотно-лопастных (ПЛ). На рис. 2 показана типовая конструкция рабочих колес (РК) гидротурбин обоих типов.

В последние годы интерес к проблеме достоверной оценки ресурса гидротурбин неизменно возрастает, что объясняется следующими основными факторами:

значительным количеством мощных гидротурбин, отработавших уже более 40 лет [6, 18, 19, 20], исчерпание физического ресурса которых может привести к крупномасштабной аварии, представляющей серьезную опасность для населения, экономики и экологии целого региона;

существенным изменением режимов эксплуатации гидроагрегатов в связи с все более широким распространением возобновляемых источников энергии (ВИЭ) — солнечной, ветровой, приливной и т. п. [21–33], отличающихся высоким уровнем нестабильности выдаваемой мощности;

постоянно пополняющейся статистикой отказов и внеплановых остановов, вызванных повреждением или разрушением ответственных элементов ГТ, а также обнаружением при плановых обследованиях недопустимых для дальнейшей эксплуатации дефектов усталостного происхождения [1–16];

невозможностью объяснения многих из ранее зафиксированных отказов ГТ на основе имеющихся представлений о действующих механизмах повреждения гидрооборудования;

постоянно ужесточающимися требованиями к вновь проектируемому гидрооборудованию, которое должно совмещать высокие показатели эффективности, маневренности, надежности с низкой стоимостью изготовления

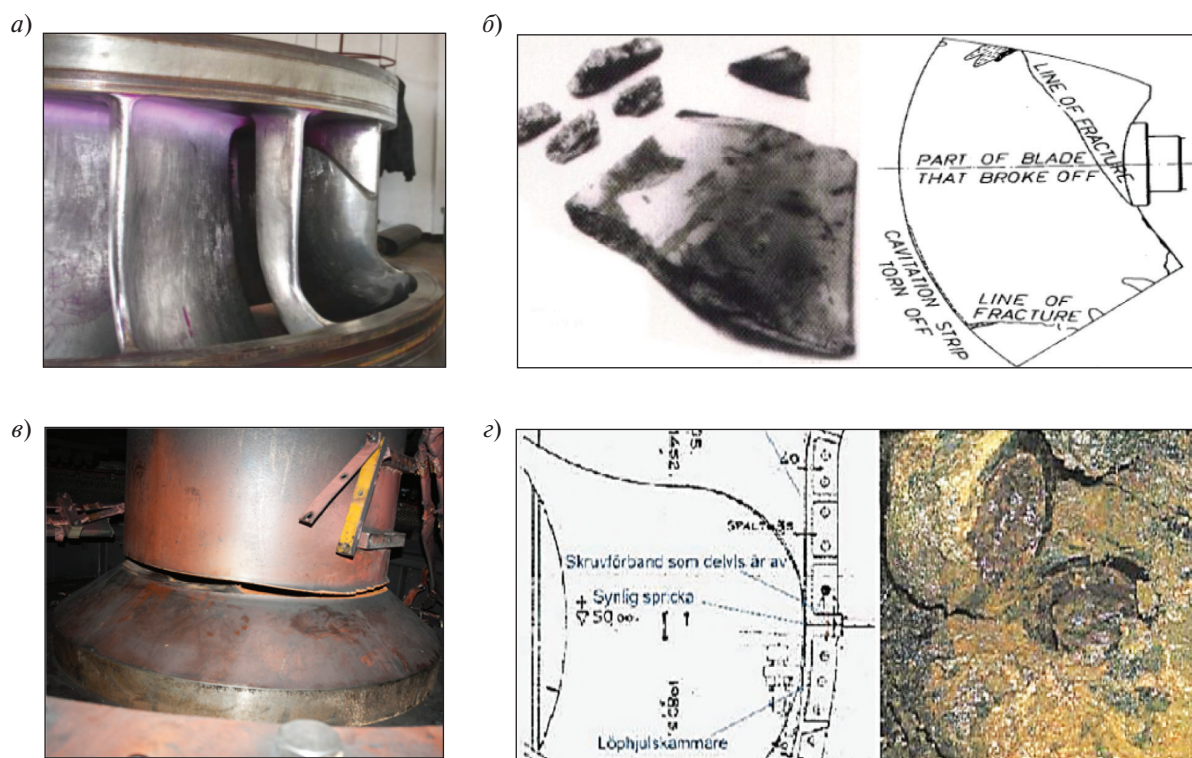
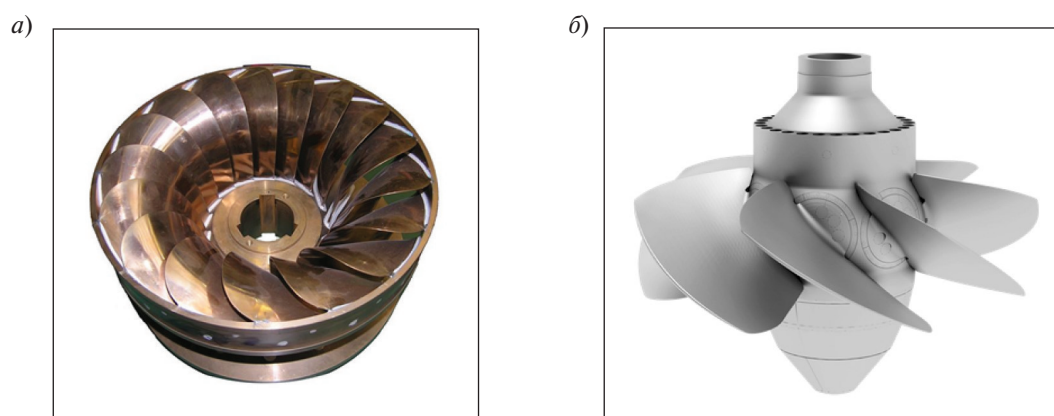


Рис. 1. Примеры повреждений и дефектов элементов гидротурбин: *a* — трещина на лопасти рабочего колеса РО-турбины [2]; *б* — разрушение лопасти рабочего колеса ПЛ-турбины [12]; *в* — разрушение вала ГА; *г* — разрушение крепежа фланца камеры рабочего колеса [3]

Fig. 1. Damage examples and defects of hydraulic turbines elements: *a* — crack on the runner blade of Francis turbines [2]; *б* — runner blade destruction of the Kaplan turbine [12]; *в* — destruction of the unit shaft; *г* — the fastener destruction on flange of the runner chamber [3]



Источник (origin):
http://www.studfiles.ru/html/2706/401/html_Qj2BeWKRmN.h18f/htmlconvd-c41fWj_html_2e7f9ba8.jpg

Источник (origin):
http://www.tyazhmash.com/r/_content/3b9d96849c21d023021a1a2350b55d41/kaplan-8-meters-v2-s.png

Рис. 2. Рабочее колесо гидротурбин РО (*a*) и ПЛ (*б*) типа

Fig. 2. The runner of Francis (*a*) and Kaplan (*б*) hydraulic turbines

и эксплуатации, минимальными весовыми характеристиками и длительным межремонтным периодом [2, 6, 24, 31–40];

появлением новых перспектив для изучения поведения и состояния ГТ, связанных с возможностями и достижениями современных экспериментальных и вычислительных технологий, а также бурным развитием диагностических методов.

В одном обзоре не представляется возможным охватить всю имеющуюся в зарубежных публикациях информацию. Поэтому авторы сконцентрировали внимание только на основных вопросах, представляющих интерес в **целях данного исследования**, — определении возможности и целесообразности использования зарубежного опыта для оценки ресурса отработавших проектный срок службы и остающихся в эксплуатации гидротурбин российских ГЭС.

Для этого на основании анализа материалов зарубежных публикаций и профильных международных конференций последних лет, в том числе симпозиумов МАГИ (IAHR¹ Symposium on Hydraulic Machinery and Systems) — Международной ассоциации по гидравлическим исследованиям [1–9, 12, 14–16, 21–23, 25–27, 29, 30, 33–36, 38, 39–65], ISROMAC (International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery) [11, 66–68], специализированных семинаров Francis-99 [28, 31, 32, 37, 69–76, 81], и информации, представленной на сайтах крупнейших изготовителей гидрооборудования [8, 20, 46, 77–79], были выявлены:

приоритетные тенденции развития методов оценки ресурса гидросилового оборудования;

используемые подходы к определению напряженно-деформированного состояния (НДС) основных ресурсопределяющих элементов гидротурбин как наиболее важного этапа в оценке ресурса;

применяемые методики оценки допустимой длительности эксплуатации оборудования с имеющимися повреждениями и дефектами; методы управления ресурсом.

Основные причины отказов гидротурбин

После длительной эксплуатации основной причиной исчерпания ресурса гидротурбин является накопление усталостных повреждений,

¹ IAHR — International Association for Hydro-Environment Engineering and Research.

приводящее к нарушению целостности конструкции (появление и развитие трещин в рабочих колесах, водоводах, валах, колоннах статора, обрыв ответственных крепежных элементов) или существенному снижению ее несущей способности. Усталостная природа разрушений неоднократно была подтверждена соответствующими металлографическими исследованиями зон разрушений [2, 6, 10, 14, 41]. Ускорению процесса зарождения и роста трещин способствуют конструктивные и технологические концентраторы (галтели, остаточные напряжения, зоны термического влияния), неоднородность и исходная дефектность материала, связанная с технологией изготовления (литье, сварка), и резонансные явления.

Усталостные повреждения элементов ГТ, как отмечают многие авторы [2, 3, 6, 7, 15, 27, 33, 41, 43, 47, 73, 80], вызываются совокупностью низкочастотного (low cycle fatigue loads — LCF) и высокочастотного (high cycle fatigue loads — HCF) нагружения, что характерно для современных условий эксплуатации гидротурбин.

Низкочастотные нагрузки (с частотой ниже или равной оборотной) преимущественно действуют на так называемых непроектных режимах работы (off-design operating conditions) и опасны значительными амплитудами возникающих в узлах и деталях ГТ динамических напряжений [2, 14–16, 22, 28, 29, 31–33, 36, 37, 47, 51, 69–76, 80, 81]. К непроектным традиционно относят режимы пуска/останова, сброса нагрузки, низкой частичной мощности, холостого хода, когда возникают паразитные вихревые структуры, гидроудары, зоны неустойчивости потока вследствие существенной неоптимальности условий обтекания лопастей и движения воды по проточному тракту турбины.

Высокочастотными принято называть нагрузки, частота воздействия которых в несколько раз превышает оборотную. Амплитуда высокочастотных переменных напряжений может быть невелика (обычно меньше 10 МПа), но количество циклов нагружения за весь период эксплуатации составляет порядка 10^9 – 10^{12} , что и приводит в конечном итоге к образованию дефектов. Наиболее опасны с точки зрения ресурса напряжения, вызванные пульсациями давления вследствие взаимодействия между ротором и статором (RSI — rotor-stator interaction)

на лопаточной частоте $f_{\text{НА}} = f_{\text{об}} Z_{\text{НА}}$ ($f_{\text{об}}$ — номинальная частота вращения ГА, $Z_{\text{НА}}$ — количество лопаток направляющего аппарата — НА) для РО-турбин [3, 9, 11, 13–15, 21, 32–34, 36–38, 40, 43, 73, 76, 82], на лопастной частоте $f_{\text{Л}} = f_{\text{об}} \cdot Z_{\text{Л}}$ ($Z_{\text{Л}}$ — количество лопастей РК) для ПЛ-турбин [54, 58], а также вихрями Кармана, частота которых определяется скоростью обтекания лопасти и толщиной выходной кромки [1, 9, 11, 14, 16, 40, 41, 46, 80].

Отдельного внимания заслуживают случаи резонансных явлений, когда обнаруживается близость одной из собственных частот (СЧ) конструкции и частоты внешнего воздействия. Дополнительные сложности при этом вызывает учет присоединенных масс жидкости, демпфирования среды, условий сопряжения и закрепления элементов ГТ, влияния кавитирующего объема и пр. [11, 34, 39, 40, 43–45, 49, 53, 56, 61, 66–68, 82].

Особенности современных условий эксплуатации гидротурбин

Наращивание энергетических мощностей за счет ВИЭ и расширение требований по обеспечению надежной эксплуатации гидрооборудования в широком диапазоне режимов с возможностью



Рис. 3. Сравнительные ресурсные характеристики режимов эксплуатации. Режимы: 1 — холостой ход (SNL); 2 — малая частичная нагрузка (LPL); 3 — частичная нагрузка (PL); 4 — оптимум (BEP); 5 — большая нагрузка (HL)

Fig. 3. Comparative lifetime characteristics of operation modes. Modes: 1 — SNL; 2 — LPL; 3 — PL; 4 — BEP; 5 — HL

многократного и быстрого перехода из одной эксплуатационной точки в другую в последнее время приводят к значительному изменению режимных параметров эксплуатации (относительно проектных) гидроагрегатов за счет существенного увеличения:

количества пусков/остановов;

количества глубоких разгрузок (вплоть до 0–15 % от номинальной мощности);

времени работы на неоптимальных по КПД режимах, включая форсированные по мощности режимы (HL — high load) и работу на частичных нагрузках (PL — part load), особенно малых (LPL — low part load);

частоты и продолжительности эксплуатации на холостом ходу (SNL — speed-no-load) и в режиме синхронного компенсатора с отжатием воды из проточной части.

Как отмечают многие авторы [2, 6, 10, 14, 21–25, 27–29, 31–38, 40, 44, 46, 47, 50–52, 54, 56, 61, 64, 74, 80, 82], это вызывает появление вибрационных проблем, возникновение дополнительных динамических нагрузок, увеличение повреждаемости и, в конечном итоге, снижение ресурса гидротурбин.

На рис. 3 в качестве примера представлены сравнительные ресурсные характеристики различных режимов эксплуатации: степень повреждения для пяти характерных режимов работы по отношению к эксплуатации вблизи точки оптимума по КПД (режим 4 — BEP — best efficient point) для срененапорной гидротурбины РО-типа по результатам исследования [22]. Приведенная диаграмма наглядно демонстрирует опасность непроектных режимов эксплуатации (SNL, LPL, PL, HL) с точки зрения ресурса.

В настоящее время дополнительные сложности при выборе условий эксплуатации создаются в связи с проводимой на многих ГЭС модернизацией, заменой основных элементов агрегатов. Как правило, модернизированные ГА имеют отличные от изначально установленных характеристики и расширенный диапазон разрешенных режимов работы, что требует особого внимания при распределении внутростанционных нагрузок.

Оптимизация ресурса

Вопросы оптимизации на стадии проектирования ГТ касаются в первую очередь геометрии проточной части; они имеют целью улуч-

шение энергетических характеристик агрегата и снижение кавитационного воздействия на элементы проточной части [23, 35, 42, 83]. Пример кавитационного повреждения рабочего колеса РО турбины представлен на рис. 4.

На стадии проектирования ресурсные характеристики часто оцениваются лишь для режимов стабильной работы агрегата вблизи точки оптимума эксплуатационной характеристики (ВЕР); этого явно недостаточно для обеспечения надежной длительной эксплуатации в условиях частой смены режимов. Все более актуальными становятся вопросы управления ресурсом за счет оптимального выбора режимов эксплуатации и сценариев их реализации.

Большое количество публикаций затрагивает эту тему [3, 14, 18, 21–23, 25, 40, 47, 49, 61, 64, 79, 80], рассматривая различные аспекты оптимизации ресурса:

- продление срока службы;
- сокращение времени вынужденных простоев ГА;
- оптимальный выбор длительности межремонтного периода;
- изменение схемы пуска/останова ГА;
- использование средств диагностики для получения необходимых сведений о динамическом поведении натуральных агрегатов;
- сопоставление опасности режимов эксплуатации с точки зрения истощения ресурса;
- периодичность контроля элементов ГТ для обеспечения надежности работы и сокращения эксплуатационных расходов;
- необходимость индивидуального подхода и невозможность распространения результатов исследований на аналогичные агрегаты и пр.

На рис. 5 приведен пример оптимизации ресурса путем изменения схемы пуска (по данным [47]): startup 1 — исходный пуск; startup 2 — модернизированный пуск. Как видно из приведенных данных, даже незначительное изменение пусковой схемы может существенно увеличить ресурс ГТ.

Диагностика и эксперимент

Один из основных этапов оценки ресурса гидрооборудования — определение внешних нагрузок на элементы оборудования и соответствующих им внутренних напряжений.

Несмотря на большой интерес к этой теме и значительные достижения последних лет [3,



Источник (origin):
Christopher Earls Brennen, *Hydrodynamics of Pumps*,
Cambridge University Press, 2011

Рис. 4. Кавитационные повреждения рабочего колеса РО турбины

Fig. 4. Cavitation damage of Francis turbine runner

4, 9, 10, 13, 14, 16, 21–23, 25, 27–29, 31–40, 42, 43, 46–52, 54–56, 58, 61, 63, 64, 67, 68, 70, 74–76, 78, 80–82], до конца не решена проблема корректного описания динамического поведения гидротурбины на режимах частичной мощности и при переходных процессах.

Экспериментальные методы изучения сложных пространственных конструкций, подвергающихся комбинации различных нагрузок, в том числе рабочих колес гидротурбин, вплоть до недавнего времени оставались основным инструментом получения достоверной информации об их напряженном состоянии.

В настоящее время тензометрирование по-прежнему является важной и весьма информативной частью исследований ответственного энергетического оборудования. При проведении диагностирования гидротурбинного оборудования, помимо тензометров, используются также датчики для измерения пульсаций давления, вибраций, перемещений, зазоров, аппаратура для визуализации процессов кавитации и пр., которые устанавливаются как на неподвижные части, так и на вращающиеся элементы ГТ. Современные натурные испытания позволяют получать достоверные сведения о техническом состоянии и динамических характеристиках исследуемого гидроагрегата в широком диапазоне режимов работы оборудования [9, 10, 14, 16, 21, 25, 27, 29–31, 33–36, 38, 42, 46–48, 55, 56,

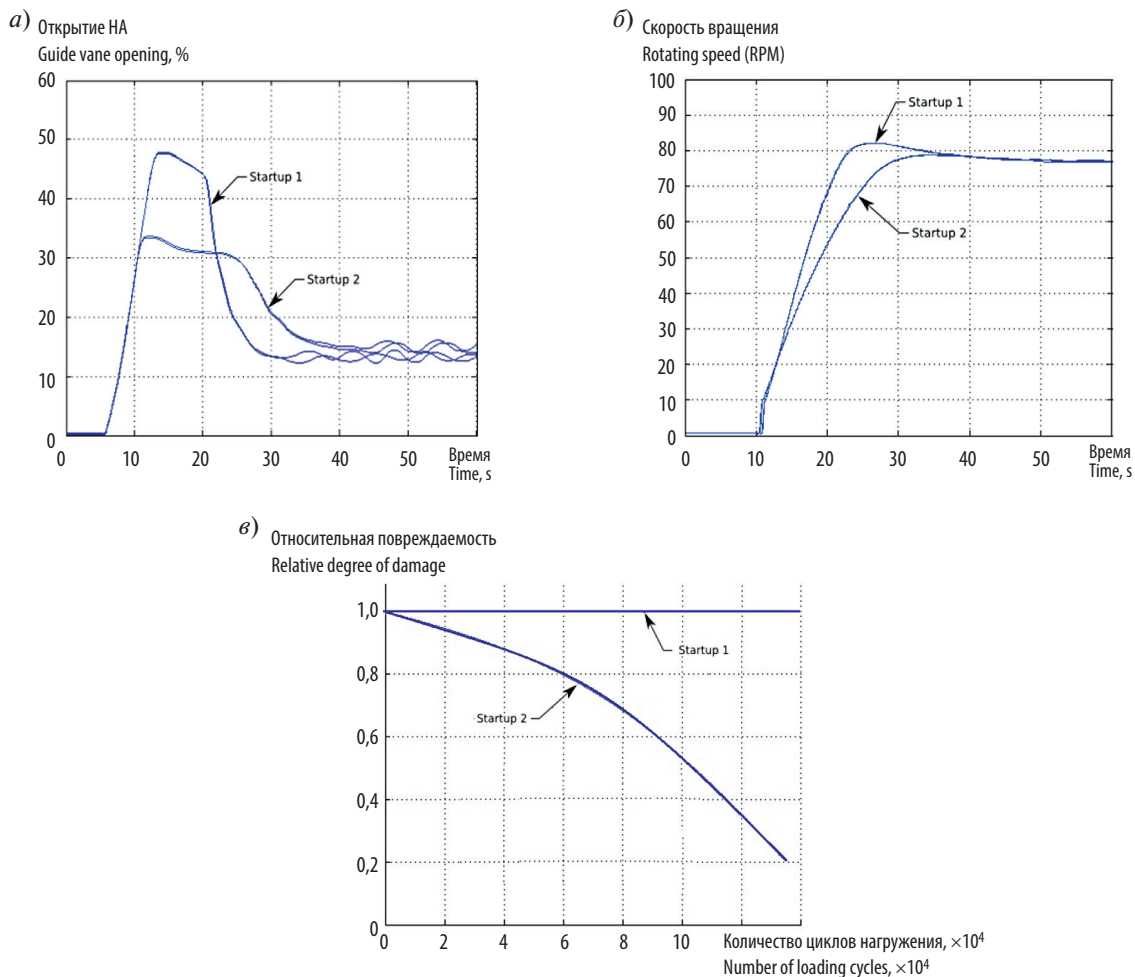


Рис. 5. Оптимизация пусковой схемы

Fig. 5. Optimization of the start-up scenario

61, 64, 70, 80, 84], отслеживать изменения и своевременно принимать необходимые меры, что является их несомненным достоинством. Кроме того, экспериментальные данные — единственный источник информации для верификации результатов, полученных расчетными (аналитические, численные) методами.

К отрицательным сторонам экспериментальных методов исследования ГТ можно отнести ограниченную информативность получаемых данных (только в местах установки датчиков, что не позволяет получить полную картину), а также высокую стоимость самих испытаний и необходимость длительного вывода оборудования из эксплуатации для проведения подготовительных работ.

Расчетные методы

С развитием компьютеров начиная с 60-х годов прошлого века все более широкое применение стали находить численные методы, которые к настоящему моменту активно применяются для решения различных задач гидроэнергетики, включая вопросы ресурса.

Любая расчетная (математическая) модель может быть представлена как совокупность трех основных элементов: геометрической модели, системы внешних нагрузок и граничных условий. Точность моделирования каждой из этих составляющих может оказать решающее влияние на результаты численных экспериментов, включая вопросы оценки ресурса.

Геометрия. Современный уровень развития компьютерной техники и вычислительных методов сняли с повестки дня проблему геометрической конфигурации рассчитываемой конструкции и позволили значительно расширить круг решаемых задач. В настоящее время практически любая по сложности механическая система может быть адекватно отражена в геометрии расчетной модели [2, 3, 9, 11, 13, 14, 21–23, 25, 28, 31–37, 39, 40, 42, 43, 46, 50–52, 54, 58, 59, 61–64, 67, 69, 70, 74–76, 80–82], хотя вопросы сопряжения отдельных элементов ГТ между собой и их взаимовлияния по-прежнему актуальны.

Граничные условия. Для оценки прочности и ресурса механической части гидротурбин важно правильно отразить условия закрепления структурных элементов с учетом фактических жесткостных характеристик опорных узлов, а также учесть влияние заполненных жидкостью узких зазоров между вращающимися и неподвижными частями ГТ, которые в условиях эксплуатации ограничивают радиальные перемещения ротора.

Проблема оценки влияния граничных условий на динамические характеристики гидротурбин в настоящее время недостаточно хорошо изучена, если судить по имеющейся в открытой печати информации, хотя некоторые ее аспекты отражены в публикациях [26, 39, 44, 45, 53, 57, 67, 68].

Приведенные в публикациях примеры показывают, что погрешность расчета может существенно превысить необходимую инженерную точность при оценке ресурса или даже дать неправильную качественную картину поведения ГТ, если не обращать должного внимания на тщательное моделирование граничных условий.

Нагрузки. Для гидравлических турбин основная нагрузка — это гидродинамическое воздействие потока в проточном тракте турбины, зависящее от основных режимных факторов — мощности, напора и расхода. Вопросы достоверного определения гидравлических нагрузок во всем диапазоне эксплуатационных режимов являются постоянной темой, обсуждаемой на профессиональных конференциях и отражаемой в публикуемых материалах по гидроэнергетической тематике [2–4, 9, 11, 13, 14, 21–23, 25, 28, 31, 32, 34–37, 40, 42–44, 46, 50–54, 58–64, 67, 69–76, 80–82].

Большинство исследователей для решения задач гидродинамики используют процедуру CFD²-анализа, реализованную в современных многофункциональных пакетах программ или специализированных модулях, адаптированных для решения конкретных задач: Ansys Fluent, Ansys CFX, SigmaFlow, OpenFOAM, Numeca FINE/Turbo и др. Уже стали доступны для моделирования процессы стационарной и нестационарной гидродинамики в сложных пространственных конструкциях, а также учет турбулентности, неравномерности, неоднородности и двухфазности потока обтекающей жидкости.

Необходимость учета несимметрии подводящего и отводящего трактов ГТ для адекватного определения нагрузок во всем диапазоне режимов и достоверной оценки ресурса требует построения «полных» моделей, включающих все (или почти все) элементы проточной части: от входного сечения водоподводящего тракта в верхнем бьефе до выходного сечения отсасывающей трубы в нижнем бьефе [9, 11, 13, 14, 21, 23, 25, 28, 32, 34, 36, 37, 40, 42, 43, 46, 50, 51, 54, 58, 59, 62–64, 67, 69–71, 73–75, 81]. Это приводит к очень большой размерности решаемых вычислительными методами задач: расчетные модели имеют десятки миллионов узлов. В совокупности с необходимостью использования малого шага по времени (до 10^{-5} с) для моделирования нестационарных процессов расчет гидродинамических нагрузок только для одной эксплуатационной точки занимает от нескольких часов до нескольких недель даже на мощных суперсовременных кластерах, что является сейчас основным сдерживающим фактором широкого применения численного моделирования для решения вопросов, связанных с ресурсом ГТ. Попытки упрощения расчетных моделей за счет использования симметрии и различных гипотез приводят к не всегда удовлетворительной точности результатов, а в ряде случаев — даже к качественному несовпадению с результатами эксперимента.

Другой существенный недостаток расчетных методов — их высокая чувствительность к выбору CFD-кода, модели турбулентности, качеству и размерности расчетных сеток, граничных

² CFD — Computational Fluid Dynamics (вычислительная гидродинамика)

условий, шага по времени, упрощающих предположений и других настроек [28, 32, 50, 56, 58–60, 62–64, 70–72, 74–76, 81, 80]. В совокупности с высокой стоимостью уточненных расчетов на «полных» моделях это до сих пор не позволяет целиком заменить натурный или модельный эксперимент численным.

Расчет НДС. Одним из важных шагов оценки ресурса является определение напряженно-деформированного состояния элементов ГТ. В настоящее время основной интерес привлекают следующие проблемы [3, 4, 6, 9, 11, 13–16, 20–22, 26, 33, 34, 39, 40, 43–45, 49, 53, 54, 57, 61, 64–68, 80, 82]:

динамические напряжения в лопастях РК во всем спектре эксплуатационных режимов, особенно «off-design operating conditions»;

расчет НДС с учетом влияния дефектов (трещин) и остаточных сварочных напряжений;

взаимодействие жидкости и структурных элементов (FSI — fluid structural interaction);

формы и частоты собственных колебаний узлов ГТ с учетом влияния присоединенных масс жидкости, демпфирующих свойств среды, узких зазоров, условий сопряжения и закрепления, скорости вращения ГА и пр.;

возможность возникновения и отстройки от резонанса;

верификация результатов и погрешность численного расчета.

Большим достоинством современных вычислительных технологий является возможность подробного изучения динамического поведения гидротурбин за счет удобных инструментов визуализации расчетных параметров в любой точке модели, что выгодно отличает их от экспериментальных методов.

Второе отличие от эксперимента заключается в возможности прогнозирования процессов роста трещин, что в настоящее время является важным направлением развития расчетных методов [4, 6, 9, 11–14, 16, 20, 27, 40, 41, 47, 54, 65, 80, 82, 85].

Прослеживаемая в последнее время тенденция к повышению точности проводимых расчетов за счет использования возможностей 3D-моделирования, уточнения гидродинамических нагрузок и применения современных расчетных процедур на основе метода конечных элементов (FEA — finite element analysis) [2–4,

9, 11, 13–16, 18, 21, 33, 34, 39, 40, 43, 44, 48, 61, 64, 67, 77, 80, 82, 84–86] приводит к существенному удорожанию расчетных операций как в финансовом, так и во временном аспектах, что не всегда приемлемо.

Сейчас качественный расчет НДС с учетом всех необходимых особенностей поведения ГТ для достоверной оценки ресурса с учетом всех режимов эксплуатации могут позволить себе только крупные производители оборудования, такие, как Andritz Hydro, Voith Hydro, Alstom, в сотрудничестве с передовыми научно-исследовательскими институтами, университетами и лабораториями либо солидные генерирующие компании. Большинство проведенных исследований выполнено при технической и финансовой поддержке национальных научных фондов и научно-исследовательских советов, академических научных программ, министерств энергетики, промышленности и образования, крупных собственников оборудования. Такой расчет целесообразен на стадии проектирования новых турбин или масштабной модернизации с заменой основных элементов ГТ в целях минимизации объема модельных испытаний на стадии выбора оптимальной конструкции и возможности внесения конструктивных изменений на ранних стадиях проектирования.

Оценка ресурса

В отличие от других широко освещаемых аспектов гидроэнергетики (оптимизация, гидродинамика, кавитация, диагностика и мониторинг, модернизация, гидроаккумуляция и пр.), вопросам оценки ресурса не уделяется достаточного внимания. Авторам не удалось найти среди зарубежных публикаций последних лет ни систематических исследований на тему ресурса ГТ, ни аналитических обзоров опубликованных данных на эту тему, ни отдельных секций на профильных конференциях и семинарах, хотя интерес к отдельным вопросам оценки ресурса ГТ проявляют многие.

Накопление усталостных повреждений в элементах гидротурбин происходит под действием комбинации нагрузок периодического и случайного характера, действующих на протяжении всего жизненного цикла. Основными проблемами на сегодняшний день являются [4, 6, 15, 21, 22, 33, 41, 47, 65, 82, 83, 85, 87]:

учет дефектов, концентрации напряжений, остаточных напряжений в сварных соединениях и зонах термического влияния;

недостаточность базы данных по характеристикам материалов для достоверной оценки ресурса;

механизм суммирования повреждений с учетом значительной неопределенности внешних нагрузок на непроектных режимах работы;

прогнозирование роста трещин (оценка долговечности при наличии дефекта) в условиях фактической эксплуатации.

В большинстве работ авторы опираются на два основных подхода к оценке усталостных повреждений:

линейное суммирование повреждаемости (правило Майнера — Miner's rule) на основе усталостной кривой в координатах «напряжение — количество циклов» (S-N curve) и/или соотношений типа формулы Серенсена с целью определения времени появления трещин;

оценку долговечности на основе линейной механики разрушений (соотношения типа уравнений Пэриса), что позволяет определять период до следующего обследования/ремонта на основе расчетной зависимости между длиной трещины (crack length) и остаточным ресурсом (временем до достижения трещиной критической длины — critical length), пример которой приведен на рис. 6 [4].

Для определения предельного состояния с учетом имеющихся дефектов некоторые авторы используют диаграмму Китагавы — Такахашии (Kitagawa — Takahashi (KT) diagram), впервые построенную в 1976 году и представляющую собой

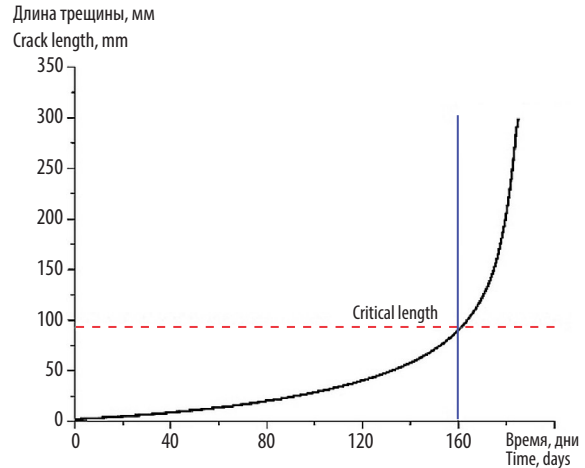


Рис. 6. Зависимость допустимой продолжительности эксплуатации (в днях) от длины трещины (мм) [4]

Fig. 6. Dependence permissible time of operation (days) from length of crack (mm) [4]

границу на плоскости «длина трещины — напряжение», которая разделяет области распространения (красная зона) и нераспространения (зеленая зона) трещин. Пример такой диаграммы приведен на рис. 7 [6].

Обращает на себя внимание факт, что в большинстве статей приведены лишь относительные ресурсные характеристики (относительное суммарное повреждение, относительная опасность режима, относительная усталостная прочность), но нигде не приводятся нормативные или рекомендуемые для широкого использования коэффициенты запаса по усталостной прочности,

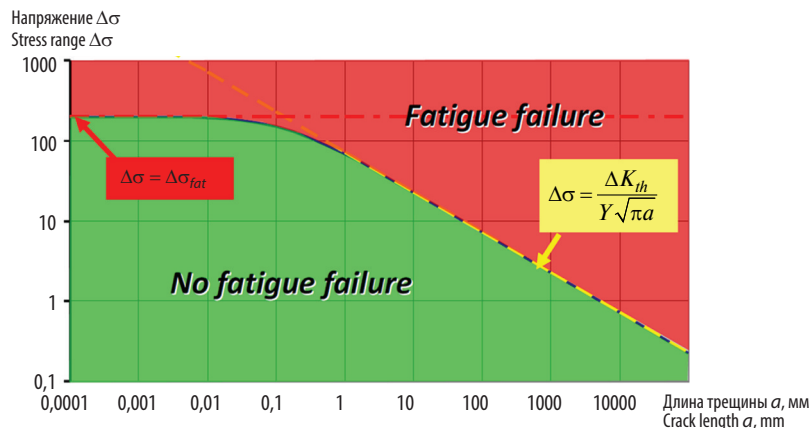


Рис. 7. Диаграмма Китагавы — Такахашии [6]

Fig. 7. Kitagawa — Takahashi diagram [6]

критерии выбора предельно допустимой длины трещин, что в первую очередь необходимо для количественной оценки ресурса.

Обобщая все выше сказанное, можно выделить следующие основные **тенденции** развития методов оценки ресурса гидротурбин на современном этапе:

1) усиление интереса к проблеме ресурса в связи с нарастающей необходимостью и появлением технических возможностей;

2) стремление к увеличению достоверности и точности решения задач на всех этапах работ по оценке ресурса ГТ;

3) учет влияния на ресурс непроектных эксплуатационных режимов в связи с необходимостью повышения гибкости использования ГА;

4) прогнозирование динамики роста трещин в процессе эксплуатации с целью определения оптимальных межремонтных сроков эксплуатации;

5) увеличение доли численного эксперимента за счет частичного замещения модельного и натурного экспериментов;

6) попытки управления ресурсом за счет выбора оптимальных режимных параметров с учетом возможностей энергосистемы;

7) направленность на индивидуальную экспертную оценку ресурса ГТ в связи с отсутствием нормативных требований, рекомендуемых методик, критериев допустимости эксплуатации, критических величин трещин, нормативных сроков службы и коэффициентов запаса;

8) отсутствие систематических исследований на тему ресурса, например таких, как в свое время это было сделано для турбин тепловых и атомных станций.

Заключение

В середине XX века гидротурбиностроение в Советском Союзе заняло лидирующее положение в мире. Опираясь на этот опыт гидротурбиностроение в Российской Федерации продолжает быть конкурентоспособным. Продукция Ленинградского металлического завода пользуется спросом во многих странах.

Вопросам надежности, прочности и ресурса гидроагрегатов уделяется большое внимание во многих странах.

Результаты выполненных зарубежных исследований и фактически сложившаяся ситуация с оборудованием российских ГЭС указывают на необходимость развития более совершенных расчетных методов оценки ресурса гидрооборудования за пределами проектного срока службы. Целесообразно применять специальные расчетно-экспериментальные технологии.

Эти технологии должны основываться на сочетании инженерных расчетных моделей, учитывающих индивидуальные особенности ГА по данным штатного мониторинга и диагностики и системы обоснованных коэффициентов запаса (по усталости, по длине трещины и т. п.), отражающих с необходимой степенью точности неопределенность задания расчетных нагрузок, свойств материалов и режимов работы.

На ГЭС в стадии модернизации гидроагрегатов необходимо больше внимания уделять внутростанционному распределению нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gajić A., Manžalović P., Predić Z.** Modification of the trailing edges of the large stay vanes and their influence on dynamic stresses // 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 12 (2010) 012055. DOI:10.1088/1755-1315/12/1/012055

2. **Frunzăverdel D., Muntean S., Mărginean G., Câmpiani V., Marșavina L., Terzi R., Șerban V.** Failure analysis of a Francis turbine runner // 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 12 (2010) 012115. DOI:10.1088/1755-1315/12/1/012115

3. **Brekke H.** Performance and safety of hydraulic turbines // 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 12 (2010) 012061. DOI:10.1088/1755-1315/12/1/012061

4. **Liu X., Luo Y.Y., Wang Z.W.** Fatigue Analysis of the Piston Rod in a Kaplan Turbine Based on Crack Propagation under Unsteady Hydraulic Loads // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 1. P. 12017-12026(10). DOI:10.1088/1755-1315/22/1/012017

5. **Boukani H., Habibzadeh, Viens M., Tahan S.A., Gagnon M.** On the performance of nondestructive testing methods in the hydroelectric turbine industry // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 1. P. 12018–12025(8). DOI:10.1088/1755–1315/22/1/012018
6. **Thibault D., Gagnon M., Godin S.** Bridging the gap between metallurgy and fatigue reliability of hydraulic turbine runners // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 1. P. 12019–12029(11). DOI:10.1088/1755–1315/22/1/012019
7. **Storli P.-T., Nielsen T.K.** Dynamic load on a Francis turbine runner from simulations based on measurements // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 22, № 3. 2014. P. 32056–32064(9). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032056
8. **Pejovic S., Karney B.** Guidelines for transients are in need of revision // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 4. P. 42006–42016(11). DOI:10.1088/1755–1315/22/4/042006
9. **Müller C., Staubli T., Baumann R., Casartelli E.** A case study of the fluid structure interaction of a Francis turbine // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 22 (2014) 032053. DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032053
10. **Gammer J.H., Etter S.** Cracking of Francis runners during transient operation // *Hydropower and Dams*. 2008. Issue Four. C. 81–84.
11. **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.
12. **Pejovic S., Gajic A., Zhang Q.** Smart design requires updated design and analysis guidelines // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 4. P. 42008–42017(10). DOI:10.1088/1755–1315/22/4/042008
13. **Egusquiza E., Valero C., X. Huang, Jou E., Guardo A., Rodriguez C.** Failure investigation of a large pump-turbine runner // *Engineering Failure Analysis*. 23 (2012). P. 27–34.
14. **Zouhar J., Obrovsky J., Feilhauer M., Skotak A.** Case Study and Numerical Analysis of Vibration and Runner Cracks for the Lipno I Hydroelectric Project // 28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 49 (2016) 072011. DOI:10.1088/1755–1315/49/7/072011
15. **Lyutov A., Kryukov A., Cherny S., Chirkov D., Salienco A., Skorospelov V., Turuk P.** Modelling of a Francis Turbine Runner Fatigue Failure Process Caused by Fluid-Structure Interaction // 28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 49 (2016) 072012. DOI:10.1088/1755–1315/49/7/072012
16. **Neto A.D., Gissoni H., Gonçalves M., Cardoso R., Jung A., Meneghini J.** Engineering diagnostics for vortex-induced stay vanes cracks in a Francis turbine // 28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 49 (2016) 072017. DOI:10.1088/1755–1315/49/7/072017
17. Электроэнергетика в современном мире // <http://myelectro.com.ua/98-gidroenergetika/132-samyekрупnye-avarii-na-ges> (дата обращения 13.01.17);
18. Andritz Hydro: сервисное обслуживание и реконструкция // <http://www.andritz.com/hy-srbrochure-ru.pdf> (дата обращения 13.01.17).
19. Hydroelectric Power. A Guide for Developers and Investors // http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/06b2df8047420bb4a4f7ec57143498e5/Hydropower_Report.pdf?MOD=AJPERES (дата обращения 13.01.17).
20. Voith. Modernization: A «plus» for both operators and the environment // <http://voith.com/en/markets-industries/industries/hydro-power/modernization-547.html> (дата обращения 01.02.17).
21. **Huang X., Chamberland-Lauzon J., Oram C., Klopfer A., Ruchonnet N.** Fatigue analyses of the prototype Francis runners based on site measurements and simulations // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 1. P. 12014–12021(8). DOI:10.1088/1755–1315/22/1/012014
22. **Seidel U., Mende C., Hübner B., Weber W., Otto A.** Dynamic loads in Francis runners and their impact on fatigue life // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 3. P. 32054–32062(9). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032054
23. **Lewis B.J., Cimbala J.M., Wouden A.M.** Wicket gate trailing-edge blowing: A method for improving off-design hydroturbine performance by adjusting the runner inlet swirl angle // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 1. P. 12021–12031(11). DOI:10.1088/1755–1315/22/1/012021
24. **Sick M., Oram C., Braum O., Nenneman B., Coutu A.** Hydro projects delivering regulating power: Technical challenges and cost of operation // *Hydro*. October 7–9, 2013. Innsbruck, Austria.
25. **Nicolle J., Morissette J.F., Giroux A.M.** Transient CFD simulation of a Francis turbine startup // 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP

Conference Series: Earth and Environmental Science. 15 (2012) 062014. DOI:10.1088/1755-1315/15/6/062014

26. **Zhang L.K., Ma Z.Y.** Numerical analysis of a rub-impact rotor-bearing system for hydraulic generating set // 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 15 (2012) 072015. DOI:10.1088/1755-1315/15/7/072015

27. **Amiri K., Mulu B., Rasee M., Cervantes M.J.** Load variation effects on the pressure fluctuations exerted on a Kaplan turbine runner // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 22 (2014) 032005. DOI:10.1088/1755-1315/22/3/032005

28. **Nicolle J., Cupillard S.** Prediction of dynamic blade loading of the Francis-99 turbine // Francis-99 Workshop 1: steady operation of Francis turbines // Journal of Physics: Conference Series 579 (2015) 012001. DOI:10.1088/1742-6596/579/1/012001

29. **Müller A., Favrel A., Landry C., Yamamoto K., Avellan F.** On the physical mechanisms governing self-excited pressure surge in Francis turbines // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 3. P. 32034-32041(8). DOI:10.1088/1755-1315/22/3/032034

30. **Yamamoto K., Müller A., Favrel A., Landry C., Avellan F.** Pressure measurements and high speed visualizations of the cavitation phenomena at deep part load condition in a Francis turbine // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 2. P. 22011-22018(8). DOI:10.1088/1755-1315/22/2/022011

31. **Mössinger P., Jester-Zürker R., Jung A.** Francis-99: Transient CFD simulation of load changes and turbine shutdown in a model sized high-head Francis turbine // Francis-99 Workshop 2: transient operation of Francis turbines // IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series 782 (2017) 012001. DOI:10.1088/1742-6596/782/1/012001

32. **Jakobsen K-R.G., Holst M.A.** CFD simulations of transient load change on a high head Francis turbine // Francis-99 Workshop 2: transient operation of Francis turbines // IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series 782 (2017) 012002. DOI:10.1088/1742-6596/782/1/012002

33. **Monette C., Marmont H., Chamberland-Lauzon J., Skagerstrand A., Coutu A., Carlevi J.** Cost of enlarged operating zone for an existing Francis runner // 28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 49 (2016) 072018. DOI:10.1088/1755-1315/49/7/072018

34. **Huang X., Oram C., Sick M.** Static and dynamic stress analyses of the prototype high head Francis runner based on site measurement // 27th IAHR Symposium on

Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 3. P. 32052-32061(10). DOI:10.1088/1755-1315/22/3/032052

35. **Maiwald M., Magnoli M.V.** Influence of Hydraulic Design on Stability and on Pressure Pulsations in Francis Turbines at Overload, Part Load and Deep Part Load based on Numerical Simulations and Experimental Model Test Results // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 3. P. 32013-32020(8) DOI:10.1088/1755-1315/22/3/032013

36. **Gong R.Z., Wang H.G., Yao Y., Shu L.F., Huang Y.J.** Numerical simulation of pressure fluctuation in 1000MW Francis turbine under small opening condition // 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 15 (2012) 062038. DOI:10.1088/1755-1315/15/6/062038

37. **Stoessel L., Nilsson H.** Steady and unsteady numerical simulations of the flow in the Tokke Francis turbine model, at three operating conditions // Francis-99 Workshop 1: steady operation of Francis turbines // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 579, № 1. P. 12011-12024(14). DOI:10.1088/1742-6596/579/1/012011

38. **Boulloc F., Guillozet J., Duparchy F., Lowys P.Y., Duparchy A.** Mechanical risks prediction on Francis runner by Spatial Harmonic Decomposition // 28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 49 (2016) 072015. DOI:10.1088/1755-1315/49/7/072015

39. **Valentin D., Ramos D., Bossio M., Presas A., Egusquiza E., Valero C.** Influence of the boundary conditions on the natural frequencies of a Francis turbine // 28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 49 (2016) 072004. DOI:10.1088/1755-1315/49/7/072004

40. **Hübner B., Weber W., Seidel U.** The role of fluid-structure interaction for safety and life time prediction in hydraulic machinery // 28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 49 (2016) 072007. DOI:10.1088/1755-1315/49/7/072007

41. **Trudel A.; Sabourin M.** Metallurgical and fatigue assessments of welds in cast welded hydraulic turbine runners // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 1. P. 12015-12025(11). doi.org/10.1088/1755-1315/22/1/012015

42. **Obrovsky J., Zouhar J.** Experiences with the hydraulic design of the high specific speed Francis turbine // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environ-

mental Science. 2014. Vol. 22, № 1. P. 12027–12035(9). DOI:10.1088/1755–1315/22/1/012027

43. **He L.Y., Wang Z.W., Kurosawa S., Nakahara Y.** Resonance investigation of pump-turbine during startup process // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 3. P. 32024–32031(8). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032024

44. **Valentín D., Presas A., Egusquiza E., Valero C.** Influence of the added mass effect and boundary conditions on the dynamic response of submerged and confined structures // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 3. P. 32042–32051(10). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032042

45. **Presas A., Valentín D., Egusquiza E., Valero C., Seidel U.** Experimental analysis of the dynamic behavior of a rotating disk submerged in water // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 3. P. 32043–32050(8). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032043

46. **Nennemann B., Morissette J.F., Chamberland-Lauzon J., Monette C., Braun O., Melot M., Coutu A., Nicolle J., Giroux A.M.** Challenges in Dynamic Pressure and Stress Predictions at No-Load Operation in Hydraulic Turbines // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 3. P. 32055–32064(10). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032055

47. **Gagnon M., Tahan S.A., Bocher P., Thibault D.** Impact of startup scheme on Francis runner life expectancy // 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 12 (2010) 012107. DOI:10.1088/1755–1315/12/1/012107

48. **Arpin-Pont J., Gagnon M., Tahan S.A., Coutu A., Thibault D.** Strain gauge measurement uncertainties on hydraulic turbine runner blade // 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 15 (2012) 062042. DOI:10.1088/1755–1315/15/6/062042

49. **Monette C., Nennemann B., Seeley C., Coutu A., Marmont H.** Hydro-dynamic damping theory in flowing water // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 22 (2014) 032044. DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032044

50. **Côté P., Dumas G., Moisan É., Boutet-Blais G.** Numerical investigation of the flow behavior into a Francis runner during load rejection // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 3. P. 32023–32033(11). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032023

51. **Feng J.J., Li W.F., Wu H., Lu J.L., Liao W.L., Luo X.Q.** Investigation on pressure fluctuation in a Francis turbine with improvement measures // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 3. P. 32006–32014(9). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032006

52. **Yang J., Gao L., Wang Z.W., Zhou X.Z., Xu H.X.** The flow field investigations of no load conditions in axial flow fixed-blade turbine // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 3. P. 32028–32035(8). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032028

53. **Pochylý P., Fialová S., Kozubková M., Bojko M.** Tensors of added damping, stiffness and mass in a thin gap of hydrodynamic machine // 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 15, (2012) 072027–072034. DOI:10.1088/1755–1315/15/7/072027

54. **Zheng X.B., Guo P.C., Luo X.Q.** Numerical simulation of fluid-structure interaction for axial flow blade based on weak coupling // 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 15 (2012) 062012. DOI:10.1088/1755–1315/15/6/062012

55. **Bucur D.M., Dunca G., Călinoiu C.** Experimental vibration level analysis of a Francis turbine // 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 15 (2012) 062056. DOI:10.1088/1755–1315/15/6/062056

56. **Favrel A., Landry C., Müller A., Avellan F.** Experimental identification and study of hydraulic resonance test rig with Francis turbine operating at partial load // 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 15 (2012) 062064. DOI:10.1088/1755–1315/15/6/062064

57. **Bai B., Zhang L.X., Zhao L.** Influences of the guide bearing stiffness on the critical speed of rotation in the main shaft system // 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 15 (2012) 072028. DOI:10.1088/1755–1315/15/7/072028

58. **Javadi A., Nilsson H.** Unsteady numerical simulation of the flow in the U9 Kaplan turbine model // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 22 (2014) 022001. DOI:10.1088/1755–1315/22/2/022001

59. **Mangani L., Buchmayr M., Darwish M.** A block coupled solver development for hydraulic machinery applications // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 22 (2014) 022002. DOI:10.1088/1755–1315/22/2/022002

60. **Zhang Y.L., Yuan S.Q., Zhang J.F., Feng Y.N., Lu J.X.** Numerical investigation of the effects of splitter blades on the cavitation performance of a centrifugal pump // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 22 (2014) 052003. DOI:10.1088/1755-1315/22/5/052003
61. **Moisan É., Giacobbi D-B., Gagnon M., Léonard F.** Self-excitation in Francis runner during load rejection // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Publishing IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 22 (2014) 032025. DOI:10.1088/1755-1315/22/3/032025
62. **Meng L., Zhang S.P., Zhou L.J., Wang Z.W.** Study on the Pressure Pulsation inside Runner with Splitter Blades in Ultra-High Head Turbine // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22, № 3. P. 32012-32018(7). DOI:10.1088/1755-1315/22/3/032012
63. **Ko P., Kurosawa S.** Numerical simulation of turbulence flow in a Kaplan turbine — Evaluation on turbine performance prediction accuracy // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 22 (2014) 022006. DOI:10.1088/1755-1315/22/2/022006
64. **Morissette J.F., Chamberland-Lauzon J., Nennemann B., Monette C., Giroux A.M., Coutu A., Nicole J.** Stress predictions in a Francis turbine at no-load operating regime // 28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 49 (2016) 072016. DOI:10.1088/1755-1315/49/7/072016
65. **Sabourin M., Thibault D., Bouffard D.A., Lévesque M.** New parameters influencing hydraulic runner lifetime // 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 12 (2010) 012050. DOI:10.1088/1755-1315/12/1/012050
66. **Huang X., Escaler X.** Added mass effects of attached cavitation on the blades of a Francis runner // ISROMAC 2016 International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. Hawaii, Honolulu April 10-15, 2016.
67. **Zhongyu Mao, Zhengwei Wang.** Structural Characteristic in Prototype Runner of Francis Turbine Analysis // ISROMAC 2016 International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. Hawaii, Honolulu April 10-15, 2016.
68. **Zhenyue Ma, Qianqian Wu.** Study on Dynamic Characteristics of Rotor-bearing Model in the Hydraulic-mechanical-electric Coupled System of Hydro Generator Unit // ISROMAC 2016 International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery Hawaii, Honolulu. April 10-15, 2016.
69. **Čelič D., Ondráčka H.** The influence of disc friction losses and labyrinth losses on efficiency of high head Francis turbine // Francis-99 Workshop 1: steady operation of Francis turbines // Journal of Physics: Conference. Series 579 (2015) 012007. DOI:10.1088/1742-6596/579/1/012007.
70. **Mössinger P., Jester-Zürker R., Jung F.** Investigation of different simulation approaches on a high-head Francis turbine and comparison with model test data: Francis-99 // Francis-99 Workshop 1: steady operation of Francis turbines // IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference. Series 579. (2015) 012005-012019. DOI:10.1088/1742-6596/579/1/012005
71. **Jošt D., Škerlavaj A., Morgut M., Mežnar P., Nobile E.** Numerical simulation of flow in a high head Francis turbine with prediction of efficiency, rotor stator interaction and vortex structures in the draft tube // Francis-99 Workshop 1: steady operation of Francis turbines // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 579, № 1. P. 12006-12025(20). DOI:10.1088/1742-6596/579/1/012006
72. **Zhao Yaping, Liao Weili, Ruan Hui, Luo Xingqi.** Performance study for Francis-99 by using different turbulence models // Francis-99 Workshop 1: steady operation of Francis turbines // Journal of Physics: Conference. Series 579. (2015) 012012. DOI:10.1088/1742-6596/579/1/012012
73. **Buron J.D., Houde S., Lestriez R., Deschênes C.** Application of the non-linear harmonic method to study the rotor-stator interaction in Francis-99 test case // Francis-99 Workshop 1: steady operation of Francis turbines // Journal of Physics: Conference. Series 579. (2015) 012013. DOI:10.1088/1742-6596/579/1/012013
74. **Minakov A., Platonov D., Sentyabov A., Gavrilov A.** Francis-99 turbine numerical flow simulation of steady state operation using RANS and RANS/LES turbulence model // Francis-99 Workshop 2: transient operation of Francis turbines // IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series 782. (2017) 012005. DOI:10.1088/1742-6596/782/1/012005
75. **Gavrilov A., Dektarev A., Minakov A., Platonov D., Sentyabov A.** Steady state operation simulation of the Francis-99 turbine by means of advanced turbulence models // Francis-99 Workshop 2: transient operation of Francis turbines // IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series 782. (2017) 012006. DOI:10.1088/1742-6596/782/1/012006
76. **Østby P.T.K., Billdal J.T., Haugen B., Dahlhaug O.G.** On the relation between friction losses and pressure pulsations caused by Rotor Stator interaction on the Francis-99 turbine // IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series 782. (2017) 012010. DOI:10.1088/1742-6596/782/1/012010
77. **Andritz Hydro: Research and development** // http://www.andritz.com/hy-rd_en.pdf (дата обращения 01.02.17).
78. **Andritz Hydro: DIA TECH Monitoring and Diagnosis System** // <http://www.andritz.com/hy-diatech-monitoring-diagnosis.pdf> (дата обращения 01.02.17).

79. Voith. Service: HyService. Keep your energy flowing // <http://voith.com/en/markets-industries/industries/hydro-power/service-546.html> (дата обращения 01.02.17).

80. **Hans Günther Poll, Jose Carlos Zanutto, Walter Ponge-Ferreira.** Hydraulic power plant machine dynamic diagnosis // *Shock and Vibration*. 13 (2006). P. 409–427.

81. **Aakti B., Amstutz O., Romanelli G., Mangani L., Casartelli E.** On the performance of a high head Francis turbine at design and off-design conditions // *Francis-99 Workshop 1: steady operation of Francis turbines* // *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 579, № 1. 2015, P. 12010–12021(12). DOI:10.1088/1742–6596/579/1/012010

82. **Flores M., Urquiza G, Rodríguez J.M.** A Fatigue Analysis of a Hydraulic Francis Turbine Runner // *World Journal of Mechanics*. 2012. 2. P. 28–34. DOI:10.4236/wjm.2012.21004.

83. **Čačko J.** Modelling of a material degradation and damage mechanics in machine structures under service

loading // *Facta universitatis. Series: Mechanics, Automatic Control and Robotics*. 2003. Vol. 3. No 13. P. 707–714.

84. **Arpin-Pont J., Gagnon M., Tahan S.A., Coutu A., Thibault D.** Methodology for estimating strain gauge measurement biases and uncertainties // *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. Vol. 50, № 1. P. 40–50.

85. **Sedmak A., Bosnjak S., Arsic M., Sedmak S.A., Savic Z.** Integrity and life estimation of turbine runner cover in a hydro power plant // *Frattura ed Integrità Strutturale (Fracture and Structural Integrity)*. 36 (2016) 63–68. DOI:10.3221/IGF-ESIS.36.07

86. **Nedelcu D., Câmpian V.C., Pădurean I.** Service life estimation for runner's blade of an axial turbine // *Rev. Roum. Sci. Techn. Méc. Appl. T.* 53, № 1. P. 9–18, Bucarest, 2008.

87. **Chirag Trivedi, Bhupendra Gandhi, Cervantes Michel.** Effect of transients on Francis turbine runner life: a review // *Journal of Hydraulic Research*. 2013. Iss. First, 1–12. DOI: 10.1080/00221686.2012.732971

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВАСИЛЬЕВ Юрий Сергеевич — доктор технических наук научный руководитель Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, академик РАН. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: president@spbstu.ru

ПЕТРЕНЯ Юрий Кириллович — доктор физико-математических наук заместитель генерального директора-генеральный конструктор ПАО «Силловые машины», член-корреспондент РАН. 195009, Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3А.. E-mail: Petrenya_YK@power-m.ru

ГЕОРГИЕВСКАЯ Евгения Викторовна — кандидат физико-математических наук заведующая лабораторией ОАО «НПО ЦКТИ». 191167, Санкт-Петербург, Атаманская ул. 3/6. E-mail: GeorgievskaiaEV@ckti.ru

REFERENCES

1. **Gajić A., Manzalović P., Predić Z.** Modification of the trailing edges of the large stay vanes and their influence on dynamic stresses. *25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 12 (2010) 012055. DOI:10.1088/1755–1315/12/1/012055

2. **Frunzäverdel D., Muntean S., Mărginean G., Câmpiani V., Marşavina L., Terzi R., Şerban V.** Failure analysis of a Francis turbine runner. *25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 12 (2010) 012115. DOI:10.1088/1755–1315/12/1/012115

3. **Brekke H.** Performance and safety of hydraulic turbines. *25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 12 (2010) 012061. DOI:10.1088/1755–1315/12/1/012061

4. **Liu X., Luo Y.Y., Wang Z.W.** Fatigue Analysis of the Piston Rod in a Kaplan Turbine Based on Crack Propagation under Unsteady Hydraulic Loads. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 1. 2014. P. 12018–12025(8). DOI:10.1088/1755–1315/22/1/012018

posium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Volume 22, Number 1. 2014. P. 12017–12026(10). DOI:10.1088/1755–1315/22/1/012017

5. **Boukani H., Habibzadeh, Viens M., Tahan S.A., Gagnon M.** On the performance of nondestructive testing methods in the hydroelectric turbine industry. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 1. 2014. P. 12019–12029(11). DOI:10.1088/1755–1315/22/1/012019

6. **Thibault D., Gagnon M., Godin S.** Bridging the gap between metallurgy and fatigue reliability of hydraulic turbine runners. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 1. 2014. P. 12019–12029(11). DOI:10.1088/1755–1315/22/1/012019

7. **Storli P-T., Nielsen T.K.** Dynamic load on a Francis turbine runner from simulations based on measurements. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 1. 2014. P. 12019–12029(11). DOI:10.1088/1755–1315/22/1/012019

Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Volume 22, Number 3. 2014. P. 32056–32064(9). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032056

8. **Pejovic S., Karney B.** Guidelines for transients are in need of revision. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 4. 2014. P. 42006–42016(11). DOI:10.1088/1755–1315/22/4/042006

9. **Müller C., Staubli T., Baumann R., Casartelli E.** A case study of the fluid structure interaction of a Francis turbine. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 22 (2014) 032053. DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032053

10. **Gammer J.H., Etter S.** Cracking of Francis runners during transient operation. *Hydropower and Dams. Issue Four*, 2008. S. 81–84.

11. **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.

12. **Pejovic S., Gajic A., Zhang Q.** Smart design requires updated design and analysis guidelines. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 4. 2014. P. 42008–42017(10). DOI:10.1088/1755–1315/22/4/042008

13. **Egusquiza E., Valero C., Huang X., Jou E., Guardo A., Rodriguez C.** Failure investigation of a large pump-turbine runner. *Engineering Failure Analysis*. 23 (2012), p. 27–34.

14. **Zouhar J., Obrovsky J., Feilhauer M., Skotak A.** Case Study and Numerical Analysis of Vibration and Runner Cracks for the Lipno I Hydroelectric Project. *28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 49 (2016) 072011. DOI:10.1088/1755–1315/49/7/072011

15. **Lyutov A., Kryukov A., Cherny S., Chirkov D., Salienko A., Skorospelov V., Turuk P.** Modelling of a Francis Turbine Runner Fatigue Failure Process Caused by Fluid-Structure Interaction. *28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 49 (2016) 072012. DOI:10.1088/1755–1315/49/7/072012

16. **Neto A.D., Gissoni H., Gonçalves M., Cardoso R., Jung A., Meneghini J.** Engineering diagnostics for vortex-induced stay vanes cracks in a Francis turbine. *28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 49 (2016) 072017. DOI:10.1088/1755–1315/49/7/072017

17. *Elektroenergetika v sovremennom mire*. <http://myelectro.com.ua/98-gidroenergetika/132-samye-krupnye-avarii-na-ges> (data obrashcheniya 13.01.17);

18. *Andritz Hydro: servisnoye obsluzhivaniye i rekonstruktsiya*. <http://www.andritz.com/hy-srbrochure-ru.pdf> (data obrashcheniya 13.01.17).

19. *Hydroelectric Power. A Guide for Developers and Investors*. http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/06b2df8047420bb4a4f7ec57143498e5/Hydropower_Report.pdf?MOD=AJPERES (data obrashcheniya 13.01.17).

20. *Voiht. Modernization: A «plus» for both operators and the environment*. <http://voiht.com/en/markets-industries/industries/hydro-power/modernization-547.html> (data obrashcheniya 01.02.17).

21. **Huang X., Chamberland-Lauzon J., Oram C., Klopfer A., Ruchonnet N.** Fatigue analyses of the prototype Francis runners based on site measurements and simulations. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 1. 2014. P. 12014–12021(8). DOI:10.1088/1755–1315/22/1/012014

22. **Seidel U., Mende C., Hübner B., Weber W., Otto A.** Dynamic loads in Francis runners and their impact on fatigue life. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 3. 2014. P. 32054–32062(9). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032054

23. **Lewis B.J., Cimbala J.M., Wouden A.M.** Wicket gate trailing-edge blowing: A method for improving off-design hydroturbine performance by adjusting the runner inlet swirl angle. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 1. 2014. P. 12021–12031(11). DOI:10.1088/1755–1315/22/1/012021

24. **Sick M., Oram C., Braum O., Nenneman B., Coutu A.** Hydro projects delivering regulating power: Technical challenges and cost of operation. *Hydro*. October 7–9, 2013, Innsbruck, Austria.

25. **Nicolle J., Morissette J.F., Giroux A.M.** Transient CFD simulation of a Francis turbine startup. *26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 15 (2012) 062014. DOI:10.1088/1755–1315/15/6/062014

26. **Zhang L.K., Ma Z.Y.** Numerical analysis of a rub-impact rotor-bearing system for hydraulic generating set. *26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 15 (2012) 072015. DOI:10.1088/1755–1315/15/7/072015

27. **Amiri K., Mulu B., Raisee M., Cervantes M.J.** Load variation effects on the pressure fluctuations exerted on a Kaplan turbine runner. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 22 (2014) 032005. DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032005

28. **Nicolle J., Cupillard S.** Prediction of dynamic blade loading of the Francis-99 turbine. Francis-99 Workshop 1: steady operation of Francis turbines. *Journal of Physics: Conference Series* 579. (2015) 012001. DOI:10.1088/1742–6596/579/1/012001

29. Müller A., Favrel A., Landry C., Yamamoto K., Avellan F. On the physical mechanisms governing self-excited pressure surge in Francis turbines. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 3. 2014. P. 32034–32041(8). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032034
30. Yamamoto K., Müller A., Favrel A., Landry C., Avellan F. Pressure measurements and high speed visualizations of the cavitation phenomena at deep part load condition in a Francis turbine. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 2. 2014. P. 22011–22018(8). DOI:10.1088/1755–1315/22/2/022011
31. Mössinger P., Jester-Zürker R., Jung A. Francis-99: Transient CFD simulation of load changes and turbine shutdown in a model sized high-head Francis turbine. *Francis-99 Workshop 2: transient operation of Francis turbines. IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series* 782 (2017) 012001. DOI:10.1088/1742–6596/782/1/012001
32. Jakobsen K-R.G., Holst M.A. CFD simulations of transient load change on a high head Francis turbine. *Francis-99 Workshop 2: transient operation of Francis turbines. IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series* 782. (2017) 012002. DOI:10.1088/1742–6596/782/1/012002
33. Monette C., Marmont H., Chamberland-Lauzon J., Skagerstrand A., Coutu A., Carlevi J. Cost of enlarged operating zone for an existing Francis runner. *28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 49 (2016) 072018. DOI:10.1088/1755–1315/49/7/072018
34. Huang X., Oram C., Sick M. Static and dynamic stress analyses of the prototype high head Francis runner based on site measurement. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 3, 2014. P. 32052–32061(10). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032052
35. Maiwald M., Magnoli M.V. Influence of Hydraulic Design on Stability and on Pressure Pulsations in Francis Turbines at Overload, Part Load and Deep Part Load based on Numerical Simulations and Experimental Model Test Results. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 3, 2014. P. 32013–32020(8) DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032013
36. Gong R.Z., Wang H.G., Yao Y., Shu L.F., Huang Y.J. Numerical simulation of pressure fluctuation in 1000MW Francis turbine under small opening condition. *26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 15 (2012) 062038. DOI:10.1088/1755–1315/15/6/062038
37. Stoessel L., Nilsson H. Steady and unsteady numerical simulations of the flow in the Tokke Francis turbine model, at three operating conditions. *Francis-99 Workshop 1: steady operation of Francis turbines. Journal of Physics: Conference Series*. Volume 579, Number 1. 2015, P. 12011–12024(14). DOI:10.1088/1742–6596/579/1/012011
38. Bouloc F., Guillozet J., Duparchy F., Lowys P.Y., Duparchy A. Mechanical risks prediction on Francis runner by Spatial Harmonic Decomposition. *28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 49 (2016) 072015. DOI:10.1088/1755–1315/49/7/072015
39. Valentín D., Ramos D., Bossio M., Presas A., Egusquiza E., Valero C. Influence of the boundary conditions on the natural frequencies of a Francis turbine. *28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 49 (2016) 072004. DOI:10.1088/1755–1315/49/7/072004
40. Hübner B., Weber W., Seidel U. The role of fluid-structure interaction for safety and life time prediction in hydraulic machinery. *28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 49 (2016) 072007. DOI:10.1088/1755–1315/49/7/072007
41. Trudel A., Sabourin M. Metallurgical and fatigue assessments of welds in cast welded hydraulic turbine runners. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 1. 2014. P. 12015–12025(11). doi.org/10.1088/1755–1315/22/1/012015
42. Obrovsky J., Zouhar J. Experiences with the hydraulic design of the high specific speed Francis turbine. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 1. 2014. P. 12027–12035(9). DOI:10.1088/1755–1315/22/1/012027
43. He L.Y., Wang Z.W., Kurosawa S., Nakahara Y. Resonance investigation of pump-turbine during startup process. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 3. 2014. P. 32024–32031(8). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032024
44. Valentín D., Presas A., Egusquiza E., Valero C. Influence of the added mass effect and boundary conditions on the dynamic response of submerged and confined structures. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 3. 2014. P. 32042–32051(10). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032042
45. Presas A., Valentín D., Egusquiza E., Valero C., Seidel U. Experimental analysis of the dynamic behavior of a rotating disk submerged in water. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22,

Number 3. 2014. P. 32043–32050(8). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032043

46. **Nennemann B., Morissette J.F., Chamberland-Lauzon J., Monette C., Braun O., Melot M., Coutu A., Nicolle J., Giroux A.M.** Challenges in Dynamic Pressure and Stress Predictions at No-Load Operation in Hydraulic Turbines. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 3. 2014. P. 32055–32064(10). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032055

47. **Gagnon M., Tahan S.A., Bocher P., Thibault D.** Impact of startup scheme on Francis runner life expectancy. *25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 12 (2010) 012107. DOI:10.1088/1755–1315/12/1/012107

48. **Arpin-Pont J., Gagnon M., Tahan S.A., Coutu A., Thibault D.** Strain gauge measurement uncertainties on hydraulic turbine runner blade. *26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 15 (2012) 062042. DOI:10.1088/1755–1315/15/6/062042

49. **Monette C., Nennemann B., Seeley C., Coutu A., Marmont H.** Hydro-dynamic damping theory in flowing water. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 22 (2014) 032044. doi:10.1088/1755–1315/22/3/032044

50. **Côté P., Dumas G., Moisan É., Boutet-Blais G.** Numerical investigation of the flow behavior into a Francis runner during load rejection. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 3. 2014. P. 32023–32033(11). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032023

51. **Feng J.J., Li W.F., Wu H., Lu J.L., Liao W.L., Luo X.Q.** Investigation on pressure fluctuation in a Francis turbine with improvement measures. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 3. 2014. P. 32006–32014(9). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032006

52. **Yang J., Gao L., Wang Z.W., Zhou X.Z., Xu H.X.** The flow field investigations of no load conditions in axial flow fixed-blade turbine. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 3. 2014. P. 32028–32035(8). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032028

53. **Pochylý P., Fialová S., Kozubková M., Bojko M.** Tensors of added damping, stiffness and mass in a thin gap of hydrodynamic machine. *26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 15, (2012) 072027–072034. DOI:10.1088/1755–1315/15/7/072027

54. **Zheng X.B., Guo P.C., Luo X.Q.** Numerical simulation of fluid-structure interaction for axial flow blade based on weak coupling. *26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 15 (2012) 062012. DOI:10.1088/1755–1315/15/6/062012

55. **Bucur D.M., Dunca G., Călinoiu C.** Experimental vibration level analysis of a Francis turbine. *26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 15 (2012) 062056. DOI:10.1088/1755–1315/15/6/062056

56. **Favrel A., Landry C., Müller A., Avellan F.** Experimental identification and study of hydraulic resonance test rig with Francis turbine operating at partial load. *26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 15 (2012) 062064. DOI:10.1088/1755–1315/15/6/062064

57. **Bai B., Zhang L.X., Zhao L.** Influences of the guide bearing stiffness on the critical speed of rotation in the main shaft system. *26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 15 (2012) 072028. DOI:10.1088/1755–1315/15/7/072028

58. **Javadi A., Nilsson H.** Unsteady numerical simulation of the flow in the U9 Kaplan turbine model. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 22 (2014) 022001. DOI:10.1088/1755–1315/22/2/022001

59. **Mangani L., Buchmayr M., Darwish M.** A block coupled solver development for hydraulic machinery applications. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 22 (2014) 022002. DOI:10.1088/1755–1315/22/2/022002

60. **Zhang Y.L., Yuan S.Q., Zhang J.F., Feng Y.N., Lu J.X.** Numerical investigation of the effects of splitter blades on the cavitation performance of a centrifugal pump. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 22 (2014) 052003. DOI:10.1088/1755–1315/22/5/052003

61. **Moisan É., Giacobbi D.-B., Gagnon M., Léonard F.** Self-excitation in Francis runner during load rejection. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Publishing IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 22 (2014) 032025. DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032025

62. **Meng L., Zhang S.P., Zhou L.J., Wang Z.W.** Study on the Pressure Pulsation inside Runner with Splitter Blades in Ultra-High Head Turbine. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 22, Number 3. 2014. P. 32012–32018(7). DOI:10.1088/1755–1315/22/3/032012

63. **Ko P., Kurosawa S.** Numerical simulation of turbulence flow in a Kaplan turbine — Evaluation on turbine

performance prediction accuracy. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 22 (2014) 022006. DOI:10.1088/1755-1315/22/2/022006

64. **Morissette J.F., Chamberland-Lauzon J., Nennemann B., Monette C., Giroux A.M., Coutu A., Nicolle J.** Stress predictions in a Francis turbine at no-load operating regime. *28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 49 (2016) 072016. DOI:10.1088/1755-1315/49/7/072016

65. **Sabourin M., Thibault D., Bouffard D.A., Lévesque M.** New parameters influencing hydraulic runner lifetime. *25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 12 (2010) 012050. DOI:10.1088/1755-1315/12/1/012050

66. **Huang X., Escaler X.** Added mass effects of attached cavitation on the blades of a Francis runner. *ISROMAC 2016 International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*. Hawaii, Honolulu April 10–15, 2016.

67. **Zhongyu Mao, Zhengwei Wang.** Structural Characteristic in Prototype Runner of Francis Turbine Analysis. *ISROMAC 2016 International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*. Hawaii, Honolulu April 10–15, 2016.

68. **Zhenyue Ma, Qianqian Wu.** Study on Dynamic Characteristics of Rotor-bearing Model in the Hydraulic-mechanical-electric Coupled System of Hydro Generator Unit. *ISROMAC 2016 International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*. Hawaii, Honolulu April 10–15, 2016.

69. **Čelič D., Ondráčka H.** The influence of disc friction losses and labyrinth losses on efficiency of high head Francis turbine. *Francis-99 Workshop 1: steady operation of Francis turbines. Journal of Physics: Conference Series* 579(2015)012007. DOI:10.1088/1742-6596/579/1/012007.

70. **Mössinger P., Jester-Zürker R., Jung F.** Investigation of different simulation approaches on a high-head Francis turbine and comparison with model test data: Francis-99. *Francis-99 Workshop 1: steady operation of Francis turbines. IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series* 579 (2015) 012005–012019. DOI:10.1088/1742-6596/579/1/012005

71. **Jošt D., Škerlavaj A., Morgut M., Mežnar P., Nobile E.** Numerical simulation of flow in a high head Francis turbine with prediction of efficiency, rotor stator interaction and vortex structures in the draft tube. *Francis-99 Workshop 1: steady operation of Francis turbines. Journal of Physics: Conference Series*. Volume 579, Number 1. 2015, P. 12006–12025(20). DOI:10.1088/1742-6596/579/1/012006

72. **Zhao Yaping, Liao Weili, Ruan Hui, Luo Xingqi.** Performance study for Francis-99 by using different turbulence models. *Francis-99 Workshop 1: steady operation*

of Francis turbines. Journal of Physics: Conference Series. 579 (2015) 012012. DOI:10.1088/1742-6596/579/1/012012

73. **Buron J.D., Houde S., Lestriez R., Deschênes C.** Application of the non-linear harmonic method to study the rotor-stator interaction in Francis-99 test case. *Francis-99 Workshop 1: steady operation of Francis turbines. Journal of Physics: Conference Series*. 579 (2015) 012013. DOI:10.1088/1742-6596/579/1/012013

74. **Minakov A., Platonov D., Sentyabov A., Gavrilov A.** Francis-99 turbine numerical flow simulation of steady state operation using RANS and RANS/LES turbulence model. *Francis-99 Workshop 2: transient operation of Francis turbines. IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 782 (2017) 012005. DOI:10.1088/1742-6596/782/1/012005

75. **Gavrilov A., Dekterev A., Minakov A., Platonov D., Sentyabov A.** Steady state operation simulation of the Francis-99 turbine by means of advanced turbulence models. *Francis-99 Workshop 2: transient operation of Francis turbines. IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series* 782 (2017) 012006. DOI:10.1088/1742-6596/782/1/012006

76. **Østby P.T.K., Billdal J.T., Haugen B., Dahlhaug O.G.** On the relation between friction losses and pressure pulsations caused by Rotor Stator interaction on the Francis-99 turbine. *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series* 782 (2017) 012010. DOI:10.1088/1742-6596/782/1/012010

77. Andritz Hydro: Research and development. http://www.andritz.com/hy-rd_en.pdf (data obrashcheniya 01.02.17).

78. Andritz Hydro: DIA TECH Monitoring and Diagnosis System. <http://www.andritz.com/hy-diatech-monitoring-diagnosis.pdf> (data obrashcheniya 01.02.17).

79. Voith. Service: HyService. Keep your energy flowing. <http://voith.com/en/markets-industries/industries/hydro-power/service-546.html> (data obrashcheniya 01.02.17).

80. **Hans Günther Poll, Jose Carlos Zanutto, Walter Ponge-Ferreira.** Hydraulic power plant machine dynamic diagnosis. *Shock and Vibration* 13 (2006) 409–427.

81. **Aakti B., Amstutz O., Romanelli G., Mangani L., Casartelli E.** On the performance of a high head Francis turbine at design and off-design conditions. *Francis-99 Workshop 1: steady operation of Francis turbines. Journal of Physics: Conference Series*. Volume 579, Number 1. 2015, P. 12010–12021(12). DOI:10.1088/1742-6596/579/1/012010

82. **Flores M., Urquiza G, Rodríguez J.M.** A Fatigue Analysis of a Hydraulic Francis Turbine Runner. *World Journal of Mechanics*, 2012, 2, P. 28–34. DOI:10.4236/wjm.2012.21004.

83. **Čačko J.** Modelling of a material degradation and damage mechanics in machine structures under service loading. *Facta universitatis. Series: Mechanics, Automatic Control and Robotics*. Vol.3, No 13, 2003, P. 707–714.

84. **Arpin-Pont J., Gagnon M., Tahan S.A., Coutu A., Thibault D.** Methodology for estimating strain gauge mea-

surement biases and uncertainties. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. Volume 50, № 1. P. 40–50.

85. **Sedmak A., Bosnjak S., Arsic M., Sedmak S.A., Savic Z.** Integrity and life estimation of turbine runner cover in a hydro power plant. *Frattura ed Integrità Strutturale (Fracture and Structural Integrity)*. 36 (2016) 63–68. DOI:10.3221/IGF-ESIS.36.07

86. **Nedelcu D., Sâmpian V.C., Răducean I.** Service life estimation for runner's blade of an axial turbine. *Rev. Roum. Sci. Techn. – Méc. Appl.*, T. 53, № 1, P. 9–18, Bucarest, 2008.

87. **Chirag Trivedi, Bhupendra Gandhi, Cervantes Michel.** Effect of transients on Francis turbine runner life: a review. *Journal of Hydraulic Research*. Issue First. 2013. 1–12. DOI: 10.1080/00221686.2012.732971

AUTHORS

VASILIEV Yurii S. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: president@spbstu.ru

PETRENYA Yurii K. — *PJSC «Power Machines»*. 3A, Vatutina str., St. Petersburg, Russia, 195009.. E-mail: Petrenya_YK@power-m.ru

GEORGIEVSKAIA Evgeniia V. — *JSC «NPO CKTI»*. 3/6, Atamanskaya st., St. Petersburg, 191167. E-mail: GeorgievskaiiaEV@ckti.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 02.03.2017.