



А.А. РОМАНОВ
С.В. ЕВДОКИМОВ
В.А. СЕЛИВЁРСТОВ

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ НА ЛОПАСТЯХ РАБОЧИХ КОЛЕС ЖИГУЛЕВСКОЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

STUDY OF THE PROCESS OF CAVITATION EROSION ON THE IMPELLERS OF THE ZHIGULI HYDROELECTRIC POWER PLANT

Представлены результаты изучения процесса кавитационной эрозии на лопастях рабочих колес Жигулевской гидроэлектростанции. Описана методика проведения натурных кавитационных испытаний методом скоростной эрозии с применением пластин мягкого металла наклеиваемых на предполагаемые зоны появления кавитационных разрушений. Кавитационные испытания проведены для трех характерных режимов эксплуатации, с обоснованием технологической особенности натурной эксплуатации гидротурбинных установок. Приведены результаты исследования лопастей гидротурбины агрегата № 5 для трех режимов. Визуализированы зоны разрушения периферийных кромок лопасти рабочего колеса. Результаты исследований параметров потока для различных режимов приведены в табличной форме.

Ключевые слова: кавитационная эрозия, лопасти рабочего колеса гидротурбины, метод скоростной эрозии, водопроводящий тракт, механическое воздействие водного потока

The results of studying the process of cavitation erosion on the blades of the impellers of the Zhigulevskaya hydroelectric power plant are presented. The technique of carrying out full-scale cavitation tests by the method of high-speed erosion with the use of soft metal plates pasted onto the suspected zones of the appearance of cavitation damages is described. Cavitation tests were carried out for three characteristic operating modes, with a substantiation of the technological peculiarity of full-scale operation of hydroturbine installations. The results of the investigation of the turbine blades of the unit No. 5 for three regimes are presented. Areas of destruction of the peripheral edges of the impeller blade are visualized. The results of research on the flow parameters for different regimes are given in tabular form.

Keywords: cavitation erosion, turbine blade impeller, rapid erosion method, water-conducting path, mechanical effect of water flow

Проблема кавитационной эрозии в проточных трактах гидроэнергетических установок обнаружилась сразу с появлением гидравлических машин, но вопросами способов борьбы с кавитационным разрушением стали заниматься только с 20-х гг. прошлого века [1–5].

Одной из причин кавитационной эрозии является механическое воздействие водного потока в проточных трактах гидроэнергетических установок [6–9].

Кроме разрушения поверхностей водопроводящего тракта, кавитация влияет на режим работы гидроэнергетических установок, коэффициент полезного действия и на выработку электроэнергии.

Наиболее распространенные кавитационные повреждения наблюдаются на водопроводящих трактах гидроэнергетических установок, имеющих плохо обтекаемую форму, различные выступы и неровности по движению водного потока. Срывные кавитации образуются в начальной стадии на осях

вращения вихрей, а каверны срывной кавитации развиваются с периодом, подчиняющимся закону Струхала.

Один из методов натурных наблюдений за кавитационной эрозией основан на получении скоростной кавитационной эрозии. Применение метода дает возможность определить степень и интенсивность эрозии при различных режимах работы гидроэнергетических установок.

Для кавитационных испытаний методом скоростной эрозии был выделен агрегат № 5. Турбина агрегата имеет шесть лопастей, выполненных из нержавеющей стали марки 20Х13Н-Л, наиболее стойкой к воздействию кавитации в любых условиях работы ГЭС.

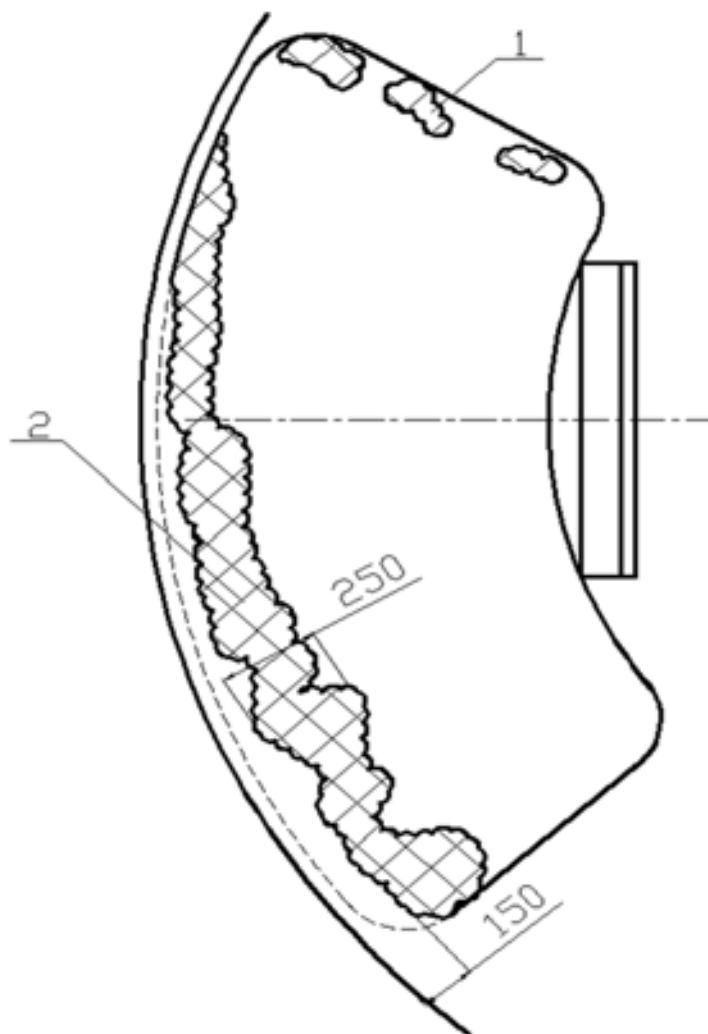
Методика проведения натурных кавитационных испытаний методом скоростной эрозии такая же, как и при лабораторных исследованиях. На остановленном агрегате с осушенной проточной частью

турбины производится наклейка алюминиевых пластин. После сушки на воздухе в течение двух суток пластины освобождаются от струбцин, агрегат запускается и выбирается соответствующая мощность для проведения первого режима испытаний. Между пуском агрегата и выбором требуемой мощности должно быть минимальное время для того, чтобы переходные режимы не оставили на пластинах кавитационных следов. Такое же требование существует и для остановки агрегата после окончания испытаний. После окончания режима агрегат должен быть сразу остановлен.

Кавитационные испытания проводились для следующих характерных случаев и режимов:

I режим – мощность агрегата $N_a = 100$ МВт при напоре $H = 24,47$ м и уровне нижнего бьефа около 26,70 м.

При таком режиме работы гидротурбины, по напору и уровню нижнего бьефа, допустимая по кави-



Зоны разрушения периферийных кромок лопасти рабочего колеса:
1 – зона входной кромки; 2 – зона выходной кромки

тации (по характеристикам завода изготовителя) мощность агрегата составляет 109 МВт. Пониженная мощность агрегата $N_a = 100$ МВт была выбрана из условия возможного дополнительного подтопления рабочего колеса на 1,5 м. В результате проведения I режима должен был быть выявлен характер кавитационной эрозии в бескавитационном режиме работы турбины.

II режим – мощность агрегата $N_a = 118$ МВт при напоре $H = 25,18$ м и уровне нижнего бьефа около 26,20 м.

Допустимая по кавитации мощность, по заводским характеристикам, равна 109 МВт. Мощность агрегата $N_a = 118$ МВт выбрана из условий изменения уровней нижнего бьефа по эксплуатационной характеристике на 1,5 м.

III режим – мощность агрегата $N_a = 125$ МВт при напоре $H = 24$ м и уровне нижнего бьефа 27,00 м. В результате проведения III режима должна быть выявлена кавитационная эрозия при повышенной мощности агрегата.

Продолжительность каждого режима составила 2 часа, каждые 0,5 часа фиксировались показатели работы гидротурбины.

После проведения каждого из кавитационных режимов производилось закрытие спиральной камеры быстропадающим щитом и осушение спиральной камеры и рабочего колеса турбины, после чего производилось определение мест кавитационного разрушения и их фиксирование.

В процессе кавитационных испытаний несколько алюминиевых пластин было оторвано, причём отрыв пластин происходил из-за некачественного приклеивания. Отрыв происходил даже в случае наличия винтов.

В результате проведения I режима было получено эрозийное разъедание в зоне выходной кромки (вблизи периферийной кромки лопасти) (см. рисунок).

Интенсивность кавитационной эрозии доходила до 60 ямок на 1 см^2 . Общая зона эрозии составляет около $0,071 \text{ м}^2$. Таким образом, даже при бескавитационном режиме работы турбины на лопастях проявлялись последствия кавитационной эрозии.

Исследования III режима показали увеличение мест кавитационной эрозии, причём, если на I режиме зона эрозии располагалась в зоне выходной кромки, то для II режима эти зоны располагаются не только на выходной кромке, но и по периферийному сечению лопасти. Интенсивность кавитационной эрозии осталась прежней, а площадь зоны кавитации увеличилась до $0,225 \text{ м}^2$.

Исследование III режима показало значительное увеличение как площади эрозии, так и интенсивности кавитационной эрозии. Интенсивность кавитационной эрозии увеличилась до 200-250 ямок на 1 см^2 . Характер распределения эрозийных зон примерно сохранился такой же, как и во II режиме, только прибавились новые зоны эрозии.

В таблице приведены скорости и расходы потока в рабочем колесе турбины при различных напорах для испытанных кавитационных режимов.

Параметры потока для различных режимов кавитационных испытаний

№ режима	$m, \text{мм}$	ϕ^0	$H, \text{м}$	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	$V, \text{м}/\text{с}$
I	887	+620	24,45	465	23,80
II	937	+830	25,20	530	25,40
III	1020	+1530	24,40	585	23,40

Из таблицы следует, что скорости потока на турбине для III режима были сопоставимы с I режимом, но меньше, чем во II режиме, при этом кавитационная эрозия заметно увеличилась. Это объясняется плохой обтекаемостью лопастей рабочего колеса. Неровности на поверхности лопасти оставляют за собой заметный кавитационный след на поверхности алюминиевых пластин.

Большие зоны кавитационной эрозии приходятся на начальную стадию кавитации, с интенсивностью эрозии до 10-15 ямок на 1 см^2 . Это ещё не разрушение, но при более длительном времени работы или при увеличении мощности агрегата предполагается увеличение интенсивности эрозии.

Максимальный диаметр ямок для I и II режимов составляет 0,5 мм. При исследовании III режима максимальный диаметр ямок достигал 2 мм.

Выводы. 1. Натурные исследования кавитационного процесса на лопастях рабочего колеса показали, что максимальный размер язвин на натурном объекте больше модельных до четырех раз. Это объясняется существованием пограничного слоя на лопасти, величина которого пропорциональна размерам лопасти. В пограничном слое существует свое движение, связанное с движением водного потока.

2. При кавитации в турбинах снижается КПД и пропускная способность рабочего колеса, а также разрушаются отдельные элементы проточного тракта. Появление кавитации можно обнаружить по треску, шуму и ударам.

3. Наиболее уязвимыми с точки зрения кавитации являются быстроходные турбины вследствие больших скоростей в зоне рабочего колеса и за счет значительного понижения давления в зоне отсасывания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технический отчет о проектировании и строительстве Волжской ГЭС имени В.И. Ленина: в 2 т. 1950–1958 гг.
2. Кавитационные исследования лопастей рабочих колес турбин Волжской ГЭС им. В.И. Ленина / Гидропроект. М., 1961.
3. Натурные исследования турбин Волжской ГЭС им. В.И. Ленина / Котлотурбинный институт им. Ползунова. М., 1963.
4. ГОСТ Р 55260.3.2-2013. Гидроэлектростанции. Ч. 3-2. Гидротурбины. Методики оценки технического состояния. М., 2013.
5. СТО РусГидро 02.03.93-2013. Гидротурбины вертикальные. Контроль металла лопастей и камер рабочих колес. М., 2013.
6. РД 24.122.15-89. Методы расчета на усталостную прочность лопастей гидравлических поворотных лопастных турбин. М., 1989.
7. РД 153-34.2-31.604-2002. Рекомендации по ремонту и реконструкции камер рабочих колес гидроагрегатов с целью повышения их эксплуатационной надежности. М., 2002.
8. Справочник по эксплуатации и ремонту гидротурбинного оборудования. М.: Энергоатомиздат, 1985.
9. Исследование динамических условий работы металлических облицовок камер рабочего колеса ПЛ-турбин Волжской ГЭС им. В.И. Ленина / НИИ Гидротехники им. Б.Е. Веденеева. Л., 1987.

Об авторах:

РОМАНОВ Алексей Александрович
кандидат технических наук, профессор
главный эксперт ОАО «Жигулевская ГЭС»
445350, Россия, г. Жигулевск, ул. Комсомольская, 21

ROMANOV Alexey A.
PhD in Engineering Science, hE
Chief Expert of JSC «Zhigulevskaya HPP»
445350, Russia, Zhigulevsk, Komsomolskaya str., 21

ЕВДОКИМОВ Сергей Владимирович
кандидат технических наук, заведующий кафедрой
природоохранного и гидротехнического строительства
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194,
тел. (846)242-21-71
E-mail: sali5@mail.ru

EVDOKIMOV Sergey V.
PhD in Engineering Science, Head of the Environmental and Hydraulic Engineering Chair
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194,
tel. (846)242-21-71
E-mail: sali5@mail.ru

СЕЛИВЁРСТОВ Владимир Александрович
кандидат технических наук, доцент кафедры
природоохранного и гидротехнического строительства
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194,
тел. (846)242-21-71
E-mail: v.a.seliverstov@yandex.ru

SELIVERSTOV Vladimir A.
PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Environmental and Hydraulic Engineering Chair
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194,
tel. (846)242-21-71
E-mail: v.a.seliverstov@yandex.ru

Для цитирования: Романов А.А., Евдокимов С.В., Селивёрстов В.А. Изучение процесса кавитационной эрозии на лопастях рабочих колес Жигулевской гидроэлектростанции // Градостроительство и архитектура. 2018. Т.8, С. 56-59. №2. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.02.9.

For citation: Romanov A.A., Evdokimov S.V., Seliverstov V.A. Study of the Process of Cavitation Erosion on the Impellers of the Zhiguli Hydroelectric Power Plant // Urban Construction and Architecture. 2018. V.8, 2. Pp. 56-59. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.02.9.