

УДК 621.224.1

С.В. Фотин, С.Н. Матюшечкин, Н.В. Фотина
ОАО «НИИЭС», г. Москва, Россия
Тел./Факс: +79645890414; E-mail: ckbgeo@niies.ru

АНАЛИЗ ФАКТИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАТОРА ГИДРОТУРБИНЫ НОВОСИБИРСКОЙ ГЭС МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В статье представлены результаты структурного анализа колонны статора турбины Новосибирской ГЭС. Моделирование проводилось методом конечных элементов. В качестве начальных условий использовались геометрия колонны, механические свойства материалов, статические и динамические нагрузки и воздействия. Так же были использованы магнитные методы неразрушающего контроля, ультразвукового контроля и испытаний на твердость. В результате комплексного неразрушающего контроля были найдены трещины в колонне. Это позволило оценить фактический запас прочности колонны.

Ключевые слова: структурный анализ, метод конечных элементов, ГЭС, колонна статора турбины, деформации, неразрушающий контроль (НК), ультразвуковой контроль, испытание твердости

Техническое перевооружение и реконструкция основного и вспомогательного оборудования генерирующих филиалов ОАО «РусГидро» (Российская Федерация) является одной из ключевых задач, обеспечивающих стабильное существование всей энергетической отрасли. Поэтому оценка фактического состояния основных, ресурсопределяющих элементов оборудования гидроэлектростанций (ГЭС) является актуальной задачей.

Современный уровень развития вычислительной техники, программно-математического обеспечения, суперкомпьютерных и грид-технологий (с учетом современных достижений в области механики деформируемого твердого тела), доказывает, что качественный анализ технического состояния и расчетное обоснование остаточного ресурса металлоконструкций возможен только при применении достоверных методов расчетного определения напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкций [1]. При этом следует помнить о проблемах получения точной информации о степени деградации механических свойств металла под воздействием эксплуатационных факторов с учетом диагностических данных выявления повреждений и дефектов в элементах конструкций. Лишь при соблюдении указанных требований может быть выполнена надежная и достоверная (объективная) оценка технического состояния элементов оборудования гидроэнергетических объектов.

Важным фактом является то, что при реконструкции и замене гидроэнергетического оборудования отработавшего свой нормативный срок эксплуатации изменяются энергетические показатели: увеличение мощности гидроагрегата, увеличение его КПД, уменьшение кавитационных воздействий и т.д.

При этом в объемы реконструкции входит только замена рабочего колеса, камеры рабочего колеса, лопаток направляющего аппарата и ряда др., а такие несущие элементы конструкции, как колонны статора гидротурбины, остаются неизменными. Причем на конструкцию статора приходятся как весовые нагрузки, так и динамические

воздействия от вибрации и потока. Отсутствие возможности замены статора гидротурбин обусловлено тем, что данный узел является закладным элементом гидротехнического сооружения и его замена связана с нарушением целостности железобетона, в котором закреплены пояса конструкции.

Именно с такими проблемами столкнулись сотрудники Центра контроля безопасности гидроэнергетического оборудования (ЦКБ ГЭО) ОАО «НИИЭС» при проведении комплекса работ по обследованию оборудования с целью оценки возможности его дальнейшей эксплуатации при замене оборудования. Так, при проведении работ по контролю металла методом магнитной памяти металла (МПМ) [2] на одной из колонн была обнаружена трещина. Данный факт потребовал проведения расчетных мероприятий по оценке фактического трехмерного НДС конструкции в целом методом конечных элементов, реализованным в программном комплексе ANSYS.

Реализация комплексного подхода строилась в соответствии с [3] по следующим этапам. После описания геометрических параметров трещины (длина, ширина, глубина) в типовых формулярах, регламентированных нормативной документацией было решено восстановить поверочные прочностные расчеты, которые выполнял генпроектировщик в 1956 году. После осуществления всех процедур с запросами документации у ОАО «Турбоатом» (г.Харьков, Украина), специалистами ОАО «НИИЭС» была построена параметрическая 3D модель колонны с дефектом (колонна № 15). Для реализации CAD-модели (ComputerAidedDesign)использовался программный комплексSolidWorks, в т.ч. включая ее аппроксимацию конечно-элементной сеткой. На рис.1 представлена CAD-модель статора Новосибирской ГЭС в сборе. При этом модель реализована без каких либо упрощений и допущений в геометрии.

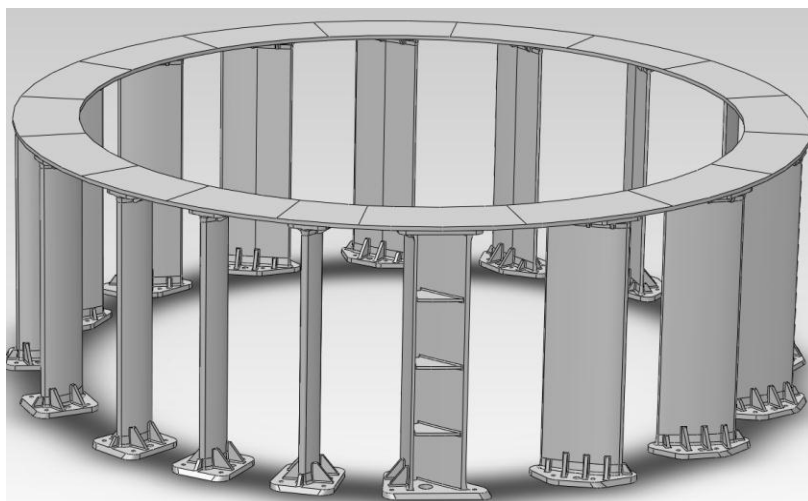


Рис. 1. Модель статора Новосибирской ГЭС в сборе

Для обеспечения возможности оценки изменения фактического НДС анализ проводился для двух постановок задач и, как следствие, двух конечно-элементных моделей. Так, на рис.2. представле на модель, предназначенная для проведения поверочного прочностного расчета по проектным данным. На рис.3 представлена модель колонны статора с учетом данных технической диагностики для анализа фактического напряженно-деформированного состояния.

Для анализа фактического НДС использовались данные о геометрии самого дефекта, так и сведения о деградации физико-механических свойств материала в процессе длительной эксплуатации. Данные сведения были получены путем проведения типовых испытаний образцов на одноосное растяжения сотрудниками ЦКТИ им. Ползунова (г. Санкт-Петербург, Россия).

Геометрические параметры дефекта составили:

- длина 107 мм;
- высота 0,26 мм;
- глубина 12 мм.

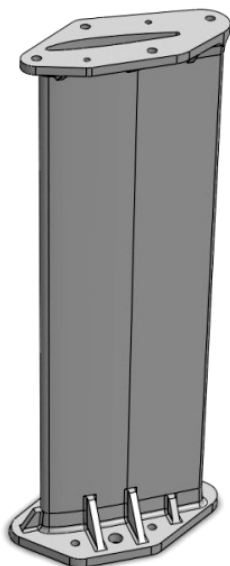


Рис. 3. Модель КС для поверочного расчета

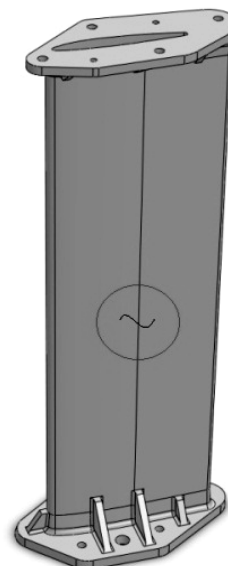


Рис. 4. Модель КС с дефектом

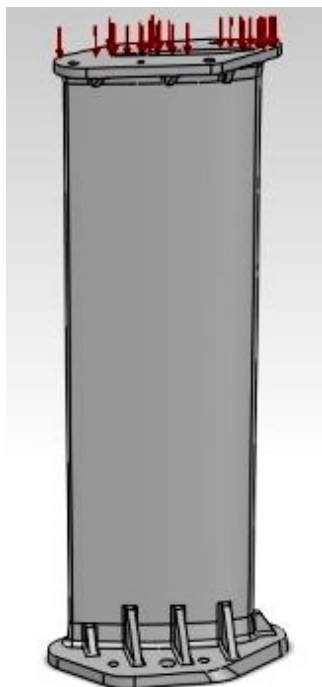


Рис. 5. Нагрузка на верхний башмак 7,81 МПа

На рис. 5. Представлена модель колонны № 15 с нагрузкой приложенной к верхнему башмаку в виде давления (пересчитанная весовая нагрузка).

На рис.6. и рис.7. представлены варианты граничных условий 1-го рода в виде заделки от перемещений верхнего и нижнего башмаков колонны. На рис.11. перемещение верхнего башмака ограничено по осям X и Z полностью, по оси Y перемещения свободные.

На рис.7. представлена жесткая заделка нижнего башмака по всем направлениям.

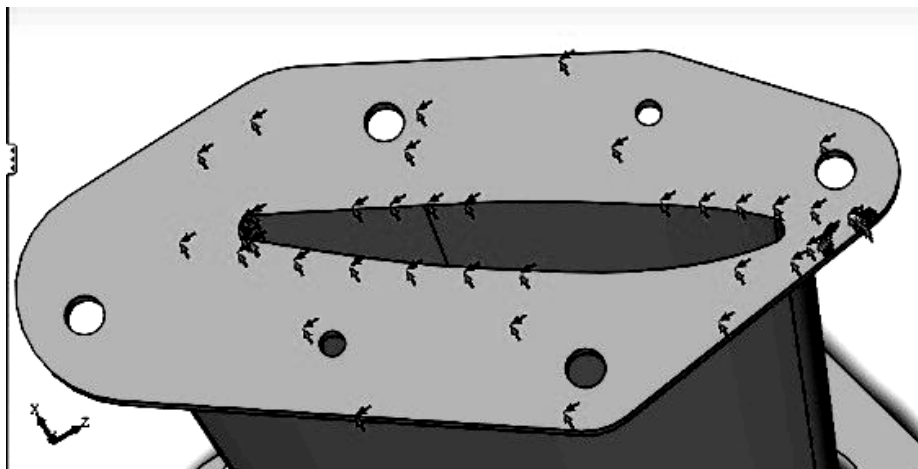


Рис. 6. ГУ I-го рода на верхнем башмаке

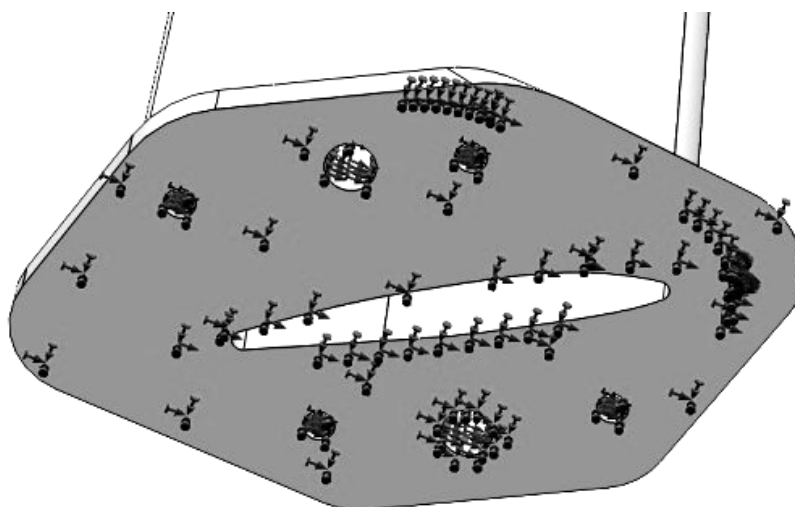


Рис.7. Башмак закрплён жёстко, по плоскости и отверстиям

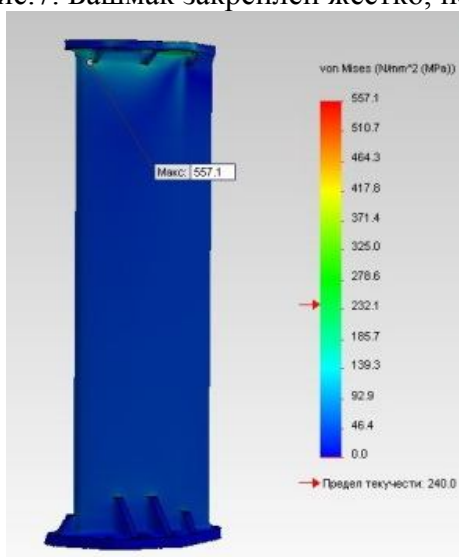


Рис. 8. Модель КС для поверочного расчета

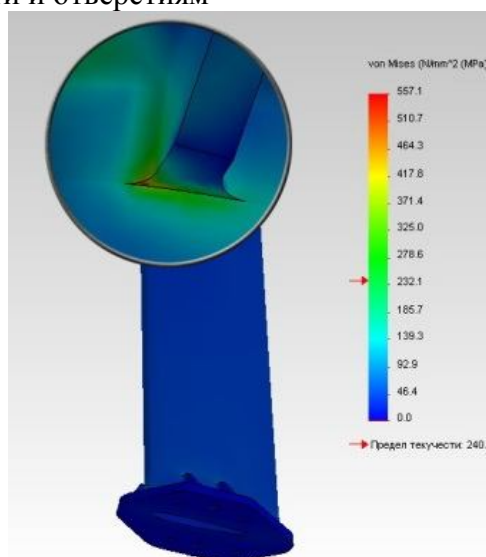


Рис. 9. Модель КС с дефектом

Нижче представлені результати аналізу фактичного НДС методами 3Dматематического моделювання. На рис. 8, 9 представлені результати поверочного розрахунку по відновленій геометрії із чертежів ОАО «Турбоатом».

На рис. 10 і 11 результати численного аналізу фактичного НДС з дефектом.

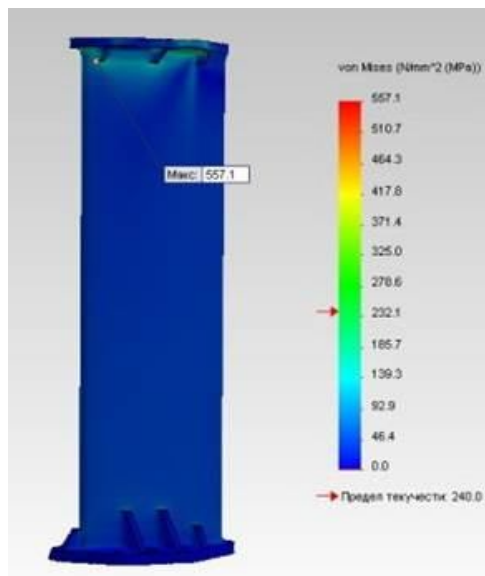


Рис. 10. Модель КС для поверочного розрахунку

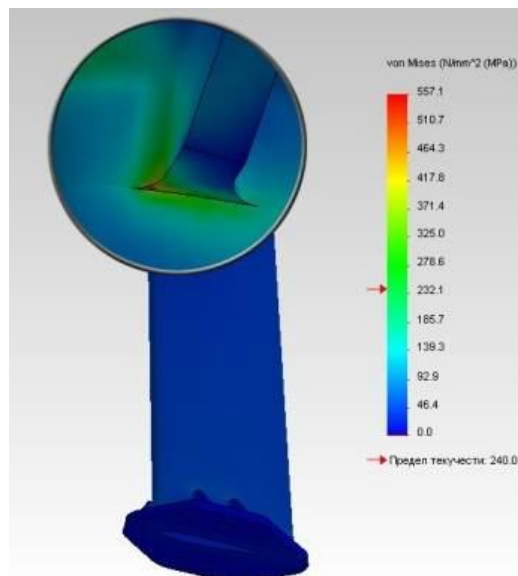


Рис. 11. Модель КС з дефектом

Для колонни, не маючої дефектів, коефіцієнт запаса розраховувався по залежності:

$$\frac{\sigma_{\text{в}}}{\sigma_{\text{расч}}}$$

Розрахунковий коефіцієнт запаса міцності колонни склав величину: 9,26 (розрахункове значення НДС в центральній горизонтальній площині становить 47,6 МПа).

При наявності в колонні дефекта, в формі описаної раніше тріщини, розрахований коефіцієнт запаса міцності склав 3,43 для лівої верхньої тріщини і 3,94 для правої верхньої (розрахункове значення НДС для лівої верхньої тріщини 128,3 МПа і для правої 111,8 МПа).

Результати тривимірного численного аналізу показали:

- Модель колонни без дефектів, розрахунковий коефіцієнт запаса становить величину 9,26, а з наявністю дефекта в формі тріщини, величина має наступні значення: ліва верхня тріщина 3,43, права верхня тріщина 3,94. Таким чином, коефіцієнт запаса колонни знижується до значень: **ліва верхня тріщина в 2,7 рази, права верхня тріщина в 2,35 рази.**

- По результатам оцінки моделі колонни з тріщиною – лавиноподібного поширення тріщини при вказаних розрахункових навантаженнях не спостерігалося, так як виконується нерівність:

$$3,44 < 14 \div 123 \text{ МПа} \cdot \sqrt{H}$$

Висновки:

- створена діюча 3D модель статора гідротурбіни Новосибірської ГЕС ГА №4, що дозволяє проводити аналіз фактичного напружено-деформованого стану, як всього статора, так і його окремих елементів з урахуванням змінюючихся параметрів стану металу і геометрії.

- проведено анализ фактического напряженно-деформированного состояния колонны № 15 с реальным дефектом, обнаруженным в процессе инструментального контроля.
- проведена количественная оценка фактического запаса прочности (дефект в виде трещины привел к снижению запаса прочности в 2,7 раза)
- апробирован эффективный инструмент для ранжирования сроков ремонта и замены по фактическому состоянию, в т.ч. по организации периодического мониторинга состояния колонны №15 при каждом осушении.

Список литературы:

1. Numerical simulation of gas pipeline networks: theory, computational implementation, and industrial application, Ed. by V.E. Seleznev, Moscow: KomKniga, 2005. – 720p.
2. Власов В.Т., Дубов А.А. Физическая теория «деформация – разрушение» Издательская лицензия ЛР № 066367 ISBN 5-8122-0360-1, Москва, 2007.
3. Фотин С.В., Хазиахметов Р.М., Матюшечкин С.Н. Создание технологии расчетной оценки фактической прочности и остаточного ресурса элементов основного гидроэнергетического оборудования методами математического моделирования (на примере лопасти рабочего колеса турбины типа ПЛ). - Сборник тезисов докладов седьмой научно-технической конференции «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии», г. Санкт-Петербург, 25-27 октября, 2012 г. – стр. 7

Надійшла до редколегії 17.06.2014р.

С.В. Фотін С.В., С.Н. Матюшечкін, Н.В. Фоїна

АНАЛІЗ ФАКТИЧНОГО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТАТОРА ГІДРОТУРБИНИ НОВОСИБІРСЬКОЇ ГЕС МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

В статті наведені результати структурного аналізу колони статора турбіни Новосибірської ГЕС. Моделювання проводилося методом кінцевих елементів. В якості початкових умов використовувалися геометрія колони, механічні властивості матеріалів, статичні і динамічні навантаження і впливи. Так само були використані магнітні методи неруйнівного контролю, ультразвукового контролю та випробувань на твердість. У результаті комплексного неруйнівного контролю були знайдені тріщини в колоні. Це дозволило оцінити фактичне запас міцності колони.

Ключові слова: структурний аналіз, метод кінцевих елементів, ГЕС, колона статора турбіни, деформації, неруйнівний контроль (НК), ультразвуковий контроль, випробування твердості.

S. Fotin, S. Matyushechkin, N. Photina

ANALYSIS OF THE ACTUAL STRESS-STRAIN STATE STATOR HYDRO NOVOSIBIRSK HPP METHOD OF MATHEMATICAL MODELING

The report presents the results of Novosibirsk HPP stator turbine column structural analysis. Simulation was carried out by finite elements method. The initial condition used geometry column, the mechanical properties of materials, static and dynamic loads and impact. These magnetic methods of nondestructive testing, ultrasonic testing and hardness testing were also. Through integrated NDT crack in the column was found. It is possible to estimate the actual safety factor of the column.

Key words: structural analysis, finite elements method, hydro power plant (HPP), stator turbine column, stress&strain analysis, nondestructive testing (NDT), ultrasonic testing, hardness testing.