

УДК 624.07 : 534.1

**К. Н. РОВНИЙ**, аспирант Института проблем машиностроения им.  
А.Н. Подгорного НАН Украины; инженер-конструктор ОАО «Турбоатом»,  
Харьков

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУЩЕСТВУЮЩЕГО УЗЛА СТАТОР-СПИРАЛЬНАЯ КАМЕРА ТУРБИНЫ РО230/821 ДЛЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАСОС- ТУРБИНЫ ОРО230-В-221**

Предметом исследования в данной работе является анализ напряженно-деформированного состояния существующих закладных частей – статора и спиральной камеры гидротурбинного агрегата РО230/821-В-224 для условий работы насос-турбины ОРО230-В-221. Сделан вывод относительно возможности использования этого узла гидроагрегата для насос-турбины.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, система статор-спиральная камера, насос-турбина, обследование методами неразрушающего контроля.

**Введение.** При конкурсной разработке проекта оборудования насос-турбины ОРО230-В-221 была поставлена задача вписать насос-турбину в габарит закладных частей под турбинный агрегат РО230/821-В-224, что должно значительно сократить затраты на строительство и на поставку оборудования. При этом возможность применения разработанного для РО230/821-В-224 существующего узла спиральная камера-статор необходимо было подтвердить, не только гарантией выполнения заданных характеристик ОРО230-В-221, но и условиями безопасной эксплуатации этого узла в течение всего срока службы. Решение этой задачи требовало комплексного подхода [1]. В случае применения существующих закладных частей, смонтированных в конце 80-х годов, необходимо было не только провести их обследование методами неразрушающего контроля, но и подтвердить выполнение требований заказчика к уровню действующих напряжений для самых неблагоприятных режимов эксплуатации.

Узел статор-спиральная камера РО230/821-В-224 представляет совокупность связанных конструктивных элементов: радиальных (верхнее и нижнее кольцо статора, оболочка спиральной камеры в форме улитки, образованной набором сварных конусообразных звеньев – вальцованных участков) и вертикальных (зуб, колонны статора, меридиональные ребра жесткости).

Для вновь разрабатываемых гидромашин оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) узла спираль-статор традиционно проводится по методике ЦКТИ им. И.И. Ползунова [2]. Рассматривается симметричная статически неопределимая система, состоящая из трех взаимно связанных элементов: орбренной торообразной оболочки с круговым или овальным сечением, колонн и колец статора постоянного поперечного сечения. Особенность методики – сочетание аналитического метода при описании перемещений кольца и колонны и метода конечных разностей при определении усилий и перемещений в орбренной оболочке. Оболочка спирали описывается уравнениями для торообразной орбренной оболочки, находящейся под действием осесимметричных краевых нагрузок и внутреннего гидростатического давления.

**Цель исследования постановка задачи.** Ограниченность возможности применения точных аналитических решений для тел сложной конфигурации привела к интенсивному развитию численных и приближенных методов механики деформи-

---

© К.Н. Ровный, 2015

руемого тела, которые позволяют для широкого круга математических моделей построить достаточные по точности приближенные решения.

Широкое распространение получили дискретные методы: сеточные методы, метод конечных элементов (МКЭ), метод граничных интегральных уравнений и т.д. В основу МКЭ положено расчленение объекта расчета на элементы заданной конфигурации и наложение на них связей, приближенно обеспечивающих условия непрерывности деформаций и условия равновесия. При решении задачи МКЭ предварительно выдвигаются предположения о возможных перемещениях в узлах и о характере их распределения в пределах каждого конечного элемента. Решение задачи о напряженно деформированном состоянии системы статор-спиральная камера элементов позволяет определить потенциальную энергию, как квадратичную функцию узловых перемещений или напряжений. Процесс минимизации функции энергии по узловым перемещениям приводит к системе линейных алгебраических уравнений, решение которой и является решением поставленной задачи. Главными достоинствами этого метода, по оценке специалистов, является гибкость и универсальность, позволяющие в короткое время выполнять расчеты конструкций высокой сложности.

**Анализ основных достижений и литературы.** В работах [3–5] для расчета системы статор-несущая спиральная камера применяется трехмерная постановка с использованием МКЭ. Однако методика не учитывает меридиональные ребра спирали. Данный подход основан на утверждении, что геометрия конструкции обладает симметрией относительно горизонтальной плоскости. В данном случае применяемые в конструкции нижние меридиональные ребра отличные по длине от верхних, что не позволит рассматривать данную систему как симметричную. Также сложность этой методики состоит в том, что необходимо обеспечивать совместность конечно-элементных сеток разных элементов конструкции, что не всегда возможно.

Развитие вычислительной техники позволило разбивать регулярной конечно-элементной сеткой всю конструкцию в целом, при помощи твердотельного КЭ, что позволило избежать соблюдения совместности конечно-элементных сеток и тех проблем, которые связаны с ними. Проведенное исследование базируется на данном методе и позволяет уточнить особенности напряженно-деформированного состояния исследуемого узла, что является важным моментом в решении задачи, поставленной в техническом задании на разработку радиально-осевой насос-турбины.

**Материалы исследования.** Статор-спиральная камера гидротурбины РО230/821-В-224 является одноподводной металлической конструкцией. Стальная оболочка спиральной камеры состоит из 22 звеньев, сваренных между собой и с верхним и нижним кольцами статора. В околостаторных зонах спиральная камера усилена меридиональными ребрами жесткости. На каждое звено приходится два ребра. Оболочка спиральной камеры и меридиональные ребра жесткости изготовлены из листовой стали постоянной толщины 25 мм. На рис. 1 представлена трёхмерная модель системы статор-спиральная камера гидротурбины РО230/821-В-224.

При исследовании НДС выполнено построение модели системы статор-спиральная камера под действием максимального гидростатического напора  $H = 230$  м. Давление на все внутренние поверхности спиральной камеры и колонн статора принято равномерным. Краевыми условиями для данной задачи является жёсткое закрепление отверстий под крепеж на фланце входного патрубка спиральной камеры и нижнего кольца статора.

Конечно-элементная сетка (см. рис. 1) применяется на данной модели, является регулярной, то есть размер конечного элемента является постоянным на протяжении всей конструкции. Единичной составляющей конечно-элементной сетки является высокоточным двадцати узловым, твердотельным КЭ. Данный КЭ используется в задачах пластичности, ползучести, упругости, а также в задачах, где возможны большие перемещения и деформации. Криволинейные грани этого элемента позволяют наиболее точно описать конфигурацию всех сложных элементов конструкции.

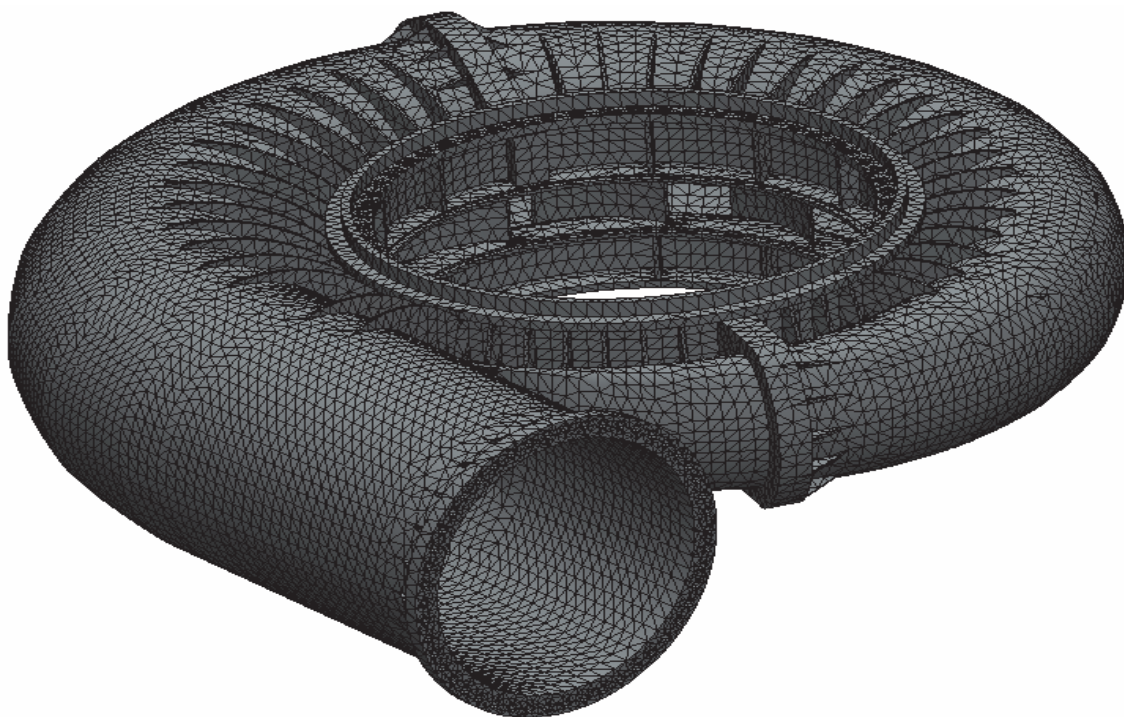


Рис. 1 – Трёхмерная модель и сетка системы статор-спиральная камера гидротурбины PO230/821-B-224

**Результаты исследования.** Было проведено ряд исследований системы статор-спиральная камера при действии на ее внутреннюю поверхность постоянного давления. Определены поля перемещений и напряжений, выявлены зоны локализации напряжений.

На рис. 2 показана эпюра интенсивность напряжений при максимальном гидростатическом напоре, с отдельно увеличенной зоной максимальных напряжений в системе статор-спиральная камера. Конструкция имеет сложное напряженно-деформированное состояние, максимальные напряжения соответствуют зонам наибольших градиентов перемещений и возникают в местах соединения статорного кольца и колонны статора, а также выявлены локализации напряжений в области соединения меридиональных ребер жесткости и оболочки спиральной камеры. Характер распределения напряжений спиральной камеры соответствует результатам расчетов по известным методикам [3–5]. Однако использование данного метода позволяет увидеть всю картину полей напряжений в конструкции с учетом геометрических особенностей элементов и их взаимодействия.

Для более качественного выявления локализаций напряжений был проведен анализ на более густой сетке. Результаты исследований показаны в табл. 1.

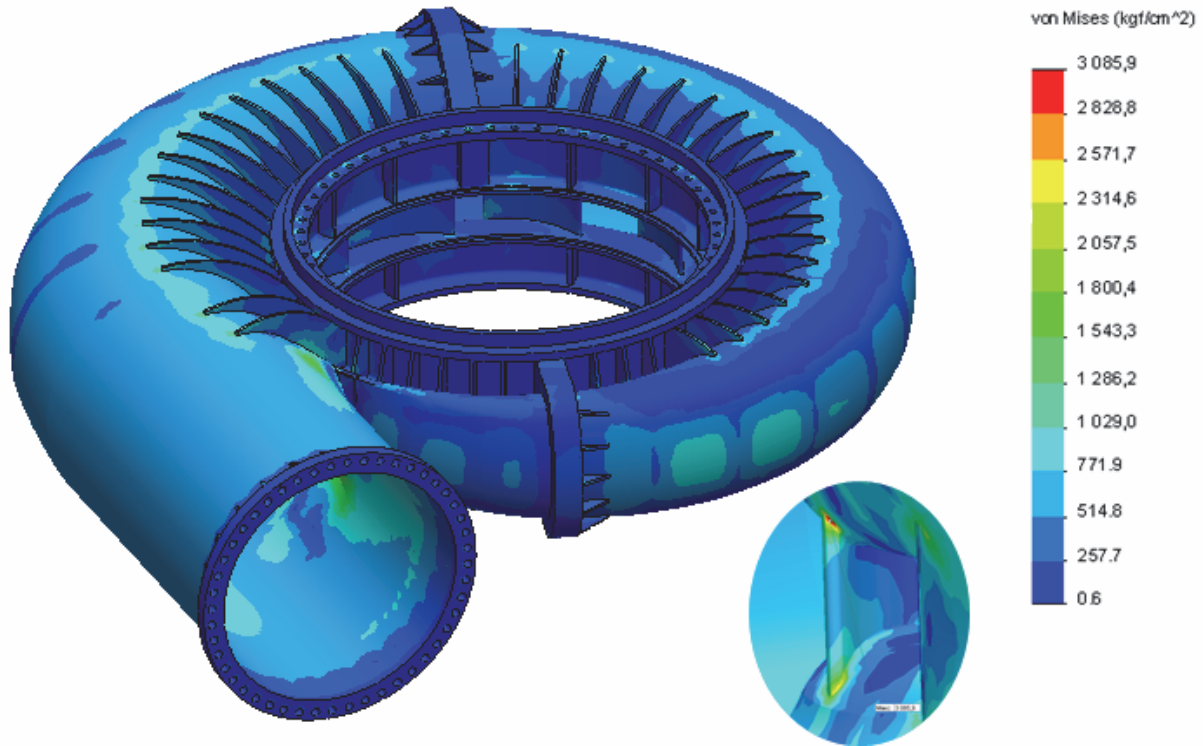


Рис. 2 – Интенсивность напряжений при максимальном напоре  $H = 230$  м

Таблица 1.  
Сравнение полученных результатов с результатами на разных сетках при напоре  $H = 230$  м

Метод расчета	Вид напряжения	Интенсивность напряжений в элементах конструкции, кгс/см <sup>2</sup>				
		Зона сопряжения статорного кольца и оболочки	Зона сопряжения оболочки и ребра спирали	Ребро оболочки спирали	Колона статора	Кольцо статора
3-х мерная постановка (размер КЭ 100 мм)	Внутренняя поверхность	1460	850	2260	3085	1430
	Наружная поверхность	390	1200	1400	1200	150
3-х мерная постановка (размер КЭ 50 мм)	Внутренняя поверхность	1580	910	2410	3155	1480
	Наружная поверхность	425	1390	1550	1350	165

**Выводы.** Полученные результаты позволили выявить особенности напряженно-деформированного состояния системы статор-спиральная камера, уточнить распределение напряжений и зоны локализации максимальных напряжений, что было учтено в процессе натурного обследования узла статор-спиральная камера при его визуальном и неразрушающем контроле на ГЭС.

Исследование показало локализацию напряжений в местах соединения колон статора и статорного кольца, а также в местах сопряжения ребра с оболочкой спирали. Результаты исследований, приведённые в табл. 1 показывают, что более густая сетка позволяет более точно выявлять места локализации напряжений.

Проведений комплекс исследований позволил для гидроагрегатов № 3 и № 4 Зеленчукской ГЭС-ГАЭС применить смонтированный узел статор-спиральная камера для условий эксплуатации обратимой насос-турбины. При этом экономический эффект, ориентировочно, составит \$20 млн.:

- поставка оборудования \$2 млн.;
- монтажно-строительные работы \$18 млн.

**Список литературы:** 1. *Зотов, В. М.* Реконструкция и техническое перевооружение действующих гидроэлектростанций – основное направление в сохранении работоспособности ГЭС России на ближайшую перспективу [Текст] / В. М. Зотов, В. И. Платов // Гидротехн. строительство. – 1997. – № 12. – С. 31–33. 2. *Ковалев, Н. Н.* Проектирование гидротурбин [Текст] / Н. Н. Ковалев. – Ленинград : Машиностроение, 1974. – 278 с. 3. *Веремеенко, И. С.* Метод расчета НДС узла статор-спиральная камера гидротурбин [Текст] / И. С. Веремеенко, Ю. С. Воробьев, В. Н. Романенко, С. П. Канило, И. И. Иосевич // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования [Текст] : сб. науч. трудов. – Харьков : ИПМаш НАН Украины, 2007. – С. 498–501. 4. *Воробьев, Ю. С.* Анализ прочности элементов системы статор корпус турбомашин [Текст] / Ю. С. Воробьев, В. Н. Романенко, Л. Г. Романенко // Вібрації в техніці та технологіях : зб. наук. праць. – 2004. – № 6. – С. 45–48. 5. *Воробьев, Ю. С.* Анализ локализации напряжений в системе статор-спиральная камера [Текст] / Ю. С. Воробьев, В. Н. Романенко, Л. Г. Романенко // Проблемы прочности. – 2007. – № 1. – С. 132–137. 6. *Алямовский, А. А.* SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Текст] / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Пономарев. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – 780 с.

**Bibliography:** 1. *Zotov, V. M., and V. I. Platov.* "Rekonstrukcija i tehniceskoe perevooruzhenie dejstvujushih gidroelektrostancij - osnovnoe napravlenie v sohraneni rabotosposobnosti GJeS Rossii na blizhajshuju perspektivu [Reconstruction and modernization of existing hydroelectric power plants - the main direction in preserving the health HPP Russia in the near future]." *Gidrotehn. stroitel'stvo* 12 (1997): 31–33. Print. 2. *Kovalev, N. N.* *Proektirovanie gidroturbin [Design of hydraulic turbines]*. St. Petersburg : Mashinostroenie [Engineering], 1974. 3. *Veremeenko, I. S., et al.* "Metod rascheta NDS uzla stator-spiral'naja kamera gidroturbin [Method of calculating the VAT unit stay ring and spiral case for hydroturbines]." *Sovershenstvovanie turboustanovok metodami matematicheskogo i fizicheskogo modelirovanija [Improving turbines methods of mathematical and physical modeling]*. 2007 498–501. Print. 4. *Vorob'ev, Ju. S., V. N. Romanenko and L. G. Romanenko.* "Analiz prochnosti jelementov sistemy stator korpus turbomashin [Analysis of the strength of the stator housing elements of turbomachinery]." *Analiz prochnosti jelementov sistemy stator korpus turbomashin [Vibration in engineering and technology]* 6 (2004): 45–48. Print. 5. *Vorob'ev, Ju. S., V. N. Romanenko, L. G. Romanenko.* "Analiz prochnosti jelementov sistemy stator korpus turbomashin [Analysis of the localization of stresses in stay ring and spiral case]." *Problemy prochnosti [Problems of Strength]* 1 (2007): 132–137. Print. 6. *Aljamovskij, A. A., et al.* *SolidWorks. Komp'juternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike [SolidWorks. Computer modeling in engineering practice]*. St. Petersburg : BHV-Petersburg, 2005. Print.

*Поступила (received) 02.02.2015*