

УДК 539.3

К. Н РОВНЫЙ, А. В. ДУШИН**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБЛИЦОВКИ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ СПИРАЛЬНОЙ КАМЕРЫ ГИДРОТУРБИНЫ РО310-В-600 ПРИ ГИДРОИСПЫТАНИИ**

Создана математическая модель для исследования НДС узла «статор-спиральная камера» РО310-В-600 согласно разработанной схеме гидроиспытания. Результаты выполненного численного исследования МКЭ позволили выявить особенности НДС узла «статор-спиральная камера» гидротурбины РО310-В-600 при гидроиспытании. Выявлены зоны локализации напряжений. Определено влияние на уровень напряжений конструктивных особенностей.

Ключевые слова: турбина, сталежелезобетонная спиральная камера, статор, гидроиспытание, метод конечных элементов, математическая модель.

Введение. В радиально-осевых гидротурбинах равномерное поступление воды по всему периметру направляющего аппарата и далее к рабочему колесу осуществляется через спиральную камеру. Конструктивно спиральная камера представляет собой набор сварных конусообразных звеньев, изготавливаемых из листового проката методом вальцовки. Совокупность данных звеньев, сваренных между собой и с верхним и нижним кольцом статора, образует конструкцию, которая имеет форму улитки. Основное назначение спиральной камеры заключается в том, чтобы при сравнительно небольших габаритах и незначительных потерях напора осуществить равномерный подвод воды по всей окружности направляющего аппарата.

Действующие нормативные документы включают в себя отдельные положения, связанные с вопросами расчета и конструирования спиральных камер круглого сечения больших диаметров при высоких напорах [1]. Такие спиральные камеры делятся на три типа:

1. Стальная, покрытая сверху мягкой прокладкой, отделяющей оболочку спирали от железобетона турбинного блока.

2. Сталежелезобетонная без деформируемой прокладки между несущей конструкцией и массивом железобетона турбинного блока, в которой стальная оболочка и арматурный каркас совместно воспринимают усилия.

3. Сталежелезобетонная с деформируемой прокладкой в верхней части между несущей сталежелезобетонной конструкцией и массивом железобетона турбинного блока.

Применяемый тип конструкции во многом определяется величиной параметра HD (произведением высоты водяного столба на диаметр входного сечения спиральной камеры). Спиральные камеры, с параметром HD, большим 1200, рекомендуется проектировать только в сталежелезобетонном варианте.

Конструктивные элементы спиральной камеры при эксплуатации должны выдерживать максимальное внутреннее давление воды на всех режимах работы гидротурбины с учетом динамического повышения давления, возникающего во время закрытия

направляющего аппарата.

В данном исследовании рассматривается узел «статор-спиральная камера» высоконапорной гидротурбины РО310-В-600. Исходя из параметра HD, который для данной гидротурбины при сбросе нагрузки (расчетный режим для спиральной камеры) составил 2240, спиральная камера изготовлена сталежелезобетонной. При проектировании узла был выполнен значительный объем научно-исследовательских работ [2]. Разработанная конструкция представляет собой металлический остов в виде сварнолитого статора и приваренной к нему оребренной облицовки спиральной камеры. Стальная оболочка спиральной камеры состоит из 32-х звеньев, сваренных между собой и с верхним и нижним кольцом статора. В зонах примыкания к статору спиральная камера усилена меридиональными ребрами жесткости. На каждое звено приходится четыре ребра. Облицовка спиральной камеры и меридиональные ребра жесткости изготовлены из листового проката повышенной прочности марки 09Г2С постоянной толщины 36 мм. Механические характеристики стали 09Г2С приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Свойства материала по ГОСТ 19282-73 – «Сталь низколегирующая толстолистовая и широкополосная универсальная»

σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	КСУ, Дж/м ²
+20 С			-40 С
451	285	21	350

Статор – сварнолитой из шести частей. Колонны, включая зуб и кольца статора, отлиты из стали 20ГСЛ, гарантированные мехсвойства которой приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Механические свойства стали 20ГСЛ

ТУ 108 – 978-80 – «Отливки для деталей гидротурбин»					
σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	КСУ, кДж/м ²	Твёрдость, НВ
500	280	16	30	400	124-163

Согласно [3], спиральная камера должна быть

© К. Н Ровный, А. В. Душин, 2015

гідроиспытана до заливки узла в бетон для проверки цілостності сварних швів.

Это ставит задачу о проверке надежности конструкции без использования основного несущего элемента – арматурного каркаса, который в рабочих режимах, как показали исследования, воспринимает основную часть нагрузки [3]. Давление гидроиспытания для исследуемой конструкции принято равным $H = 140$ м, что составляет 1/3 повышения давления при сбросе нагрузки. Схема гидроиспытания предусматривает, что на входной патрубке спиральной камеры приваривается цилиндрическая заглушка, в которой имеется дренажное отверстие для подвода воды. В качестве заглушки на выходе из статора предполагается использовать щит кольцевого затвора. Задача обеспечения прочности необетонированной конструкции при гидроиспытании связана с оценкой ее напряженно-деформированного состояния (НДС).

Постановка задачи. Ограниченность возможности применения точных аналитических решений для тел сложной конфигурации привела к интенсивному развитию численных и приближенных методов механики деформируемого тела, которые позволяют для широкого круга математических моделей построить достаточные по точности приближенные решения.

На момент проектирования, в 1986 году, для оценки НДС узла «статор-спиральная камера» использовалась методика ЦКТИ им. И. И. Ползунова [4], основанная на сочетании аналитических и численных методов, которая реализована в виде программы для ЭВМ. Рассматривалась симметричная статически неопределимая система, состоящая из трех взаимно связанных элементов: оребренной 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 оребренной оболочке. Облицовка спирали описывается уравнениями для торообразной оребренной оболочки, находящейся под действием осесимметричных краевых нагрузок и внутреннего гидростатического давления. Однако расчетная схема не учитывает конструктивные особенности узла: возможное различие профилей статорных колец, локальность расположения меридиональных ребер, конструктивные особенности зубовой части и входного патрубка. Для анализа НДС узла необходимо провести серию расчетов для каждого из звеньев, а их, как правило, не менее двадцати.

Развитие вычислительной техники позволило уточнить математическую модель конструкции. В работах [5–7] для расчета узла «статор-спиральная камера» применяется трехмерная постановка с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

Применяемые трехмерные конечные элементы (КЭ) позволяют учесть локализацию НДС в местах сопряжения статора со спиральной камерой. Особенность этих методик состоит в том, что математическая модель конструкции не учитывает наличие меридиональных ребер жесткости спирали, влияющих на ее НДС, и симметрична относительно горизонтальной плоскости. Однако, в реальной конструкции нижнее и верхнее кольца статора обычно отличны по конструкции. Кроме того, для такой сложной конфигурации как узел «статор-спиральная камера», упомянутые методы могут оказаться неэффективными для расчета НДС из-за существенных упрощений, которые связаны с разбивкой геометрической модели на КЭ.

Повышение вычислительной мощности современных персональных компьютеров, а также развитие КЭ программных комплексов позволило уточнить математическую модель конструкции, разбивать ее регулярной конечно-элементной сеткой при помощи твердотельного КЭ, что дало возможность избежать соблюдения совместности конечно-элементных сеток и тех проблем, которые связаны с ними. Именно с учетом этих возможностей проведено исследование НДС математической модели узла «статор-спиральная камера» РО310-В-600, построенной согласно разработанной схеме гидроиспытания (рис. 1).

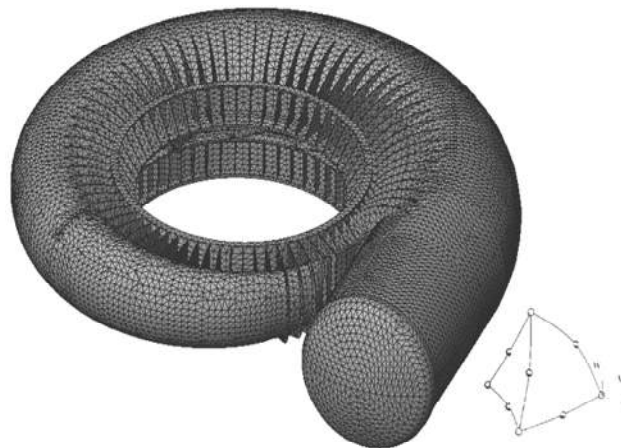


Рис. 1 – Математическая модель и узла «статор-спиральная камера» гидротурбины РО310-В-600

Конечно-элементная сетка, применяемая на данной модели, является регулярной, то есть размер КЭ является постоянным на протяжении всей конструкции. Единичной составляющей конечно-элементной сетки является твердотельный КЭ [8]. Криволинейные грани этого элемента позволяют наиболее точно описать конфигурацию всех сложных элементов конструкции. На рис. 2 приведено распределение интенсивности напряжений в узле «статор-спиральная камера».

Напряжения в наиболее напряженной зоне конструкции – в зоне входного сечения – приведены в табл. 3, 4.

Рис. 2 – Распределение интенсивности напряжений в узле «статор-спиральная камера» при гидроиспытании, кгс/см²

Таблица 3 – Напряжения в облицовке спиральной камеры при гидроиспытании в зоне входного сечения, МПа

Поверхность	Зона сопряжения статорного кольца и облицовки	Зона сопряжения облицовки и ребра спирали	Ребро оболочки спирали
Внутренняя	85	210	130
Наружная	80	150	247

Таблица 4 – Напряжения в статоре при гидроиспытании в зоне входного сечения

Колонна статора		Кольцо статора	
Средина	Место сопряжения с кольцом статора	Нижнее	Верхнее
110	236	130	150

Выводы. Создана математическая модель для исследования НДС узла «статор-спиральная камера» РО310-В-600 согласно разработанной схеме гидроиспытания.

Результаты выполненного численного исследования МКЭ позволили выявить особенности НДС узла «статор-спиральная камера» гидротурбины РО310-В-600 при гидроиспытании.

Выявлены зоны локализации напряжений. Определено влияние на уровень напряжений конструктивных особенностей.

Полученный уровень напряжений показывает, что в необетонированной конструкции при гидроиспытании не возникают остаточные деформации.

Распределение напряжений в районе сварных швов облицовки сталежелезобетонной спиральной камеры гидротурбины РО310-В-600 не превышает $0,3\sigma_{0,2}$, что подтверждает результаты, полученные ранее по методике ЦКТИ, а локальные напряжения в

зубовой части, обусловленные геометрическими концентраторами, не превышают $0,85\sigma_{0,2}$.

Полученное распределение напряжений в обетонированной облицовке спирали при сбросе нагрузки [2] согласуется с распределением напряжений в облицовке спирали при гидроиспытании давлением $140 \text{ м} - 1/3$ повышения давления при сбросе нагрузки.

Таким образом, полученное распределение напряжений при гидроиспытании позволяет оценить действующие напряжения в облицовке сталелезобетонной спиральной камеры при работе агрегата.

Список литературы: 1. Лисичкин С. Е. Совершенствование схем армирования массивных турбинных блоков со спиральными камерами различной конструкции / С. Е. Лисичкин // Гидротехническое строительство. – 2003. – № 2. – С. 7–11. 2. Храпов А. А. Отчет о научно-исследовательской работе : Разработать методику расчета и выполнить расчетные исследования напряженно-деформированного состояния турбинных блоков радиально-осевых и обратимых гидромашин высоконапорных ГЭС и ГАЭС, договор №547-5054 // А. А. Храпов, А. В. Караваяев, М. А. Зубрицкая. – Л. : ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1987. – С. 49. 3. Нормы технологического проектирования гидроэлектрических и гидроаккумулирующих электростанций : ВНТП41-85 : Гидропроект им. С. Я. Жука. – М. : МинЭнерго СССР, 1986. – 120 с. 4. Ковалев Н. Н. Проектирование гидротурбин / Н. Н. Ковалев. – Л. : Машиностроение, 1974. – 278 с. 5. Веремеенко И. С. Метод расчета НДС узла «статор-спиральная камера» гидротурбин / И. С. Веремеенко, Ю. С. Воробьев, В. Н. Романенко [и др.] // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования : сб. науч. трудов. – Х. : ИПМаш НАН Украины. – С. 498–501. 6. Воробьев Ю. С. Анализ прочности

элементов системы «статор-корпус» турбомашин / Ю. С. Воробьев, В. Н. Романенко, Л. Г. Романенко // Вібрації в техніці та технологія: зб. наук. праць. – 2004. – № 6. – С. 45–48. 7. Воробьев Ю. С. Анализ локализации напряжений в системе «статор-спиральная камера» / Ю. С. Воробьев, В. Н. Романенко, Л. Г. Романенко // Проблемы прочности. – 2007. – № 1. – С. 132–137. 8. Алямовский А. А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одищев [и др.]. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005.

Bibliography (transliterated): 1. Lisichkin, S. E. "Sovershenstvovanie shem armirovaniya massivnykh turbinnykh blokov so spiral'nymi kamerami razlichnoy konstrukcii." *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo*. No. 2. 2003. 7–11. Print. 2. Hrapkov, A. A., A. V. Karavaev and M. A. Zubrickaja. *Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote. Razrabotat' metodiku rascheta i vypolnit' raschetnye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostojaniya turbinnykh blokov radial'no-osevykh i obratimyykh gidromashin vysokonapornyyh GJeS i GAJeS, dogovor №547-5054*. Leningrad : VNIIG im. B. E. Vedeneeva, 1987. Print. 3. *Normy tehnologicheskogo proektirovaniya gidroelektricheskikh i gidroakkumulirujushhih jelektrostantsij VNT41-85*. Moscow : MinJenergo SSSR, 1986. Print. 4. Kovalev, N. N. *Proektirovanie gidroturbin*. Leningrad : Mashinostroenie, 1974. Print. 5. Veremeenko, I. S., et al. "Metod rascheta NDS uzla «stator-spiral'naja kamera» gidroturbin." *Sovershenstvovanie turboustanovok metodami matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya : sb. nauch. trudov*. Kharkov : IPMash NAN Ukrainy. Print. 6. Vorob'ev, Ju. S., V. N. Romanenko and L. G. Romanenko. "Analiz prochnosti jelementov sistemy «stator-korpus» turbomashin." *Vibracii v tehnici ta tehnologijah : zb. nauk. prac'*. No. 6. 2004. Print. 7. Vorob'ev, Ju. S., V. N. Romanenko and L. G. Romanenko. "Analiz lokalizacii napryazhenij v sisteme «stator-spiral'naja kamera»." *Problemy prochnosti*. No. 1. 2007. Print. 8. Aljamovskij, A. A., et al. *SolidWorks. Komp'juternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike*. Saint Petersburg : BHV-Peterburg, 2005. Print.

Поступила (received) 25.09.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Душин Алексей Викторович – ведущий инженер-конструктор отдела прочностных расчетов СКБ ТГМ ПАО «Турбоатом»; г. Харьков.

Oleksii V. Dushyn – Lead Design Engineer at Strength Analysis Design Office, Pjsc Turboatom, Kharkov.

Ровный Константин Николаевич – инженер-конструктор отдела прочностных расчетов СКБ ТГМ ПАО «Турбоатом», г. Харьков.

Kostiiantyn M. Rovny – Design Engineer at Strength Analysis Design Office, Pjsc Turboatom, Kharkov.