

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЦАНГОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ГОЛОВКИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

А.М. Головлева

golovlevaam@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

В связи с развитием программных кодов уже не представляется сложным полностью рассчитать тепловыделяющие сборки (ТВС) до последнего винтика. Это не только полезно для анализа прочности уже существующих реакторов, в частности ТВС, но и позволяет прогнозировать дальнейшее их развитие. Можно определить, в каких местах нужно что-то усилить, а в каких, наоборот, устранить излишний консерватизм. При этом следует понимать, что современные программные коды имеют два направления развития: эмпирические (отраслевые) программные коды, в основе которых лежат известные экспериментально полученные методы, либо общедоступные программные коды, например Ansys. В данной статье сделана попытка понять, насколько программный код Ansys применим для анализа прочности одной из деталей ТВС, в частности, для анализа прочности цанги в головке ТВС реактора ВВЭР-1000.

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка, прочность, растягивающие напряжения, ВВЭР-1000, Ansys Mechanical APDL, реактор, направляющие каналы, программный код, цифровой двойник

Введение. Создание цифровых двойников различных изделий и глобальных конструкций является перспективной задачей настоящего времени [1]. В настоящей работе на примере расчетов небольшого цангового узла в головке тепловыделяющей сборки (ТВС) показано, как с использованием распространенного программного кода можно сделать выводы о конструкции топливной сборки, верифицировать программный код для решения поставленных задач, а в перспективе спрогнозировать улучшение конструкции.

Описание конструкции. Расчет на прочность — неотъемлемый этап при конструировании любых ядерных установок для обоснования и обеспечения работоспособности, надежности конструкций. Поверочный расчет проводят на основе составления картины напряжений и деформаций и сравнения особо опасных сечений с соответствующими нормами прочности по допускаемым напряжениям и деформациям [2].

В активной зоне реактора ВВЭР-1000 содержится 163 ТВС, каждая бесчехловая ТВС состоит из съемной головки, пучка твэлов и твэгов, дистанционирующих решеток, хвостовика, направляющих трубок для пэлов [3].

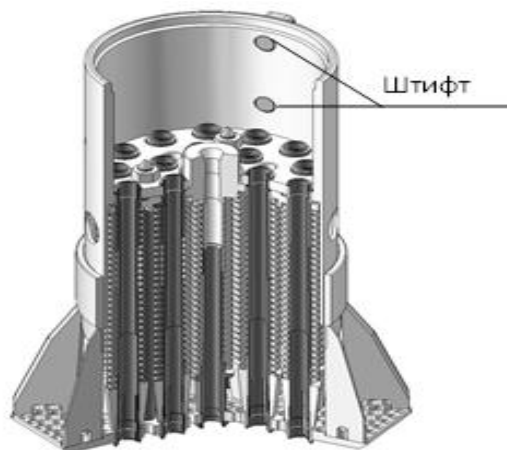


Рис. 1. Головка ТВС

В свою очередь, головка ТВС (рис. 1) состоит из верхней (цилиндрической) обечайки, опорной плиты, пружинного блока, нижней (конической) обечайки, цанг и элементов, связывающих сборочные единицы головки в единую конструкцию. В целях контроля герметичности, извлечения, ремонта и замены отдельных твэлов или всей ТВС головку ТВС делают съемной. Крепление к направляющим каналам осуществляется с помощью цанг. Цанга представляет собой цилиндрическую оболочку, на конце которой имеются лепестки с шириной разреза между ними 2 мм. Зная максимальную силу извлечения ТВС из реактора, т. е. силу подрыва перегрузочной машины при заклинивании хвостовика ТВС в стояке шахты реактора, можно провести прочностной расчет и определить напряжения [4], которые испытывает такая сборочная единица головки ТВС, как цанга, и на основе анализа полученных данных усовершенствовать конструкцию. Все расчеты будут проведены в программной среде Ansys, имеющей обширную область задач, решаемых методом конечных элементов [5].

Верификация. Для определения физичности результатов расчета была проведена верификация [6]. Были использованы уже известные и опробованные методы анализа прочности: получена расчетная картина напряжения в бруске, нагруженном растягивающими напряжениями. При аналитическом подсчете используется брусок высотой 0,2 м с площадью поперечного сечения 0,01 м², закрепленный одним концом к жесткой заделке, свободный торец которого растягивает нормальная сила 100 Н. Поскольку сила приложена ко всей плоскости, нормальное напряжение в сечении бруска на высоте 0,1 м можно найти как $\sigma = N/A = (100 \text{ Н})/(0,01 \text{ м}^2) = 10 \text{ кПа}$. В результате получено

распределение напряжения в поперечном сечении данного бруска аналитическим методом. Далее осуществлялось моделирование этого же бруска в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL v 17.2 (рис. 2). На рисунке видно, что полученное распределение напряжения в поперечном сечении совпадает с полученным аналитически. Следовательно, для задач растяжения в упругой области использование программного комплекса при данном разбиении приемлемо. В данном случае цапга работала как раз в упругой области под действием растягивающих нагрузок.

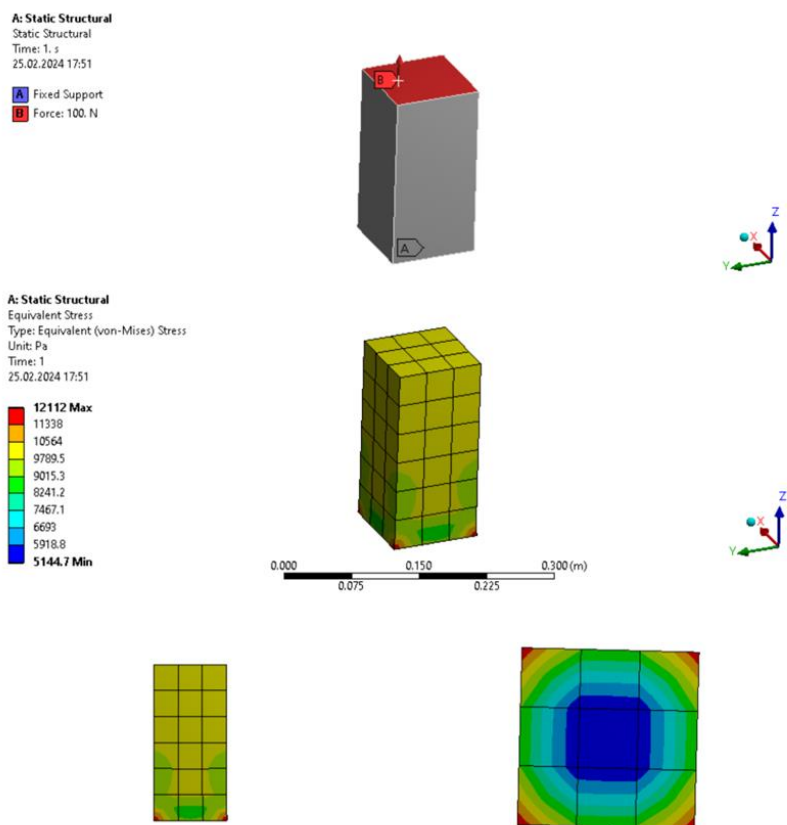


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений на бруске

Таким образом, гарантированно верное аналитическое решение совпадает с полученным по применяемой методике. При дальнейшем расчете в программном комплексе Ansys Workbench цапг ТВС этот метод также будет приводить к правильному распределению напряжений, такому же, какое

получилось бы при ручном аналитическом расчете. Теперь, доказав корректность расчета напряжений в программном коде, рассмотрим несколько вариантов цанг.

Моделирование и анализ цанг с различным числом лепестков. Сначала проанализируем прочность четырехлепестковой цанги, содержащейся в головке ТВС ВВЭР-1000, с использованием программного комплекса Ansys [7]. Данная цанга предназначена для крепления к направляющему каналу и позволяет организовать съём головки в ТВС. При ее разжатии можно снять головку со сборки единым образом, не расцепляя отдельной шайбы, как это принято, например, в ТВС уголкового конструктива. При этом следует оценить, какая прочность и нагрузки возникают в самом лепестке цанги головки ТВС при установке и извлечении из нее направляющего канала. Материал цанги — сталь 08X18H10T.

Для этого моделируем четырехлепестковую цангу, к лепестку которой прикладывается нагрузка, требуемая для снятия ее с головки ТВС. Максимальная сила извлечения ТВС из реактора равна силе подрыва перегрузочной машины при заклинивании хвостовика ТВС в стояке шахты реактора и составляет 39,2 кН, число направляющих каналов ТВС $n_{н.к} = 18$, следовательно, на каждую цангу действует 2,17 кН, а на каждый лепесток четырехлепестковой цанги — по 544 Н.

Задача определения напряженно-деформируемого состояния одномерна, т. е. нормальное давление и продольно растягивающие силы действуют вдоль оси направляющего канала. С использованием точной расчетной 3D-модели были найдены максимальные напряжения $\sigma_{\max} = 310$ МПа, которые возникли в месте пропила цанги на боковой границе лепестка вследствие краевого эффекта. Результаты были получены в приложении Stress Intensity, где интенсивность напряжений определяется разницей между максимальными и минимальными главными напряжениями. Среднее значение напряжений в сечении равно 40 МПа.

Теперь определим зависимость приведенных (средних) напряжений на лепестке от числа лепестков цанги. Трехлепестковая, пятилепестковая и шестилепестковая цанги моделируются аналогично приведенному выше описанию (рис. 3).

Расчет помогает в дальнейшем оценить максимальное необходимое для работы конструкции число лепестков. С ростом числа лепестков у цанги возрастает число распилов режущим инструментом с зазором в 2 мм, вследствие чего уменьшается объем металла, воспринимающего нагрузку. По полученной картине напряжения (рис. 4) и согласно теории сопротивления материалов делаем вывод, что с ростом числа лепестков цанги, напряжения, прихо-

дящиеся на каждый отдельный лепесток, увеличиваются согласно зависимости, близкой к линейной. В локальных точках максимальные напряжения превышают допускаемые напряжения растяжения, однако средние сечения на каждой цанге остаются ниже допускаемого напряжения для аустенитной стали 08X18H10T: $[\sigma]_p = \sigma_t / 1,5 \approx 144$ МПа.

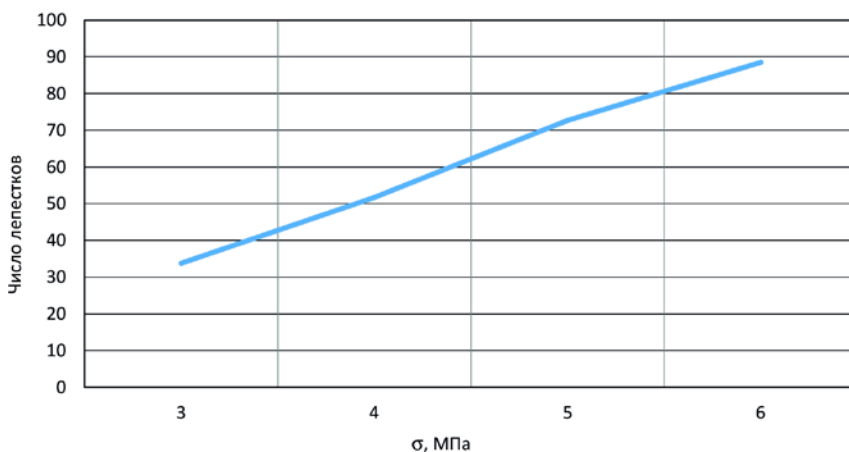


Рис. 3. График зависимости приведенных напряжений σ от числа лепестков в цанге

Таким образом, чем меньше лепестков, тем меньше напряжения. Однако в трех- и четырехлепестковых цангах нагрузка перераспределяется, и помимо лепестков напряженное состояние испытывает часть цанги ниже уровня распила, в то время как в пяти- и шестилепестковой цангах нагрузка сконцентрирована только в лепестках. С производственной стороны проще изготовить деталь с меньшим числом лепестков, поскольку требуется меньше операций распила режущим инструментом. От числа лепестков также будет зависеть устойчивость цанги и количество операций по снятию и одеванию головки ТВС без ее повреждения.

Извлечение и установка головки ТВС представляют собой непостоянные нагрузки, т. е. кратковременность действия имеет значение, поэтому нужно сравнить цанги на усталостную прочность и число циклов, которое выдерживает образец до разрушения в зависимости от средних приведенных напряжений. По кривой усталости (кривая Веллера) [8] предел выносливости (усталости) стали 08X18H10T равен 310 МПа, максимальное напряжение цикла 600 МПа, количество циклов по приведенным напряжениям представлено в таблице.

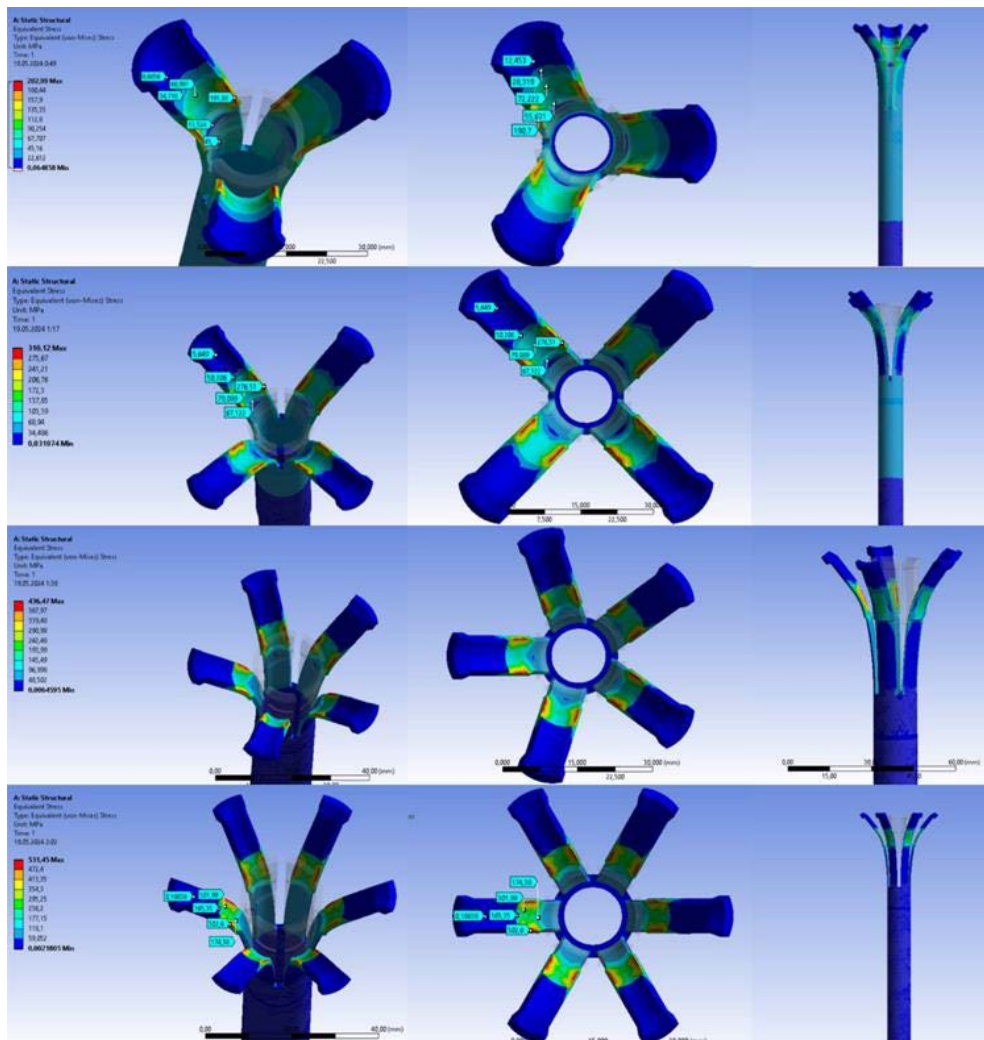


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений для трех-, четырех-, пяти- и шестилепестковых цанг

Количество лепестков цанги и циклов нагружения по приведенным напряжениям

Число лепестков цанги	σ , МПа	Число циклов нагружения N
3	33,8	10^7
4	51,7	10^7
5	72,7	10^5
6	88,5	5

Заключение. Анализ результатов показал, что увеличение числа лепестков цанги способствует росту приведенных напряжений в наиболее опасных сечениях лепестка за счет уменьшения количества металла в сечении. Однако это также позволяет сделать цангу более гибкой. В широком смысле подобные расчеты служат для предварительного моделирования таких более глобальных и сложных задач, как полный расчет головки ТВС с учетом радиационных явлений, а в перспективе — создания полномасштабной цифровой модели ТВС и активной зоны целиком, что позволит предсказывать поведение действующих реакторов и упростит проектирование новых. С помощью цифровых двойников отдельных частей реактора помимо активной зоны можно моделировать сам реактор в целом, что позволит осуществить более качественное сравнение различных перспективных ядерных реакторов и установок, например, таких как БРЕСТ-ОД-300 [9] и РИТМ-200 [10].

Литература

- [1] Меринова В.Э. Анализ прочности корпуса водо-водяного реактора большой мощности. *Студенческая научная весна. Всерос. студенческой конф., посв. 190-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана: сб. тез. докл.* Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020, 58 с.
- [2] Банникова В.А. Влияние на прочность опорной решетки ТВС ВВЭР-1000 формы проливных отверстий. *Студенческая научная весна. Всерос. студенческой конф., посв. 190-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана: сб. тез. докл.* Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, с. 754–755.
- [3] Шмелев В.Д., Драгунов Ю.Г., Денисов В.П. и др. *Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций.* Москва, Академкнига, 2004.
- [4] Щетинин А.А. Влияние метода моделирования соединения ячеек дистанционирующей решетки на прочность конструкции. *Студенческая научная весна. Всерос. студенческой конф., посв. 190-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана: сб. тез. докл.* Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, с. 757–758.
- [5] Верхотуркин Е.Ю., Пашенко В.Н., Пясецкий В.Б. *Интерфейс и генерирование сетки в Ansys Workbench.* Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.
- [6] Азарова Е.Н., Ковалева В.А., Сатин А.А. Влияние конструкционных факторов на жесткость тепловыделяющих сборок водо-водяных энергетических реакторов. *Богатство России. Всерос. форум научной молодежи: сб. докл.* 2018, с. 295–296.
- [7] Крупкин А.В., Кузнецов В.И., Новиков В.В., Петров О.М. Конечно-элементный анализ прочности сварных соединений твэлов ВВЭР. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы,* 2019, № 1 (97), с. 79–96.

- [8] Рыбальченко О.В. *Влияние интенсивной пластической деформации на структуру, механические и служебные свойства стали 08X18H10T*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2014.
- [9] Жарков С.В. Анализ прочности железобетонного корпуса БРЕСТ-ОД-300. *Студенческая научная весна. Всерос. студенческой конф., посв. 190-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана: сб. тез. докл.* Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, 755 с.
- [10] Ладнюк О.Д. Анализ прочности корпуса реактора РИТМ-200. *Студенческая научная весна. Всерос. студенческой конф., посв. 190-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана: сб. тез. докл.* Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, 757 с.

Поступила в редакцию 25.04.2024

Головлева Алена Михайловна — студентка кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Сатин Александр Анатольевич, доцент кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Головлева А.М. Исследование работоспособности цангового соединения головки ТВС реактора ВВЭР-1000. *Политехнический молодежный журнал*, 2024, № 03 (92). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/pmc/nuc/974.html>

COLLET JOINT PERFORMANCE STUDY IN THE WWER-1000 REACTOR FUEL ASSEMBLY HEAD

A.M. Golovleva

golovlevaam@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Development of the software codes makes it rather simple to compute fully a fuel assembly (FA) down to its last screw. This is not useful only in analyzing the existing reactors strength, in particular the FA, but also makes it possible to predict their further development. Software codes allow identifying, where something needs to be strengthened, and on the contrary, where excessive conservatism should be eliminated. It should be understood that modern software codes have two development approaches: empirical (industry) software codes based on the known experimentally obtained methods and the publicly available software codes, for example, the Ansys. This paper attempts to understand, to what extent the Ansys software code is applicable in analyzing strength of one of the FA parts, in particular, strength of the collet joint in the WWER-1000 reactor FA head.

Keywords: fuel assembly, strength, tensile stresses, WWER-1000, Ansys Mechanical APDL, reactor, guide channels, software code, digital twin

Received 25.04.2024

Golovleva A.M. — Student, Department of Nuclear Reactors and Installations, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Satin A.A., Associate Professor, Department of Nuclear Reactors and Installations, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Golovleva A.M. Collet joint performance study in the WWER-1000 reactor fuel assembly head. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2024, no. 03 (92). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/pmc/nuc/974.html>