

АНАЛИЗ ЖЕСТКОСТИ КАРКАСОВ НЕОБЛУЧЕННЫХ ТЕПЛОЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК ВОДО-ВОДЯНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

В.Э. Меринова

torisee@mail.ru

SPIN-код: 4335-7940

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

Аннотация

Тенденции к увеличению времени работы тепловыделяющей сборки (ТВС) водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР) привели к планомерному отказу от применения коррозионностойких сталей для изготовления каркасов жесткости в пользу циркониевых сплавов, что привело к их увеличенным прогибам. Это стало причиной застревания органов регулирования и аварийной защиты в них, а следовательно, снижения безопасности реакторных установок. Для решения этой проблемы были разработаны два принципиально отличных каркаса жесткости. Первый образован в результате приварки направляющих каналов к дистанционирующим решеткам, а второй — с помощью применения уголков. В работе проведено объективное сравнение прогиба этих каркасов под действие продольно-поперечных нагрузок и использованием программы ANSYS Mechanical APDL v 17.2.

Ключевые слова

Жесткость, каркас, тепловыделяющая сборка, ВВЭР, Ansys APDL

Поступила в редакцию 10.06.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. В настоящее время лидирующее место на рынке реакторостроения занимают водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР), которые строятся не только на территории Российской Федерации (Ростовская АЭС, Ленинградская АЭС-2, Нововоронежская АЭС-2, Смоленская АЭС-2 и др.), но и являются единственным типом реакторов, которые экспортируются нами в зарубежные страны (Иран, Индия, Китай, Турция, Белоруссия, Финляндия и др.). Это стало возможно благодаря высоким экономическим показателям установки и ее безопасности. Из-за конкуренции по первому показателю потребовалось увеличить сроки нахождения топлива в активной зоне, снизив паразитное поглощение нейтронов конструкционными материалами. Отказ для этого от применения коррозионно-стойких сталей для изготовления направляющих каналов в пользу каналов из циркониевого сплава Э110 привел к увеличению прогибов тепловыделяющей сборки (ТВС) до 30 мм, а в результате — к застреванию органов регулирования и аварийной защиты [1]. Недопустимость снижения уровня безопасности потребовала разработки новой конструкции каркаса ТВС, что в итоге привело к созданию двух вариантов:

– ТВСА — альтернативная конструкция с жестким каркасом, формируемым шестью уголками и дистанционирующими решетками (разработка «ОКБМ им. И.И. Африкантова») [2];

– ТВС-2М — конструкция с жестким каркасом, образованным приваркой двенадцати дистанционирующих решеток к направляющим каналам (разработка ОКБ «Гидропресс») [3].

Причинами прогиба каркаса являются продольные нагрузки от пружинного блока (компенсируют вес блока защитных труб, всплытие ТВС, радиационные и термические нагрузки) и поперечные (воздействие соседних искривленных ТВС).

В настоящей работе исследована зависимость прогиба каркасов ТВС от продольно-поперечного нагружения с использованием аттестованного программного комплекса ANSYS Mechanical APDL v 17.2 (номер лицензии 339001) [4].

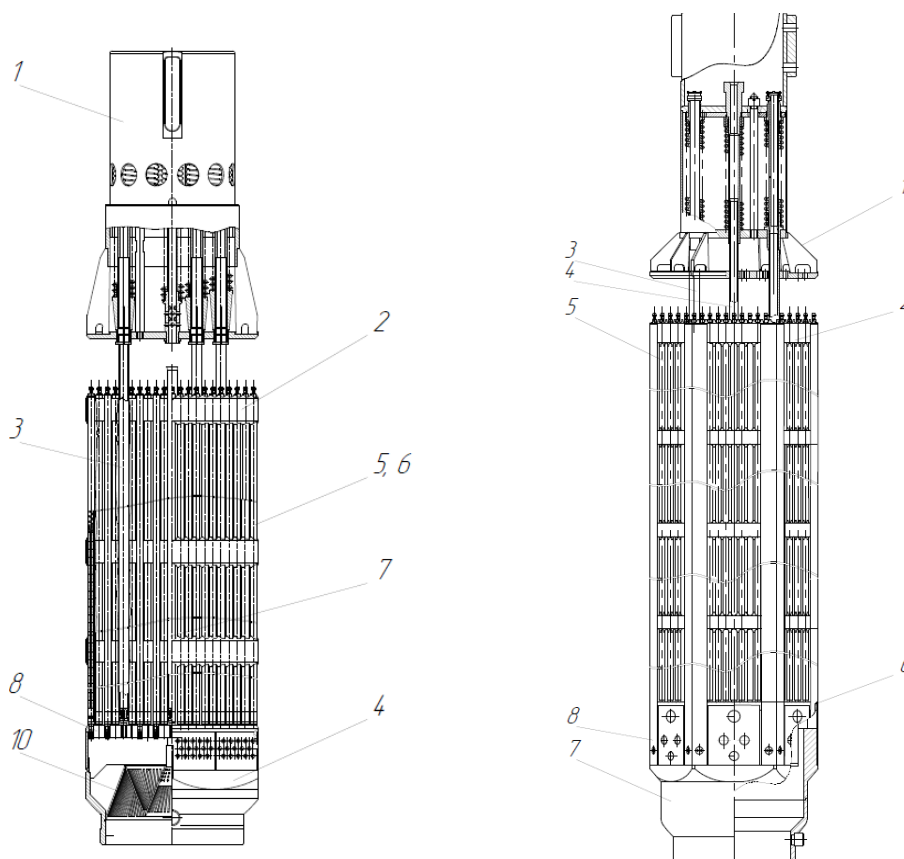


Рис. 1. Конструкции исследуемых ТВС:

a — ТВС-2М; *b* — ТВСА

Описание конструкции исследуемых ТВС ВВЭР-1000. Каркас ТВС-2М (рис. 1, *a*) получен путем сварки дистанционирующих решеток (ДР) 2, выполненных из циркониевого сплава Э110, с направляющими каналами 3, выполненными

из циркониевого сплава Э635. Данное конструкторское решение повышает изгибную жесткость изделия, которая сохраняет свои достаточно большие значения на весь период эксплуатации кассет. Нижняя решетка 8 является дополнительной и выполняет функцию антивибрационной, что повышает и вибростойкость конструкции. Также ТВС-2М состоит из головки 1, центральной трубы 3, тепловыделяющих элементов с различным топливом 5 и 6, хвостовика 8.

Схожее строение имеет и ТВСА (рис. 1, б): головка 1, ДР 2, направляющий канал 3, центральная труба 4, тепловыделяющий элемент 5, опорная решетка 6, хвостовик 7. Основным отличием является наличие особенного элемента конструкции — уголков 8. Именно благодаря им и приваренным 15 дистанционирующим решеткам образован силовой каркас, обеспечивающий жесткость и прочность всей конструкции. Уголки каркаса крепятся к хвостовику (изготовленному из коррозионно-стойкой стали) винтами. Центральная труба и 18 направляющих каналов крепятся резьбовыми соединениями к нижней несущей решетке, которая с помощью шести стальных пластин приваривается к хвостовику [1].

Описание созданных в среде ANSYS моделей ТВСА и ТВС-2М. Основная идея метода конечных элементов (МКЭ) состоит в том, что любую непрерывную величину (температуру, давление и перемещение) можно аппроксимировать моделью, состоящей из отдельных элементов. На каждом из этих элементов исследуемая непрерывная величина аппроксимируется кусочно-непрерывной функцией, которая строится на значениях исследуемой непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемого элемента. [5].

Используя опыт создания предыдущих моделей ТВС для РУ ВВЭР-440 [6] и ВВЭР-1000 [7], внесем ряд допущений:

- исключена возможность проскальзывания твэла в ячейках ДР;
- не учитывается изменение механических свойств материалов кассеты и неравномерность их распределения вследствие воздействия тепловых потоков, потоков ионизирующих излучений и т. п.;
- не учитывается депланация ДР;
- со стороны головки ТВС запрещено только горизонтальное перемещение, но со стороны хвостовика выполнена жесткая заделка;
- каждый твэл моделируют стержневым конечным элементом с распределенными параметрами (балочный элемент).

Моделирование с помощью МКЭ выполняли в программе ANSYS Mechanical APDL v 17.2. Предварительные исследования показали, что для получения результатов, близких к экспериментальным, можно значительно упростить модели. За основной элемент каркаса ТВС-2М были приняты направляющие каналы (НК), реализованные в программном комплексе посредством конечного элемента BEAM188, а для ТВСА — НК и уголки посредством конечного элемента SOLID185. Для наименьших затрат вычислительных ресурсов было принято решение не моделировать топливные таблетки, а заменить проектирование ДР процедурой Coupling [8]. Все исследуемые модели показаны на рис. 2.

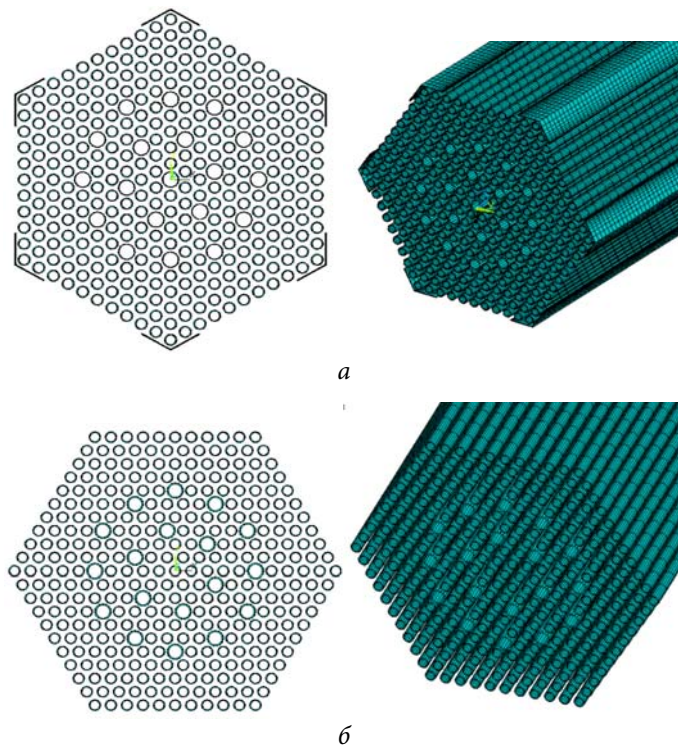


Рис. 2. Модели исследованных конструкций ТВС:

а — ТВСА; б — ТВС-2М

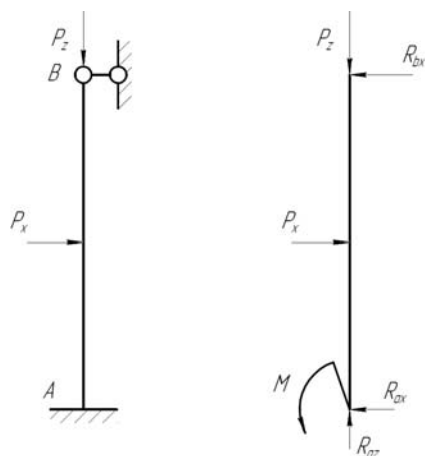


Рис. 3. Расчетная схема

Верификацию проводили путем применения основных принципов сопротивления материалов [9] и теории упругости [10]. Расчетная схема для ТВС представлена в виде стержня, на который действуют две нагрузки: горизонтальная P_x и вертикальная P_z . Стержень жестко закреплен в нижней части (заделка) и шарнирно закреплен в верхней (запрещено горизонтальное перемещение). Справа на рис. 3 заделка и шарнир заменены соответствующими реакциями — силами R_{ax} , R_{bx} , R_{az} и моментом M .

Запишем дифференциальные уравнения изгиба для участка до сосредоточенной силы и после нее:

участок 1

$$EIv_1'' = -\frac{PL}{6} + \frac{2P}{3}x;$$

участок 2

$$EIv_2'' = -\frac{PL}{6} + \frac{2P}{3}x - Px + \frac{PL}{2},$$

где E — модуль Юнга; I — момент инерции; l — длина ТВС.

После интегрирования:

участок 1

$$EIv_1 = -\frac{PL}{12}x^2 + \frac{P}{9}x^3 + C_1x + C_2;$$

участок 2

$$EIv_2 = -\frac{PL}{12}x^2 + \frac{P}{9}x^3 - \frac{P}{6}x^3 + \frac{PL}{4}x^2 + C_3x + C_4.$$

Учитывая, что в заделке отсутствует поворот и перемещение, в шарнире — перемещение, а также в области действия силы P перемещения равны, найдем константы:

$$C_1 = C_2 = 0; C_3 = -\frac{5L^2}{36}; C_4 = \frac{L^2}{36}.$$

Уравнения прогиба примут следующий вид:

участок 1

$$v_1 = \frac{P}{EI} \left(\frac{1}{9}x^3 - \frac{L}{12}x^2 \right);$$

участок 2

$$v_2 = \frac{P}{EI} \left(-\frac{1}{18}x^3 + \frac{L}{6}x^2 - \frac{5L^2}{36}x + \frac{L^2}{36} \right).$$

Как уже было сказано выше, на формоизменение ТВС влияют не только термосиловые факторы, но ирадиационные, вибрационные, химические. В рамках данной статьи учтено только действие силовых нагрузок, а именно продольной и поперечной сил. Описанные факторы учитывают влияние пружинного блока, расположенного в головке ТВС (осевая нагрузка), и влияние соседних ТВС, которые также по какой-либо причине могут иметь начальное или образованное вследствие эксплуатации искривление (поперечная нагрузка). На основе этих расчетных моделей выполнен анализ зависимости прогиба от выбора каркаса ТВС.

Основные результаты исследований. В ходе проведения расчетов были изучена зависимость прогиба каркасов ТВС-2М и ТВСА от прикладываемой нагрузки: поперечной или осевой. Результаты для случая, когда изменяется поперечная сила при неизменной осевой, приведены на рис. 4.

На рис. 4 видно, что ТВС-2М имеет прогиб почти на порядок меньше, чем ТВСА при аналогичной нагрузке. При дальнейшем увеличении нагрузки прогиб ТВСА линейно увеличивался.

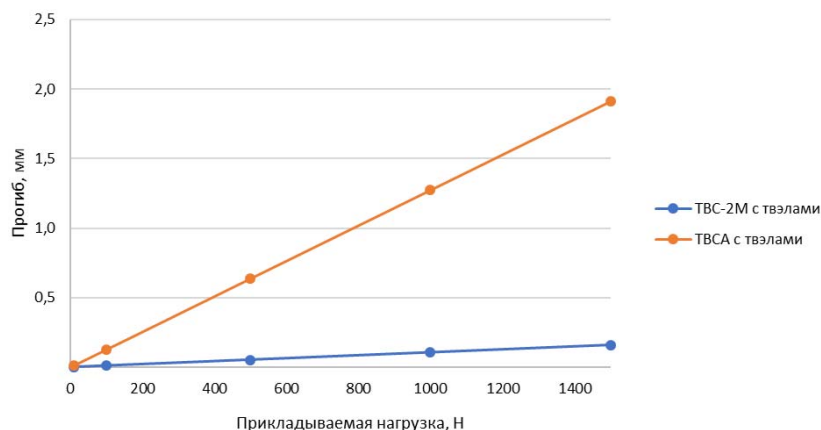


Рис. 4. Зависимость прогиба от поперечной силы

В результате изучения влияния осевой нагрузки при неизменной поперечной было выявлено, что обе конструкции ТВСА и ТВС-2М к данному виду нагружения не чувствительны. Прогиб при различных значениях осевой силы оставался постоянным.

Заключение. Проведенные исследования показали, что каркас ТВСА (уголки) более чувствителен к продольно-поперечным нагрузкам, чем каркас ТВС-2М. При минимальном изгибе на направляющие каналы к сжимающим нагрузкам добавляется воздействие изгибающего момента. В конструкции ТВС-2М, где направляющие каналы приварены к дистанционирующим решеткам (на начальном этапе жестко контактирующим с твэлами), каркас и пучок твэлов работают как единое целое против продольного нагружения, а в ТВСА в итоге вся дальнейшая нагрузка приходится только на одни направляющие каналы, приводя к их чрезмерным искривлениям. Однако полученные результаты требуют подтверждения в натурном эксперименте.

Литература

- [1] Шмелев В.Д., Драгунов Ю.Г., Денисов В.П. и др. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций. М., Академкнига, 2004.
- [2] Лескин С.Т., Шелегов А.С., Слободчук В.И. Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000. М., НИЯУ МИФИ, 2011.
- [3] Рыжов С.Б., Мохов В.А., Васильченко И.Н. и др. Опыт разработки и результаты эксплуатации ТВС-2 и ТВС-2М. *Мат. IX Росс. конф. по реакторному материаловедению*. Дмитровград, НИИАР, 2009, с. 5–7.
- [4] ANSYS mechanical user's guide. Release 17.2. ANSYS, Inc., 2016.
- [5] Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера. М., Либроком, 2015.
- [6] Азарова Е.Н., Ковалева В.А., Сатин А.А. Влияние конструкционных факторов на жесткость тепловыделяющих сборок водо-водяных энергетических реакторов. В: *Богатство России*. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, с. 295–296.

- [7] Блохина А.Н., Столотнюк С.В., Столотнюк Я.Д. Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния конструкций тепловыделяющих сборок реактора ВВЭР-1000 при динамических нагрузках. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 5, с. 6–16.
- [8] Басов К.А. ANSYS. Справочник пользователя. М., ДМК Пресс, 2014.
- [9] Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов. М., Наука, 1967.
- [10] Тимошенко С.П. Курс теории упругости. Киев, Наукова думка, 1972.

Меринова Виктория Эдуардовна — студентка кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

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

ANALYSIS OF THE RIGIDITY OF THE NONIRRADIATED FUEL ASSEMBLIES OF PRESSURIZED WATER TYPE REACTOR

V.E. Merinova

torisee@mail.ru

SPIN-code: 4335-7940

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Trends in increasing the operating time of the fuel assembly (FA) of a pressurized water reactor (PWR, WWER) led to the systematic abandonment of the use of corrosion-resistant steels for the manufacture of stiffeners in favor of zirconium alloys, which led to their increased deflections. This caused the regulatory bodies and emergency protection blocking, and, consequently, reduced the safety of reactor facilities. To solve this problem, two fundamentally different stiffeners were developed. The first is formed as a result of welding of the guide channels to the spacer grids, and the second with the use of angle bars. An objective comparison of the deflection of these frames under longitudinal-transverse loads and with the use of the ANSYS Mechanical APDL v 17.2 program was performed.

Keywords

Rigidity, stiffener, fuel assembly, PWR, Ansys APDL

Received 10.06.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Shmelev V.D., Dragunov Yu.G., Denisov V.P., et al. Aktivnye zony VVER dlya atomnykh elektrostantsiy [Active zones of VVER for atomic stations]. Moscow, Akademkniga Publ., 2004 (in Russ.).
- [2] Leskin S.T., Shelegov A.S., Slobodchuk V.I. Fizicheskie osobennosti i konstruktsiya reaktora VVER-1000 [Physical properties and construction of VVER-1000 reactor]. Moscow, NIYaU MEFPhI Publ., 2011 (in Russ.).
- [3] Ryzhov S.B., Mokhov V.A., Vasil'chenko I.N., et al. [Development experience and exploitation results for TVS-2 and TVS-2M]. *Mat. IX Ross. konf. po reaktornomu materialovedeniyu* [Proc. IX Russ. conf. on Reactor material engineering]. Dimitrovgrad, NI-IAR, 2009, pp. 5–7 (in Russ.).
- [4] ANSYS mechanical user's guide. Release 17.2. ANSYS, Inc., 2016.
- [5] Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'yeva M.A. ANSYS v rukakh inzhenera [ANSYS in hands of an engineer]. Moscow, Librokom Publ., 2015 (in Russ.).
- [6] Azarova E.N., Kovaleva V.A., Satin A.A. Vliyanie konstruktsionnykh faktorov na zhestkost' teplovydelyayushchikh sborok vodo-vodyanykh energeticheskikh reaktorov. V: Bogatstvo Rossii [Effect of construction aspects on rigidity of fuel assembly of pressurised water reactor. In: Russian wealth]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2018, pp. 295–296 (in Russ.).
- [7] Blokhina A.N., Stolotnyuk S.V., Stolotnyuk Ya.D. Comparative analysis of stress-strained state for VVER-1000 reactor fuel assemblies under dynamic loads. *Izvestiya vysshikh*

- uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2012, no. 5, pp. 6–16 (in Russ.).
- [8] Basov K.A. ANSYS. Spravochnik pol'zovatelya [ANSYS. User handbook]. Moscow, DMK Press Publ., 2014 (in Russ.).
- [9] Feodos'yev V.I. Soprotivlenie materialov [Strength of materials]. Moscow, Nauka Publ., 1967 (in Russ.).
- [10] Timoshenko S.P. Kurs teorii uprugosti [Course of elasticity theory]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1972 (in Russ.).

Merinova V.E. — Student, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Satin A.A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.