

**АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ТЕПЛОВЫДЕЛИТЕЛЬНОЙ  
СБОРКИ РЕАКТОРА ВВЭР-1000**

Д.И. Алексеев

alekseev\_d@internet.ru

SPIN-код: 9070-4522

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

**Аннотация**

Рассмотрено влияние постоянных и переменных нагрузок на работоспособность бесчехловой тепловыделительной сборки реактора типа ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор) при нормальных условиях эксплуатации. На примере упрощенной модели показано, как на заданном интервале частот происходит изменение геометрии конструкции в области упругих деформаций. Все расчеты проведены с помощью программного комплекса Ansys Workbench v. 2020. В результате анализа дана оценка устойчивости сборки, найдены собственные частоты и формы колебаний, определена первая резонансная частота. На основе статического нагружения исследуемой модели сделаны выводы о максимально допустимых условиях механического нагружения и визуализирована первая форма потери устойчивости.

**Ключевые слова**

Тепловыделительная сборка, жесткость, деформация, статическое нагружение, собственные частоты, резонанс, устойчивость

Поступила в редакцию 20.04.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

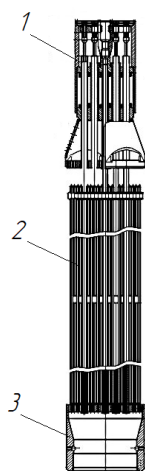
**Введение.** Основной задачей расчета сколь угодно сложной конструкции является определение предельно допустимых условий эксплуатации. Особенно это важно для атомной промышленности, где главной задачей является обеспечение высокой надежности и безопасности. Для этого в современной практике используются системы компьютерного моделирования, позволяющие дать оценку работоспособности любого элемента, входящего в состав реактора, не прибегая к его изготовлению. Это позволяет уменьшить затраты на производство и свести вероятность появления неполадок к минимуму.

Одна из таких неполадок обусловлена деформациями в активной зоне реактора, вызванными искривлением тепловыделительныхборок (ТВС) в результате воздействия на них различных нагрузок [1, 2]. Это приводит к тому, что извлечение любой сборки из активной зоны становится крайне затруднительным по причине влияния на нее соседних элементов конструкции. Более того, увеличивается время введения поглощающих элементов системы и управления (СУЗ), что, в свою очередь, может вызвать перегрев всей установки. Особенно эта проблема актуальна для водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР), работающих при высоких давлениях.

На сегодняшний день реакторы данного типа получили широкое распространение в атомной промышленности [3]. В них используются бесчехловые тепловыделительные сборки, что, с одной стороны, дает возможность уменьшить расход нейтронов благодаря экономии конструкционных материалов, а с другой — приводит к снижению жесткостиборок и увеличению прогибов.

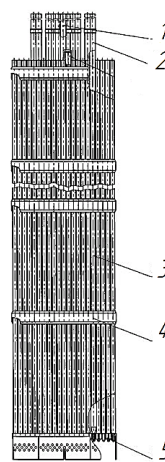
Предполагается, что основными причинами возникновения деформаций ТВС служат силы, действующие со стороны пружинного блока, а также силы от соседнихборок, которые в совокупности обеспечивают статическое нагружение конструкции. Однако с увеличением мощности реакторов и длительности топливной кампании самихборок все большее значение при расчете на прочность приобретает динамическое нагружение [4]. К нему можно отнести влияние различного рода природных явлений (землетрясения, ураганы, оползни), а также разрушения техногенного характера. Влияние температуры считается незначительным, а поэтому при дальнейших рассуждениях его можно не учитывать.

**Описание конструкции рассматриваемых тепловыделительныхборок ВВЭР-1000.** Тепловыделительная сборка (рис. 1) состоит из головки 1, пучка тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) 2 и хвостовика 3. В пучке (рис. 2) содержится 312 твэлов, 18 трубчатых направляющих каналов для направляющих стержней системы управления и защиты, а также центральная трубка, которые отделены друг от друга дистанцирующими решетками [5].



**Рис. 1.** Тепловыделительная сборка:

1 — головка; 2 — пучок ТВЭЛов;  
3 — хвостовик



**Рис. 2.** Пучок ТВЭЛов:

1 — центральная трубка; 2 — направляющий канал; 3 — тепловыделяющий элемент;  
4 — дистанцирующая решетка; 5 — нижняя решетка

Крепление ТВС в корпусе реактора осуществляется с помощью хвостовика 3, соединенного с пучком ТВЭЛов через нижнюю решетку с применением сварки. Дистанцирующие решетки позволяют увеличить жесткость конструкции, а также сохранить постоянным шаг расположения ТВЭЛов по всей длине сборки.

Предполагается, что основную нагрузку должны воспринимать направляющие трубки, на выступающие концы которых в области головки 1 надевают 15 пружин и 3 винта. Пружины служат для предотвращения всплытия, вибрации и компенсации технологических допусков ТВС и внутрикорпусных устройств при работе реактора[5].

**Используемые в работе допущения.** Очевидно, что в точности воссоздать условия работы тепловыделительной сборки невозможно, поскольку в реальности необходимо учитывать множество факторов, для моделирования которых требуются огромные вычислительные ресурсы. Поэтому для дальнейшего анализа необходимо принять следующие допущения:

- для создания конечно-элементной модели сборки достаточно рассмотреть только пучок ТВЭЛов, поскольку именно эта часть испытывает наибольшие деформации;
- сам пучок нужно рассматривать как призматический стержень, один конец которого жестко закрепляется, а для второго допускаются только продольные и относительные угловые перемещения;
- при расчете на устойчивость следует считать, что на всю сборку действуют только продольная и срезающая силы ( $F_n$  и  $F_c$  соответственно) (рис. 3), заданные для общности расчета произвольным образом (срезающая сила составляет 100 Н, продольная — 1000 Н);
- материал модели полагают изотропным;
- при задании граничных условий не учитывают массу конструкции;
- в конечно-элементной модели не учитываются погрешности изготовления ТВЭЛов и направляющих трубок;
- наличие топливных таблеток в ТВЭЛах не оказывает существенного влияния на точность расчета, поэтому их моделирование не имеет смысла.

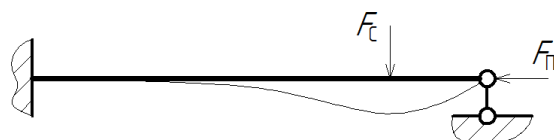


Рис. 3. Теоретическая модель

Целью задания всех вышеперечисленных требований не является переход к некоторой абстрактной модели, не имеющей ничего общего с реальной конструкцией. Важно понимать, что это необходимо прежде всего для обеспечения большей наглядности получаемых результатов. Поэтому при нахождении форм потери устойчивости ТВС и для оценки ее первой резонансной частоты было принято решение использовать программную среду Ansys Workbench v. 2020, имеющую для этого весь необходимый функционал.

Саму модель создавали на встроенной платформе Ansys Design Modeler. Здесь с помощью объекта linebody [6] были заданы ТВС и направляющие трубки, конфигурации сечений которых выбирали из встроенной библиотеки. Для

создания дистанцирующих решеток использовали элемент *surfacebody* [6], что позволило представить их в виде плоскостей, отстоящих друг от друга на равном расстоянии (рис. 4).

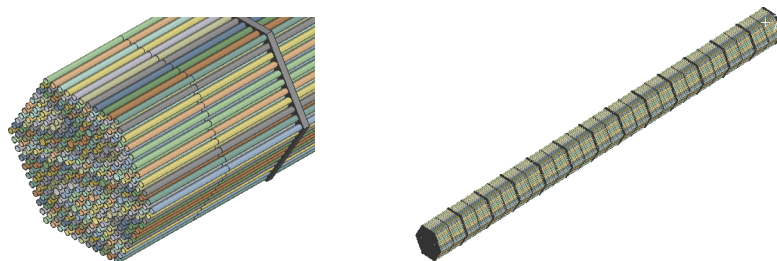


Рис. 4 Модель ТВС

За материал модели был принят циркониевый сплав Э-110[7], основные характеристики которого представлены ниже:

- модуль объемной упругости  $E = 94,388$  ГПа;
- коэффициент Пуассона  $\mu = 0,38$ ;
- предел текучести  $\sigma_{\tau} = 204$  МПа;
- предел прочности  $\sigma_{\sigma} = 272$  МПа.

**Результаты проведенного исследования.** Для оценки резонансной частоты[8] были определены 10 собственных частот (14,848; 14,854; 21,743; 32,496; 32,504; 43,433; 50,314; 50,319; 64,988; 67,963 Гц), для первой из которых была визуализирована форма колебаний (рис. 5). Максимальное отклонение от состояния равновесия составило 4,3 мм.

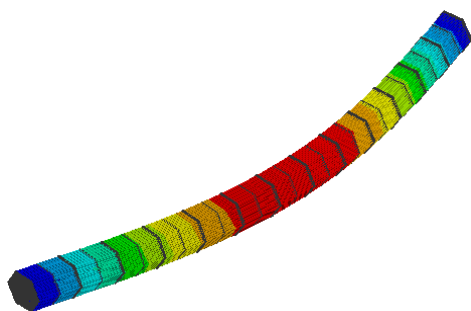


Рис. 5. Первая форма колебаний

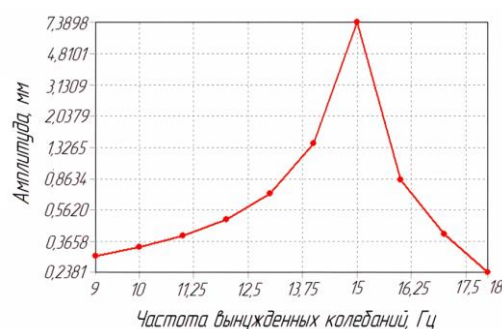


Рис. 6. Частотная характеристика

Таким образом, значение первой резонансной частоты определяется в диапазоне частот возбуждения вынужденных колебаний 9...18 Гц. На рис. 6 видно, что максимальное отклонение от положения равновесия составляет 7,4 мм при частоте, соответствующей 15 Гц.

Из расчета на устойчивость получено, что максимальные деформации возникают в месте приложения срезающей силы  $F_c$  (рис. 3) и составляют 1,05 мм.

Чтобы получить данный результат необходимо увеличить исходную нагрузку в 212 раз (рис. 7).

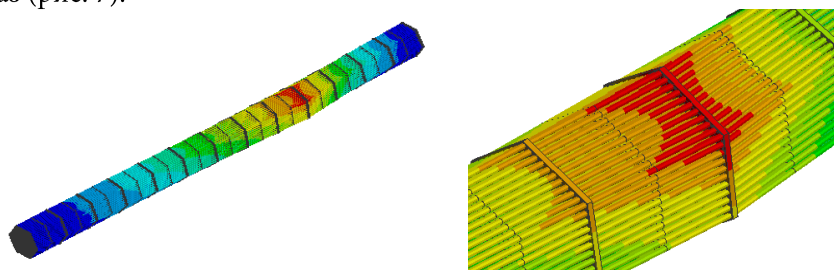


Рис. 7. Деформации ТВС при расчете на устойчивость

**Выводы.** Полученное значение первой резонансной частоты, а также результаты расчета на устойчивость являются основополагающими для дальнейшего анализа прочностных характеристик ТВС ВВЭР и позволяют оценить предельно допустимые условия ее эксплуатации. Этот анализ является крайне важным, поскольку дает возможность спрогнозировать поведение ТВС при воздействии как постоянных, так и переменных нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации ядерного реактора.

В результате проделанного расчета было установлено, что для нормальной работы реактора ВВЭР-1000 частота вынужденных колебаний со стороны окружающей среды не должна приближаться к значению 15 Гц. Это является необходимым условием сохранения контроля над процессами деления в активной зоне. В свою очередь, деформации, вызванные силами со стороны ТВС, а также от удерживающих пружинных блоков, не оказывают существенного влияния на процессы извлечения ТВС и элементов СУЗ, поскольку не превышают допустимого зазора, размер которого составляет 3 мм.

#### Литература

- [1] Павлов С.В. Изменение изгибной жесткости ТВС ВВЭР-1000 при эксплуатации. *Известия вузов. Ядерная энергетика*, 2016, № 3, с. 42–52. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2016.3.05>
- [2] Драгунов Ю.Г., Селезнев А.В., Васильченко И.Н. и др. Экспериментальные и расчетные исследования жесткости и формоизменения необлученных ТВС ВВЭР-1000. В: Сб. тр. ОКБ «Гидропресс». Подольск, Гидропресс, с. 305–315.
- [3] Резепов В.К., Денисов В.П., Кирилюк Н.А. и др. Реакторы ввэр-1000 для атомных электростанций. Подольск, Гидропресс, 2004.
- [4] 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.
- [5] Андрущечко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. М., Логос, 2010.
- [6] Верхотуркин Е.Ю., Пащенко В.Н., Пясецкий В.Б. Интерфейс и генерирование сетки в Ansys Workbench. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.

- [7] Пузанов Д.Н., Сатин А.А. Анализ и обобщение данных по свойствам циркониевых сплавов, применяющихся в качестве конструкционных материалов. *Сб. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам*. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2011/documents/kms2011-013.pdf> (дата обращения: 15.02.2021).
- [8] Рыжов С.Б., ред. ВАНТ. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. Вып. 23. Подольск, Гидропресс, 2008.

**Алексеев Даниил Ильич** — студент кафедры «Ядерные реакторы и материалы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

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

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Алексеев Д.И. Анализ прочности тепловыделительной сборки реактора ВВЭР-1000. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 05(58). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-05-698>

## STRENGTH ANALYSIS OF WWER-1000 REACTOR FUEL ASSEMBLY

D.I. Alekseev

alekseev\_d@internet.ru

SPIN-code: 9070-4522

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

The article is devoted to the influence of constant and variable loads on the serviceability of an open reactor fuel assembly of a WWER-type reactor (pressurized water-cooled power reactor) under normal operating conditions. Using a simplified model as an example, it is shown how the structure geometry changes in the region of elastic deformations at a given frequency range. All calculations were performed using the Ansys Workbench v. 2020. As a result of the analysis, the stability of the assembly is assessed, natural frequencies and modes of vibration are found, and the first resonant frequency is determined. Based on the static loading of the model under study, conclusions are drawn about the maximum permissible conditions of mechanical loading and the first form of buckling is visualized.

### Keywords

Reactor fuel assembly, stiffness, deformation, static loading, natural frequencies, resonance, stability

Received 20.04.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

---

### References

- [1] Pavlov S.V. In-service change in the flexural rigidity of the vver-1000 fuel assemblies. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2016, no. 3, pp. 42–52. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2016.3.05> (in Russ.).
- [2] Dragunov Yu.G., Seleznev A.V., Vasil'chenko I.N., et al. Eksperimental'nye i raschetnye issledovaniya zhestkosti i formoizmeneniya neobluchennykh TVS VVER-1000 [Experimental and calculated study on rigidity and deformation of unirradiated TVS VVER-1000]. V: Sbornik trudov OKB "Gidropress" [In: Proc. OKB "Gidropress"]. Podol'sk, Gidropress Publ., pp. 305–315 (in Russ.).
- [3] Rezepov V.K., Denisov V.P., Kirilyuk N.A., et al. Reaktory VVER-1000 dlya atomnykh elektrostantsiy [VVER-1000 reactors for atomic power stations]. Podol'sk, Gidropress Publ., 2004 (in Russ.).
- [4] 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* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2012, no. 5, pp. 6–16 (in Russ.).
- [5] Andrushechko S.A., Afrov A.M., Vasil'yev B.Yu., et al. AES s reaktorom tipa VVER-1000 [Atomic power station with reactor of VVER-1000 type]. Moscow, Logos Publ., 2010 (in Russ.).
- [6] Verkhoturkin E.Yu., Pashchenko V.N., Pyasetskiy V.B. Interfeys i generirovanie setki v Ansys Workbench [Interface and grid generation in Ansys Workbench]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2013 (in Russ.).

- [7] Puzanov D.N., Satin A.A. Analiz i obobshchenie dannykh po svoystvam tsirkonievyykh splavov, primenyayushchikhsya v kachestve konstruktsionnykh materialov [Information analysis and integration on properties of zirconium alloys used as a construction material]. *Sb. dokl. nauch.-tekhn. konf. molodykh spetsialistov po yadernym energeticheskim ustanovkam* [Proc. Sci.-Tech. Conf. of Young Specialists on Nuclear Power Plants] (in Russ.). URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2011/documents/kms2011-013.pdf> (accessed: 15.02.2021).
- [8] Ryzhov S.B., ed. VANT. Ser. Obespechenie bezopasnosti AES. Vyp. 23 [Issues of atomic science and safety. Providing safety of atomic power station. Iss. 23]. Podol'sk, Gidropress Publ., 2008 (in Russ.).

**Alekseev D.I.** — Student, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Satin A.A., Assistant, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Alekseev D.I. Strength analysis of WWER-1000 reactor fuel assembly. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 05(58). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-05-698.html> (in Russ.).