

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ И МАТЕРИАЛА ЯЧЕЙКИ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩЕЙ РЕШЕТКИ ТЕПЛОЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ ВВЭР-1000

В.А. Ковалева

Viktoriya.Kovl@gmail.com

SPIN-код:4328-1414

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

Аннотация

Одним из ключевых факторов, определяющих термомеханическое поведение тепловыделяющей сборки при эксплуатации, являются условия взаимодействия твэлов с дистанционирующей решеткой. В ходе эксплуатации, вследствие ползучести и радиационного роста конструкционных материалов, происходит изменение упругих натягов в парах «оболочка твэл–ячейка дистанционирующей решетки», что приводит к изменению условий их взаимодействия и, как следствие, напряженно-деформированному состоянию тепловыделяющей сборки. С использованием программного комплекса Ansys Mechanical v 17.0 проанализировано влияние на начальные контактные силы и время сохранения этих сил следующих факторов: величины начального натяга, длины пуклевки и материала ячейки. Доказано, что увеличение начального натяга приводит к увеличению времени упругого взаимодействия, использование сплава с более низкой скоростью радиационной ползучести — к существенному увеличению времени упругого взаимодействия, а изменение длины пуклевки существенно влияет на время упругого взаимодействия в паре «оболочка твэл–ячейка дистанционирующей решетки».

Ключевые слова

Дистанционирующая решетка, оболочка твэл, контактная сила, тепловыделяющая сборка, радиационный рост, радиационная ползучесть, начальный натяг, пуклевка

Поступила в редакцию 27.10.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

В настоящее время наиболее востребованными реакторами, которые строят на территории Российской Федерацией, являются реакторы ВВЭР [1, 2]. Реакторы эти постоянно совершенствуются в частности, от проекта к проекту улучшаются технические характеристики активной зоны [3, 4]. Наиболее заметным достижением последних лет стал переход от чехлового к бесчехловому стальному каркаса, а затем к циркониевой бесчехловой конструкции, позволившей увеличить время эксплуатации тепловыделяющей сборки (ТВС) за счет экономии нейтронов. Однако такое решение привело к проблеме чрезмерного искривления ТВС (на 30 мм и более), что вызвало застревание в них органов регулирова-

ния системы управления и защиты, в том числе и органов аварийной защиты, что существенно снизило безопасность установок. Было предложено повысить жесткость каркаса либо с помощью введения уголков, либо путем приварки дистанционирующих решеток к направляющим каналам.

При эксплуатации за счет термомеханических нагрузок, включающих эффекты радиационного роста и ползучести, рост искривления возможен даже в новых, модернизированных ТВС [5]. При этом одним из ключевых факторов, определяющих термомеханическое поведение ТВС в ходе эксплуатации, являются условия взаимодействия твэлов с дистанционирующими решетками. Большие контактные силы в парах «оболочка ТВЭЛ–ячейка дистанционирующей решетки», с одной стороны, повышают жесткость ТВС, одновременно с этим приводят к появлению больших напряжений в элементах ТВС, вызванных несогласованным удлинением твэлов и направляющих каналов в ходе эксплуатации. Малые контактные силы в парах «твэл–ячейка дистанционирующей решетки» уменьшают напряжения в элементах ТВС, однако могут привести к сильному искривлению ТВС, появлению фреттинг-коррозии оболочек твэл и ячеек дистанционирующей решетки. В ходе эксплуатации вследствие ползучести и радиационного роста конструкционных материалов (изменение внешнего диаметра оболочки твэл и внутреннего диаметра вписанной окружности в ячейках дистанционирующей решетки) происходит изменение упругих натягов в парах «оболочка твэл–ячейка дистанционирующей решетки», что приводит к изменению условия взаимодействия твэлов с дистанционирующей решеткой и, как следствие, напряженно-деформированное состояние ТВС.

В настоящей работе с использованием программного комплекса ANSYS APDL v 17.0 (номер лицензии 339001) [6–8] проанализировано влияние на начальные контактные силы, а также на время их сохранения следующих факторов:

- величины начального натяга (40, 60 и 80 мкм);
- длины пуклевки (4, 6 и 8 мм);
- материала ячейки (циркониевые сплавы Э110, Э125 и Э635).

Цель работы — определение влияния изменений нижней решетки на прочностные характеристики рабочих кассет с помощью аттестованного программного комплекса Ansys Mechanical v 17.0.

Описание элементов конструкции. Бесчехловая ТВС (рис. 1) с каркасом, образованным приваркой дистанционирующих решеток к направляющим каналам (ТВС–2, ТВС–2М, ТВС–2006, ТВС–ТОИ), состоит из следующих основных элементов [3–4]:

- хвостовика с фиксатором;
- пучка твэлов и твэггов;
- каркаса из направляющих каналов;
- дистанционирующих решеток;
- головки.

ТВС устанавливается в плиту шахты внутрикорпусной при помощи хвостовика 1. Нижней плите хвостовика цанговым креплением крепится пучок из твэлов и твэгов 2. Жесткий каркас образован приваркой дистанционирующих решеток 4 к направляющим каналам 3. Удержание от всплытия, компенсация температурных и радиационных удлинения, гашение падения поглощающих стержней системы управления и защиты осуществляют пружины головки ТВС 5.

Циркониевая дистанционирующая решетка сотового типа (рис. 2) состоит из 312 ячеек (рис. 3), заключенных в обод. В местах под направляющие каналы и инструментальный канал ячейки не устанавливаются. Ячейки и обод дистанционирующей решетки выполнены из сплава Э110. Между собой ячейки соединены методом точечной сварки. Таким же методом поле ячеек крепится к ободу. Ячейки решетки штампуются из тонкостенной трубы и имеют шестигранную форму с пуклевками (по которым контактируют с твэлом), расположенными на 0° , 120° и 240° для дистанционирования твэлов.

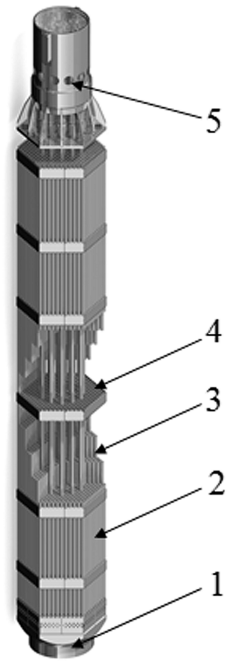


Рис. 1. Общий вид бесчехловой ТВС с каркасом

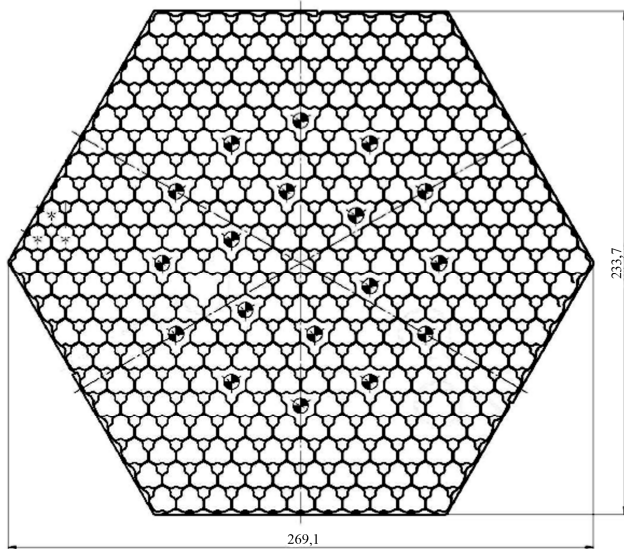


Рис. 2. Циркониевая дистанционирующая решетка сотового типа ТВС ВВЭР-1000

Расчетная модель. Программа ANSYS, как и многие другие САЕ-продукты, для математического моделирования различных процессов использует метод конечных элементов. Этот метод можно применять и для

анализа напряженно деформированного состояния конструкций, для термического анализа, решения гидро- и газодинамических задач, задач электродинамики, а также связанных задач.

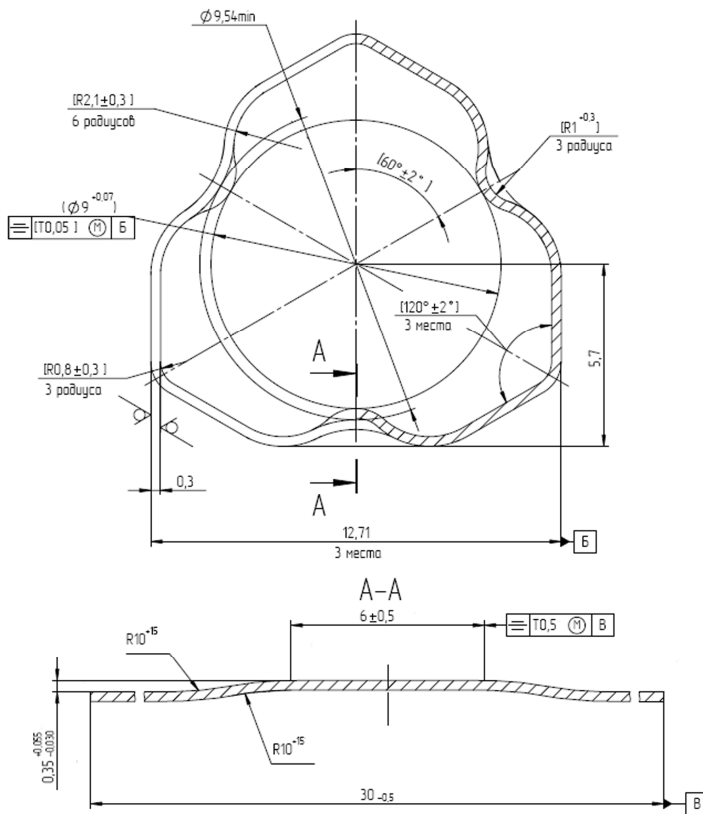


Рис. 3. Ячейка основного ряда дистанционирующей решетки ТВС (вверху) и клевка ячейки дистанционирующей решетки (внизу)

Исследовано падение контактных усилий в паре «оболочка твэл–ячейка дистанционирующей решетки» в условиях радиационной ползучести. Уменьшение диаметра оболочки твэл не учитывалось, а следовательно и нагрузки, возникающие при проскальзывании ТВЭЛ вследствие температурного расширения, радиационного роста, изменения размеров топлива внутри оболочки.

Моделирование ячейки дистанционирующей решетки и оболочки твэл проводилось методом конечных элементов типа SOLID185. Конечно-элементная модель содержит 23742 узлов и 23040 элементов (рис. 4). Установлено, вблизи областей контакта оболочки твэла с ячейкой дистанционирующей решетки конечно-элементная сетка сгущалась.

Закрепление осуществлялось путем запрещения всех перемещений в местах расположения сварных точек, соединяющих данную ячейку и с полем остальных ячеек дистанционирующей решетки.

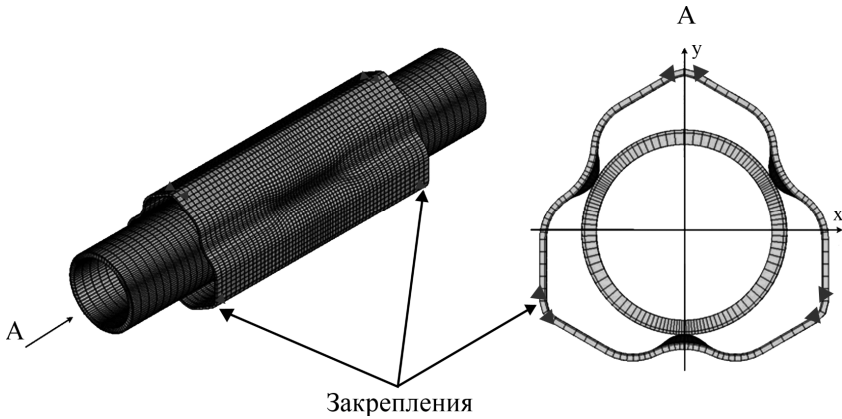


Рис. 4. Конечно-элементная модель «ТВЭЛ-ячейка дистанционирующей решетки»

Расчет выполнен с использованием упрощенной конечно-элементной модели для температуры $T = 330 \text{ }^\circ\text{C}$ и потока быстрых нейтронов $2,8 \cdot 10^{14} \text{ 1/(с}\cdot\text{см}^2)$. Радиационная ползучесть определялась согласно формуле (1) для циркониевых сплавов Э110 и Э125 и формуле (2) для циркониевого сплава Э635 [4]:

$$\dot{\epsilon}_{pn} = 2,34 \cdot 10^{-18} f \sigma_{\text{экв}} \exp(-6000 / T); \tag{1}$$

$$\dot{\epsilon}_{pn} = 0,361 \cdot 10^{-18} f \sigma_{\text{экв}} \exp(-6000 / T). \tag{2}$$

Такие механические свойства, как модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предел текучести и плотность были определены согласно работам [9–10].

Обработка результатов исследования. При увеличении начального натяга до 80 мкм начальное контактное усилие возросло до 26,4 Н, а время сохранения контакта усилий — в 3 раза (рис. 5).

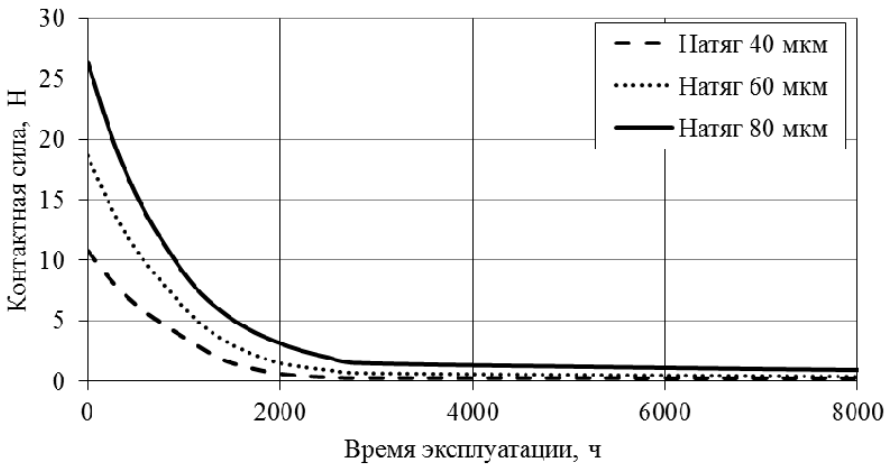


Рис. 5. Релаксация радиальных усилий взаимодействия оболочки ТВЭЛ с ячейкой дистанционирующей решетки при различных начальных диаметральных натягах в паре

При использовании вместо сплава Э110 сплава Э125 (рис. 6) принципиальных изменений контактных усилий и времени сохранения контакта не наблюдалось, однако использование сплава Э635 в качестве материала дистанционирующих решеток позволило увеличить время сохранения контактных усилий в 7,5 раз. Стоит отметить, что в силу отсутствия источников информации радиационной ползучести сплава Э125, данные для этого эффекта применяли для сплава Э110.

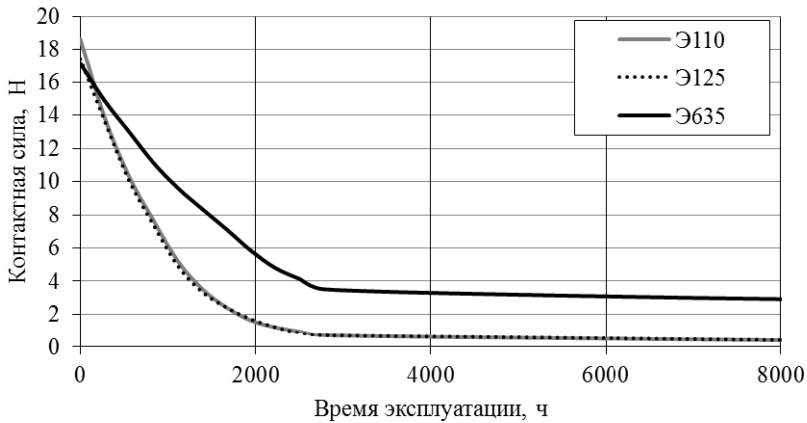


Рис. 6. Релаксация радиальных усилий взаимодействия оболочки твэлов с ячейкой дистанционирующей решетки в зависимости от материала ее изготовления

Изменение длины пуклевки с 8 до 6 мм привело к увеличению времени сохранения контакта, однако дальнейшее уменьшение длины пукли привело бы к падению времени контакта вследствие уменьшения площади контактной поверхности (рис. 7).

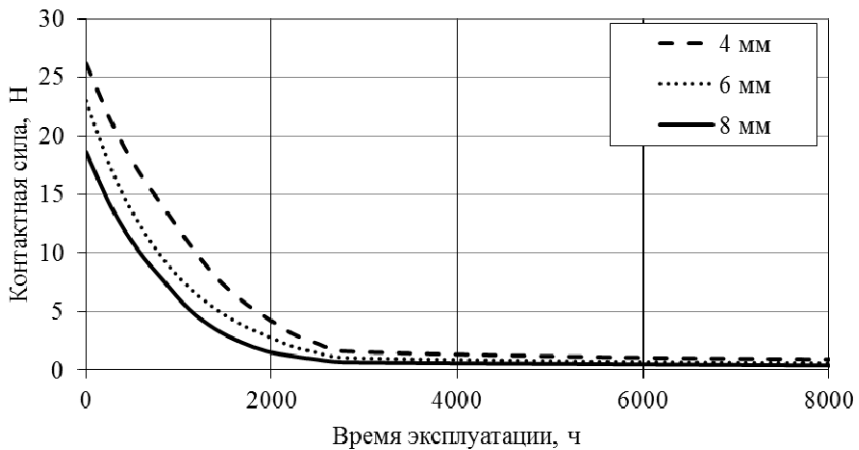


Рис. 7. Релаксация радиальных усилий взаимодействия оболочки твэл с ячейкой дистанционирующей решетки при различных длинах пуклевки

Анализ результатов показал, что свойства материала незначительно влияют на максимальные напряжения непосредственно в месте контакта дистанционирующей решетки с оболочкой ТВЭЛ, а именно при замене циркониевого сплава Э110 на сплав Э125 напряжение уменьшается всего на 2,3 %, а при замене его на сплав Э635 — на 8,6 %.

Изменение длины пуклевки с 6 до 8 мм снижает максимальное напряжение на 19 %, при этом уменьшение начального натяга приводит к снижению максимальных напряжений в 2 раза. Но малые напряжения в элементах ТВС могут привести к чрезмерному ее искривлению и появлению фреттинг-коррозии оболочек твэл и ячеек дистанционирующей решетки, большие напряжения могут вызвать чрезмерное удлинение твэлов и направляющих каналов в ходе эксплуатации.

На рисунке 8 представлено распределение интенсивности напряжений в контактной паре «оболочка твэл-ячейка дистанционирующей ячейки», при этом максимальные приведенные напряжения в сварных точках, за счет которых осуществлялось удержание модели, не превышают допустимые.

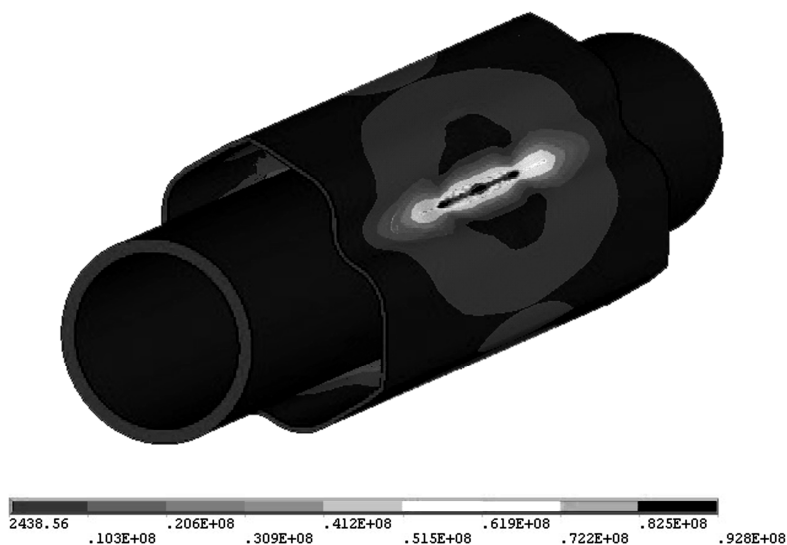


Рис. 8. Распределение напряжений в контактной паре с ячейкой из циркониевого сплава Э110 8-миллиметровой пуклей и начальным натягом 60 мкм

Выводы. При исследовании влияния начального диаметрального натяга обнаружена зависимость времени взаимодействия в контактной паре «оболочка твэл-ячейка» от увеличения начального натяга, что способствует повышению сопротивления ТВС поперечному изгибу, но при этом требует дополнительных усилий при сборке пучка твэл.

Уменьшение длины пуклевки до 6 мм приводит к увеличению времени взаимодействия, однако дальнейшее уменьшение вызывает обратный эффект вследствие резкого падения контактной площади взаимодействия. Следова-

тельно, необходимо проведение дополнительных исследований с целью выявления области рекомендуемых значений длины пукли.

Используя материалы с более низкой скоростью радиационной ползучести, например сплав Э635, можно существенно увеличить время сохранения контактного взаимодействия, однако технологическое изготовление ячеек из подобных сплавов, как правило, сложнее.

Литература

- [1] Пиминов В.А. Мохов В.А. Беркович В.Я. Щекин И.Г. Конкурентоспособность технологии ВВЭР // *9-я научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР»*. Подольск, 19–22 мая 2015.
URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/documents/mntk2015-112.ppt>.
- [2] Резепов В.К., Денисов В.П., Кирилук Н.А., Драгунов Ю.Г., Рыжов С.Б. *Реакторы ВВЭР-1000 для атомных электростанций*. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 333 с.
- [3] Рыжов С.Б., Мохов В.А., Васильченко И.Н. и др. Опыт разработки и результаты эксплуатации ТВС-2 и ТВС-2М // *Материалы IX Российской конференции по реакторному материаловедению. НИИАР, Димитровград, 14–18 сентября 2009*.
- [4] Шмелев В.Д., Драгунов Ю.Г., Денисов В.П., Васильченко И.В. *Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций*. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 220 с.
- [5] Сатин А.А., Емшанов В.Г. Уточненный алгоритм расчета поджата тепловыделяющих сборок // *Научно-техническая конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам. ОКБ «Гидропресс»*. Подольск, 16–17 марта 2011.
URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2011/documents/kms2011-030.pdf> (дата обращения 01.09.2017).
- [6] ANSYS Mechanical User's Guide. Release 17.0. ANSYS, Inc. 2016, 1832 p.
- [7] Басов К.А. ANSYS. Справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2014. 639 с.
- [8] Каплун А.Б., Морозов Е.М., Шамраева М.А. *ANSYS в руках инженера*. Практическое руководство. М.: Либроком, 2016. 270 с.
- [9] Сатин А.А., Пузанов Д.Н. Анализ и обобщение данных по свойствам циркониевых сплавов, применяющихся в качестве конструкционных материалов // *Научно-техническая конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам. ОКБ «Гидропресс»*. Подольск. 16–17 марта, 2011.
- [10] Сатин А.А., Васильченко И.Н., Кушманов С.А., Пузанов Д.Н. Результаты исследования влияния скорости радиационной ползучести циркониевых сплавов на термомеханическое поведение ТВС и прочность ее элементов // *X Российская конференция по реакторному материаловедению. Сборник докладов*. Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2013. С. 335–347.

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

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

THE INFLUENCE OF THE GEOMETRY AND MATERIAL OF THE FUEL ROD ARRAY WWER-1000 SPACER GRID MESH

V.A. Kovaleva

Viktoriya.Kovl@gmail.com

SPIN-код:4328-1414

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The conditions for the nuclear fuel elements interaction with the spacer grid are one of the key factors determining the thermo-mechanical behavior of the fuel rod array during operation. When in service, due to creeping and the radiation increase of the constructional materials, the change of the elastic tension in the pairs “fuel-element jacket — spacer grid mesh” takes place, resulting in changing the conditions of their interaction and subsequently in the stress-strain behavior of the fuel rod array. By using the software package AnsysMechanical v 17.0 we have analyzed the influence of the following factors on the initial contact forces and save time of these forces: the magnitude of the initial tension, the bulge length and the material of the mesh. It is proved that the increase of the initial tension brings about the time increment of the elastic interaction, the use of the alloy with the lower speed of the radiation-induced creep causes the essential increase of the elastic interaction duration, and the bulge length change has a significant impact on the time of the elastic interaction in the pair “fuel-element jacket — spacer grid mesh”.

Keywords

Spacer grid, fuel-element jacket, contact force, fuel rod array, radiation increase, radiation-induced creep, initial tension, bulge

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

- [1] Piminov V.A. Mokhov V.A. Berkovich V.Ya. Shchekin I.G. Konkurentosposobnost' tekhnologii VVER. 9 nauch.-tekh. konf. “Obespechenie bezopasnosti AES s VVER”. Podol'sk. May 19–22. 2015 (in Russ.). Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/documents/mntk2015-112.ppt>.
- [2] Rezepov V.K., Denisov V.P., Kirilyuk N.A., Dragunov Yu.G., Ryzhov S.B. Reaktory VVER-1000 dlya atomnykh elektrostantsiy [WWER-1000 for nuclear power plants]. Moscow, Akademkniga Publ., 2004. 333 p.
- [3] Ryzhov S.B., Mokhov V.A., Vasil'chenko I.N. Opyt razrabotki i rezul'taty ekspluatatsii TVS-2 i TVS-2M. *Mat. IX Ross. konf. po reaktornomu materialovedeniyu*. NIIAR, Dimitrovgrad. Sept. 14–18. 2009 (in Russ.).
- [4] Shmelev V.D., Dragunov Yu.G., Denisov V.P., Vasil'chenko I.V. Aktivnye zony VVER dlya atomnykh elektrostantsiy [Core of Water-Water Energetic Reactor for nuclear plants]. Moscow, Akademkniga Publ., 2004. 220 p.
- [5] Satin A.A., Emsharov V.G. Utochnennyy algoritm rascheta podzhatiya teplovyydelyayushchikh sborok. *Nauch.-tekh. konf. molodykh spetsialistov po yadernym energeticheskim ustanovkam*.

- OKB "Gidropress". Podol'sk. March 16–17. 2011 (in Russ.). Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2011/documents/kms2011-030.pdf> (accessed 01.09.2017).
- [6] ANSYS Mechanical User's Guide. Release 17.0. ANSYS, Inc. 2016, 1832 p.
- [7] Basov K.A. ANSYS. Spravochnik pol'zovatela [ANSYS User's guide]. Moscow, DMK Press, 2014. 639 p.
- [8] Kaplun A. B., Morozov E. M., Shamraeva M. A. ANSYS v rukakh inzhenera. Prakticheskoe rukovodstvo [ANSYS in the hands of the engineer. A practical guide]. Moscow, Librokom Publ., 2016. 270 p.
- [9] Satin A.A., Puzanov D.N. Analiz i obobshchenie dannykh po svoystvam tsirkonievyykh splavov, primenyayushchikhsya v kachestve konstruktivnykh materialov. *Nauch.-tekh. konf. molodykh spetsialistov po yadernym energeticheskim ustanovkam*. OKB Gidropress. Podol'sk, March 16–17. 2011 (in Russ.).
- [10] Satin A.A., Vasil'chenko I.N., Kushmanov S.A., Puzanov D.N. Rezul'taty issledovaniya vliyaniya skorosti radiatsionnoy polzuchesti tsirkonievyykh splavov na termomekhanicheskoe povedenie TVS i prochnost' ee elementov. *X Ross. konf. po reaktornomu materialovedeniyu. Sb. dokladov*. Dimitrovgrad, OAO GNTs NIIAR, 2013, pp. 335–347 (in Russ.).

Kovaleva V.A. — student, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

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