

АНАЛИЗ ЖЕСТКОСТИ КАССЕТ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ РЕАКТОРА ВВЭР-440

Е.Н. Азарова

evgelinna@yandex.ru

SPIN-код: 5250-4408

Т.В. Крупнова

krupnova2011@gmail.com

SPIN-код: 6379-6509

Р.Д. Стрелкова

79057248874@yandex.ru

SPIN-код: 3803-9560

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

Аннотация

В целях увеличения длительности топливной кампании за счет экономии нейтронов была осуществлена модернизация топливных кассет реактора ВВЭР-440, которая заключалась в переходе на бесчехловую уголковую активную зону. Однако разработчики, внедряющие подобную конструкцию для тепловыделяющих сборок реакторов большой мощности ВВЭР-1000, столкнулись с проблемой увеличения прогибов тепловыделяющихборок, что привело к затруднениям при извлеченииборок и вводе в реактор регулирующих органов системы управления и защиты. В статье проведен анализ влияния на прогиб различных вариантов каркаса жесткости кассеты с использованием программного комплекса ANSYS APDL v 17.0 и даны рекомендации по модернизации конструкции реактора.

Ключевые слова

Выгоревшая кассета, жесткость, несущие трубы, прогиб, радиация, тепловыделяющая сборка, чехол, ширина уголка

Поступила в редакцию 09.10.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. Для повышения длительности топливной кампании в водо-водяных энергетических реакторах (ВВЭР) за счет экономии нейтронов обычно уменьшают содержание конструкционных материалов в активной зоне реактора [1–3]. В частности, с этим был связан отказ от чехла и использования аустенитной стали для изготовления каркаса жесткости тепловыделяющей сборки (ТВС), что естественным образом приводило к снижению жесткости ТВС при его продольно-поперечном изгибе. Особенно заметно эта проблема проявилась при внедрении усовершенствованных тепловыделяющихборок (УТВС) для реакторов ВВЭР-1000, когда прогиб размером до 30 мм стал причиной увеличения сил, затрачиваемых на извлечение ТВС из активной зоны, а также способствовал увеличению времени падения (и застревания) поглощающих элементов системы и управления (СУЗ).

В силу особенностей конструкции рабочие кассеты ВВЭР-440 не нагружены весом блока защитных труб, однако на них все равно действует продольная нагрузка от пружинного блока (шесть пружин по углам головки, которые

предотвращают всплытие кассеты во всех режимах работы, а также компенсируют температурные и радиационные удлинения). Кроме того, на рабочую кассету действуют соседние кассеты, имеющие незначительный начальный прогиб (для ТВС реакторов ВВЭР большой мощности оно может достигать 2 мм). Наличие жесткого шестигранного чехла позволяло свести к минимуму эффекты от термомеханического нагружения рабочих и автоматических регулирующих компенсирующих кассет. С отказом от чехла возможно возникновение искривления (прогиба) кассет, препятствующего нормальной работе органов регулирования и аварийной защиты.

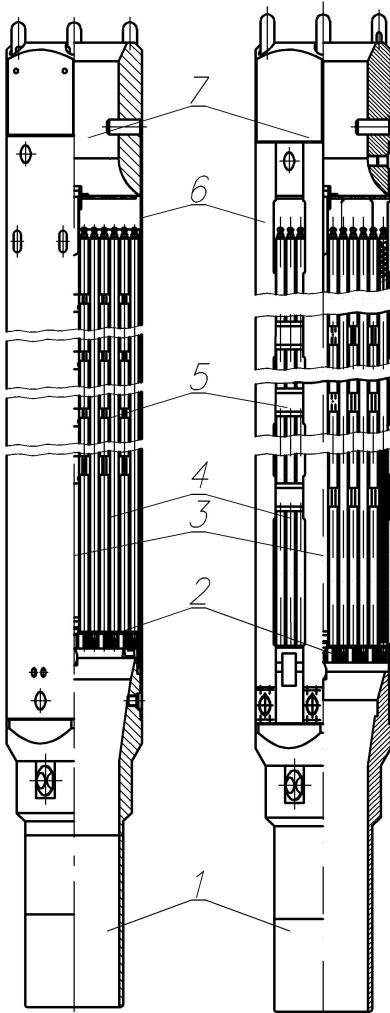


Рис. 1. Общий вид рабочей кассеты ВВЭР-440?

- 1 — хвостовик; 2 — нижняя опорная решетка; 3 — центральная труба; 4 — пучок твэлов и твэггов; 5 — дистанционирующие решетки; 6 — шестигранный чехол; 7 — головка

В статье приведены результаты исследования влияния на продольно-поперечную жесткость рабочей кассеты реактора ВВЭР-440 материала и конструктивных элементов, из которых выполнен каркас кассеты. Исследование выполнено с помощью аттестованного программного комплекса Ansys Mechanical v 17 (номер лицензии 339001) [4].

Описание конструкции рассматриваемых рабочих кассет ВВЭР-440. Рабочая кассета (рис. 1) состоит из хвостовика с фиксатором 1, нижней опорной решетки 2, центральной трубы 3, пучка 4 тепловыделяющих элементов (твэлов) и тепловыделяющих элементов с гадолинием (твэггов), дистанционирующих решеток (ДР) 5, шестигранного чехла 6 или системы несущих труб и уголков и головки 7 [3].

Рабочая кассета с помощью хвостовика 1 установлена в корзину реактора, к которому через уголки приварена нижняя опорная решетка 2, предназначенная для крепления твэлов и твэггов. Центральная труба 3 служит как для введения датчиков внутриреакторного контроля, так и для крепления на ней дистанционирующих решеток 5. Последние предназначены для дистанционирования пучка 4.

Несущим элементом рабочей кассеты является либо шестигранный чехол 6, либо система из шести уголков и нескольких несущих труб, которые посредством винтов крепятся к хвостовику и головке 7.

Головка 7 содержит шесть подпружиненных упоров, удерживающих рабочую топливную сборку от всплытия и служащих компенсаторами тепловых расширений и технологических допусков внутрикорпусных устройств реактора.

Используемые в работе допущения и упрощения. В основу разрабатываемой в данной работе конечно-элементной (КЭ) модели пучка положены следующие допущения и упрощения, принятые с учетом результатов предыдущих опытов моделирования [5, 6]:

- не учитываются изменение механических свойств материалов кассеты и неравномерность их распределения вследствие воздействия тепловых потоков, потоков ионизирующих излучений и т. п.;
- исключена возможность проскальзывания твэла в ячейках ДР;
- не учитывается депланация ДР;
- не учитываются возможные геометрические отклонения закрепления головки или хвостовика в гнезде;
- каждый твэл моделируют стержневым конечным элементом с распределенными параметрами (балочный элемент);
- со стороны головки и хвостовика ТВС твэл считают шарнирно опертым;
- дистанционирующие решетки имитируют связкой элементов, составляющих ТВС (твэлы, чехол, центральная труба), т. е. принимают, что эти элементы имеют одинаковые перемещения в местах контакта.

Для моделирования пучка твэлов в программном комплексе выбран КЭ BEAM188 [7]. Для моделирования чехла (уголков) использован элемент SOLID185 [7]. Предварительные исследования показали, что для получения реального прогиба кассет необходимо моделирование чехла (уголков), твэлов и несущих труб. Допустимо не моделировать топливные таблетки в целях обеспечения консервативности расчета. Материалом для оболочек твэлов и дистанционирующих решеток (если не указано иное) служит циркониевый сплав Э-110 [8, 9]. Варианты исследованных конструкций показаны на рис. 2.

При эксплуатации в реакторе на ТВС действуют различные термомеханические нагрузки, в результате которых в условиях ползучести и радиационного роста конструкционных материалов возникает прогрессирующее формоизменение ТВС [10]. В рамках данного анализа рассмотрены только продольные нагрузки P_z , возникающие от пружинного блока (компенсация нагрузок от восходящего потока теплоносителя, архимедовой силы, температурных и радиационных удлинений), и поперечные нагрузки P_x от возможного воздействия на кассету соседних искривленных ТВС (рис. 3). Исследовано влияние материала каркаса, вида каркаса (уголки, чехол, приварка к центральной трубе), толщины и ширины уголков, числа и расположения несущих труб на продольно-поперечную жесткость кассеты.

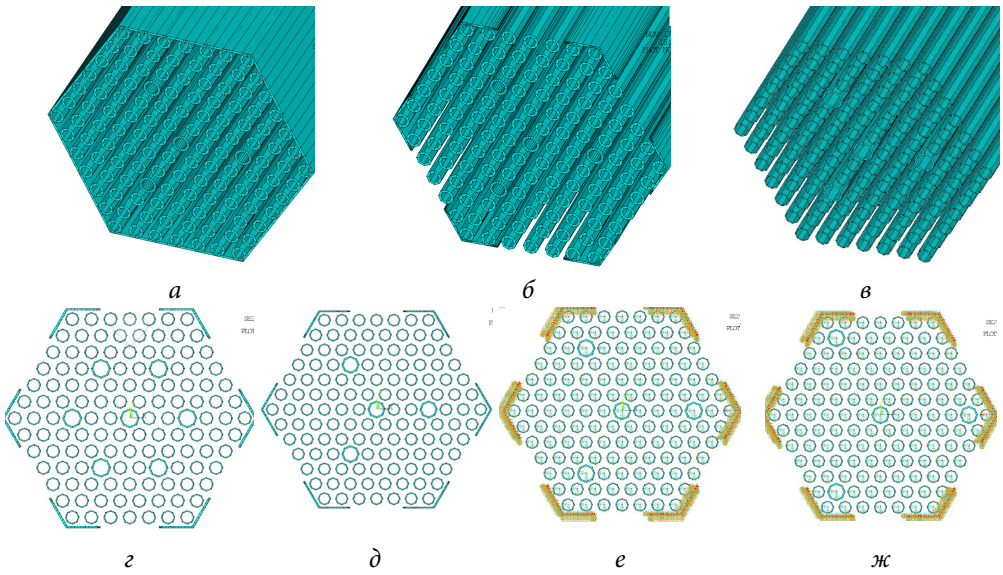


Рис. 2. Модели исследованных вариантов конструкции каркаса кассеты:

а — чехловой; *б* — уголкоый; *в* — без чехла и уголков; *г* — уголкоый с шестью несущими труба-ми; *д* — уголкоый с тремя несущими трубами в третьем ряду; *е* — уголкоый с тремя несущими трубами в четвертом ряду; *ж* — уголкоый с тремя несущими трубами в пятом ряду

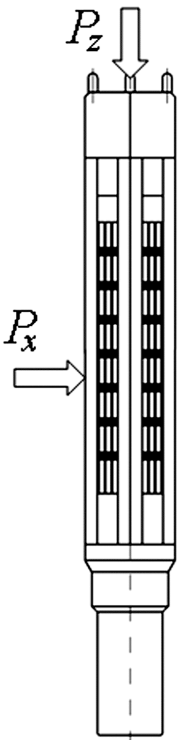


Рис. 3. Схема прило-жения нагрузок P_x и P_z

Аналитическое описание эксперимента. При воз-действии вдоль оси призматического стержня лишь продольных сил они будут вызывать в стержне растяги-вающие или сжимающие напряжения. Но если кроме продольных сил к стержню приложена также попереч-ная нагрузка, искривляющая его ось, то явление будет более сложным, поскольку на изгиб стержня будут вли-ять не только поперечные, но и продольные силы. Эта зависимость вызываемых продольными силами дефор-маций от наличия поперечной нагрузки исключает воз-можность применения к продольным силам принципа сложения действия сил и тем самым усложняет решение поставленной задачи, имеющей весьма большое техни-ческое значение. В работе рассмотрен наиболее про-стейший случай (рис. 4).

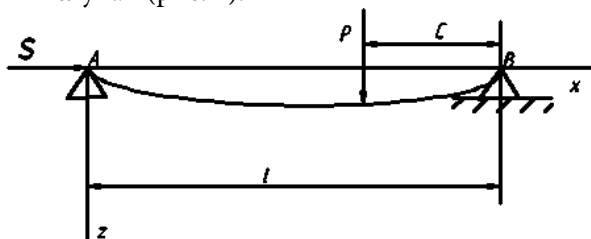


Рис. 4. Схема приложения сил

Исходя из основного дифференциального уравнения для изогнутой оси стержня, запишем уравнения для левой и правой частей балки в следующем виде:

$$EJ \frac{d^2 z}{dx^2} = -Sz - \frac{Pc}{l} x; \quad EJ \frac{d^2 z}{dx^2} = -Sz - \frac{P(l-c)}{l} (l-x), \quad (1)$$

где E — модуль Юнга; J — момент инерции стержня; x, z — осевые координаты; S — продольная сила; P — поперечная сила; c — расстояние от опоры B до точки приложения силы P ; l — расстояние между опорами.

Введя для краткости обозначение $\frac{S}{EJ} = k^2$, представим общие интегралы уравнений (1) так:

$$\begin{aligned} z &= A \cos kx + B \sin kx - \frac{Pc}{l} x; \\ z &= A_1 \cos kx + B_1 \sin kx - \frac{P}{Sl} (l-c)(l-x). \end{aligned} \quad (2)$$

Из условия, что прогибы балки на концах равны нулю, находим взаимосвязь между константами уравнений (2):

$$A = 0; \quad A_1 = -B_1 \operatorname{tg} kl.$$

Два недостающих уравнения для определения произвольных постоянных запишем, приняв во внимание условия равенства прогибов и углов наклона касательных для обоих участков упругой линии в точке приложения силы:

$$\begin{aligned} B \sin k(l-c) &= B_1 [\sin k(l-c) - \operatorname{tg} kl \cos k(l-c)]; \\ Bk \cos k(l-c) &= B_1 k [\cos k(l-c) - \operatorname{tg} kl \sin k(l-c)] + \frac{P}{S}, \end{aligned}$$

откуда

$$B = \frac{P \sin kc}{Sk \sin kl}; \quad B_1 = \frac{P \sin k(l-c)}{Sk \operatorname{tg} kl}.$$

Таким образом, для левой части балки

$$\begin{aligned} z &= \frac{P \sin kc}{Sk \sin kl} \sin kx - \frac{Pc}{l} x; \\ z' &= \frac{P \sin kc}{S \sin kl} \cos kx - \frac{Pc}{Sl}; \\ z'' &= -\frac{P \sin kc}{S \sin kl} \sin kx. \end{aligned} \quad (3)$$

В полученные выражения (3) поперечная сила P входит линейно. Продольная сила S входит в эти уравнения более сложным образом, поскольку величина

k , являющаяся аргументом функций синуса и косинуса, зависит от S . При увеличении силы P в несколько раз во столько же раз увеличится и прогиб, однако при увеличении продольной силы S прогибы не будут увеличиваться пропорционально ей. Из вида уравнений (3) следует, что при воздействии на балку двух сил прогиб, вызываемый этими двумя силами, может быть получен сложением прогибов [11].

В научной работе смоделирована тепловыделяющая сборка с полным (126 шт.) количеством твэлов, которые были условно скреплены. Поэтому всю кассету можно рассматривать как единый стержень, не теряя при этом точности расчета.

Основные результаты исследования. При увеличении ширины уголков с 21,5 до 23,0 мм (на 6,5 %) прогиб уменьшился на 5,8 % для свежей и выгоревшей кассет, при этом в случае использования чехла прогиб составил бы 21 % прогиба кассеты с уголками шириной 21,5 мм (рис. 5).

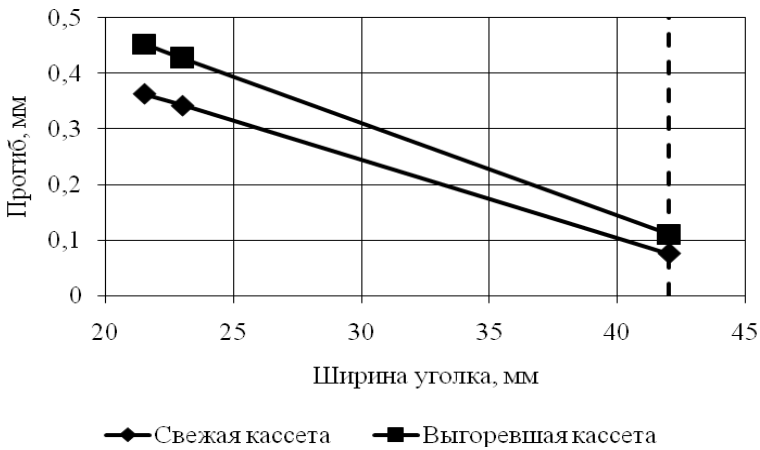


Рис. 5. Зависимость прогиба кассеты от ширины уголка (штриховой линией показана ширина, соответствующая замкнутому шестигранному чехлу)

При увеличении числа несущих труб с 3 до 6 прогиб уменьшился на 2 % (рис. 6). В случае отказа от несущих труб он составил бы 0,349 мм.

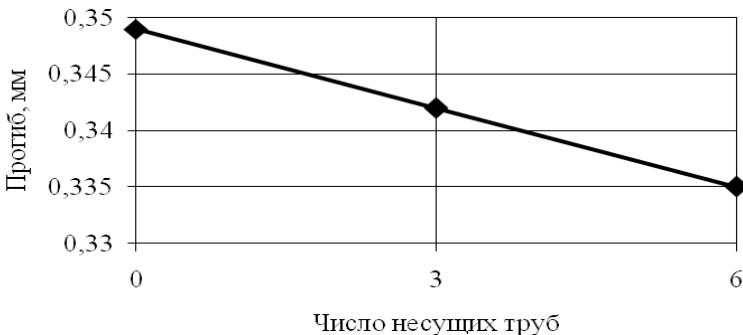


Рис. 6. Зависимость прогиба кассеты от числа несущих труб

При расположении трех несущих труб в 3-, 4- и 5-м рядах прогиб уменьшился менее чем на 0,5 % (рис. 7).

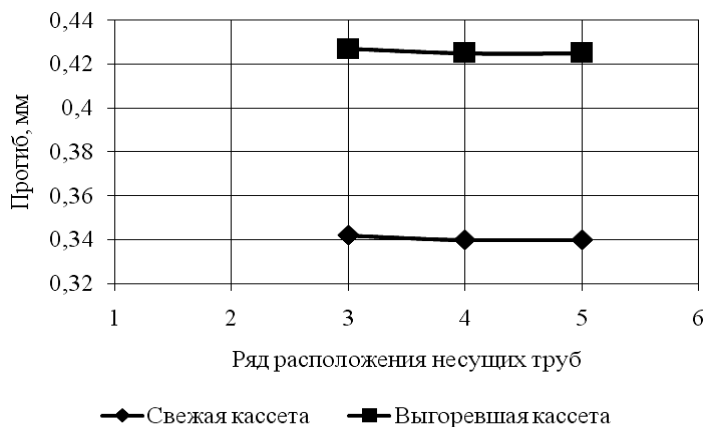


Рис. 7. Зависимость прогиба кассеты от ряда расположения несущих труб

При использовании в качестве материала для изготовления несущих труб сплавов Э110 и Э635 начальный прогиб соответствовал 0,34 мм, но после учета радиационной ползучести в конце прогиб при использовании сплава Э110 был на 1,1 % выше.

Заключение. Полученные результаты показывают, что отказ от чехла в рабочих кассетах снижает жесткость ТВС на 80 %, но при этом почти на 50 % уменьшает содержание циркония в активной зоне. Увеличение ширины и толщины уголков и числа несущих труб способствует повышению жесткости не более чем на 6 %. Замена в каркасе сплава Э110 сплавом Э635 позволит повысить жесткость кассеты не более чем на 1,1 %.

Хотя в относительных единицах повышение жесткости с помощью увеличения числа несущих труб и ширины уголков намного меньше потери жесткости в результате отказа от применения чехла, абсолютная величина прогиба 0,45 мм для выгоревших кассет намного меньше проектного межкассетного зазора 2 мм, а следовательно, она не повлияет на безопасность эксплуатации реактора ВВЭР-440.

Литература

- [1] Колобаев А.В. Состояние и перспективы развития топливных кассет ВВЭР-440 // Российско-чешско-словацкий семинар «Опыт изготовления, эксплуатации и перспективы совершенствования топлива и топливных циклов АЭС с реакторами типа ВВЭР-440». Чехия, Брно, июнь 2013 г. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/st-2013/documents/157.pdf> (дата обращения 12.09.2017).
- [2] Бессалов Г.Г., Денисов В.П., Драгунов Ю.Г., Мельников Н.Ф. *Реакторы ВВЭР для АЭС средней мощности*. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 208 с.

- [3] Шмелев В.Д., Драгунов Ю.Г., Денисов В.П., Васильченко И.В. *Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций*. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 220 с.
- [4] ANSYS Mechanical User's Guide. Release 17.0. ANSYS, Inc. 2016. 1832 p.
- [5] Хвостов М.С. Разработка конечно-элементной модели тепловыделяющей сборки третьего поколения реактора ВВЭР-440 для обоснования прочности при сейсмических нагрузках // *Физика и техника реакторов*. 2010. № 1. С. 26–32.
- [6] Балакирев А.А. Разработка конечно-элементной модели тепловыделяющей сборки реактора ВВЭР-440 // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2012. № 6 (6). С. 34. URL: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/256.html> DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-256.
- [7] Басов К.А. ANSYS. Справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2014. 639 с.
- [8] Тимошенко С.П. *Курс теории упругости*. Киев, Наукова думка, 1972. 508 с.
- [9] Сатин А.А., Пузанов Д.Н. Анализ и обобщение данных по свойствам циркониевых сплавов, применяющихся в качестве конструкционных материалов // *Сб. докл. Науч.-техн. конф. молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам. ОКБ «Гидропресс». Подольск, 16–17 марта, 2011 г.* URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2011/documents/kms2011-013.pdf> (дата обращения 01.09.2017).
- [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 // *Сб. докл. X Российская конференция по реакторному материаловедению. ОАО «ГНЦ НИИАР»*. Дмитровград, 2013. С. 335–347.
- [11] Сатин А.А., Емшанов В.Г. Уточненный алгоритм расчета поджатия тепловыделяющих сборок. *Сб. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам. ОКБ «Гидропресс». Подольск, 16–17 марта 2011 г.* URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2011/documents/kms2011-030.pdf> (дата обращения 01.09.2017).

Азарова Евгения Николаевна — студентка кафедры «Ядерные реакторы и материалы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Крупнова Татьяна Валерьевна — студентка кафедры «Ядерные реакторы и материалы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Стрелкова Регина Денисовна — студентка 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.

RIGIDITY ANALYSIS IN FUEL ASSEMBLIES FOR THE THIRD GENERATION VVER-440 REACTOR

E.N. Azarova

evgelinna@yandex.ru

SPIN-код: 5250-4408

T.V. Krupnova

krupnova2011@gmail.com

SPIN-код: 6379-6509

R.D. Strelkova

79057248874@yandex.ru

SPIN-код: 3803-9560

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

In order to increase fuel lifetime by means of saving neutrons, an upgrade of fuel assemblies for the VVER-440 reactor design took place, which meant switching to a jacket-free angled reactor core. However, the developers introducing this design into fuel assemblies for high-energy VVER-1000 reactors ran into the problem of increased buckling in the fuel assemblies, leading to issues when removing the assemblies and inserting control rods of the control and protection system. Our study used the ANSYS APDL v 17.0 software package to analyse how various designs of a high-rigidity frame for a fuel assembly affect this buckling. The article lists recommendations for upgrading the reactor design.

Keywords

Burned-up assembly, rigidity, bearing tubes, buckling, radiation, fuel assembly, jacket, angle width

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

- [1] Kolobaev A.V. Sostoyanie i perspektivy razvitiya toplivnykh kasset VVER-440. Ros.-chesh.-slovatsk. seminar «Opyt izgotovleniya, ekspluatatsii i perspektivy sovershenstvovaniya topliva i toplivnykh tsiklov AES s reaktorami tipa VVER-440». Chekhiya, Brno, June 2013. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/st-2013/documents/157.pdf> (accessed 12.09.2017).
- [2] Bessalov G.G., Denisov V.P., Dragunov Yu.G., Mel'nikov N.F. Reaktory VVER dlya AES sredney moshchnosti [VVER reactors for medium power NPPs]. Moscow, Akademkniga Publ., 2004. 208 p.
- [3] Shmelev V.D., Dragunov Yu.G., Denisov V.P., Vasil'chenko I.V. Aktivnye zony VVER dlya atomnykh elektrostantsiy [Active VVER zones for nuclear power plants]. Moscow, Akademkniga Publ., 2004. 220 p.
- [4] ANSYS Mechanical User's Guide. Release 17.0. ANSYS, Inc. 2016. 1832 p
- [5] Khvostov M.S. The Working out of the finite-element dynamic model of the third generation fuel assembly of the WVER-440 for the strength prove under seismic impact. Fizika i tekhnika rektorov [Reactor physics and technology], 2010, no.1, pp. 26–32 (in Russ.).
- [6] Balakirev A.A. Development of a finite-element dummy fuel assembly for the WVER-440 reactor. Jelektr. nauchno-tekhn. izd. "Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii" [El. Sc.-Tech. Publ. "Eng. J.: Science and Innovation"], 2012, no. 6 (6), p. 34 (in Russ.). DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-256.

- [7] Basov K.A. ANSYS. Spravochnik pol'zovatelya [ANSYS User's guide]. Moscow, DMK Press, 2014. 639 p.
- [8] Timoshenko S.P. Kurs teorii uprugosti [A course in the theory of elasticity]. Kiev, Nauk. dumka Publ., 1972. 508 p.
- [9] Satin A.A., Puzanov D.N. Analiz i obobshchenie dannykh po svoystvam tsirkonievyykh splavov, primenyayushchikhsya v kachestve konstruksionnykh materialov. Sb. dokl. nauch.-tekhn. konf. molodykh spetsialistov po yadernym energeticheskim ustanovkam. OKB Gidropress, Podol'sk, March 16–17, 2011. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2011/documents/kms2011-013.pdf> (accessed 01.09.2017).
- [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. Sb. dokl. X Ross. konf. po reaktornomu materialovedeniyu. OAO GNTs NIIAR. Dimitrovgrad, 2013, pp. 335–347 (in Russ.).
- [11] Satin A.A., Emshanov V.G. Utochnennyy algoritm rascheta podzhatiya teplovydelyayushchikh sborok. Sb. dokl. Nauch.-tekhn. konf. molodykh spetsialistov po yadernym energeticheskim ustanovkam. OKB Gidropress. Podol'sk, March 16–17, 2011. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2011/documents/kms2011-030.pdf> (accessed 01.09.2017).

Azarova E.N. — student, Department of Nuclear Reactors and Materials, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Krupnova T.V. — student, Department of Nuclear Reactors and Materials, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Strelkova R.D. — student, Department of Nuclear Reactors and Materials, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

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