

А. А. Балакирев

**РАЗРАБОТКА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ
МОДЕЛИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ
РЕАКТОРА ВВЭР-440**

Представлена методика создания конечно-элементной модели пучка тепловыделяющих элементов ТВС реактора ВВЭР-440 с учетом взаимодействия пучка с дистанционирующими решетками для анализа его динамических характеристик. Найдены жесткости ячейки дистанционирующей решетки. С использованием конечно-элементной модели пучка тепловыделяющих элементов, разработанной в среде программного комплекса ANSYS, определены собственные частоты и формы колебаний конструкции в воздухе и воде.

E-mail: balakirev.aa@yandex.ru

Ключевые слова: метод конечных элементов, тепловыделяющая сборка, тепловыделяющий элемент, ANSYS, собственные частоты и формы колебаний, ВВЭР-440.

При исследовании динамики тепловыделяющих сборок (ТВС) ядерных реакторов применяют математические модели различного уровня сложности [1—5]. Несмотря на достижения вычислительной механики в разработке таких моделей, роль эксперимента по-прежнему остается весьма существенной. Во многих случаях даже при тщательном учете мелких деталей не удается достигнуть при расчете таких же результатов, как в эксперименте, и математическую модель ТВС приходится настраивать, опираясь на результаты экспериментов.

В работе исследован пучок тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ) штатной тепловыделяющей сборки реактора ВВЭР-440 в целях создания и настройки конечно-элементной (КЭ) модели пучка ТВЭЛОВ по известным экспериментальным данным (собственным частотам колебания пучка в воздухе и воде). Особое внимание в работе уделено определению жесткостей ячеек дистанционирующих решеток (ДР) как на линейное смещение, так и на поворот из плоскости. Полученная таким образом КЭ-модель может быть в дальнейшем использована для исследования вибраций пучка под действием заданных гидродинамических нагрузок.

Из работы [1] известно, что при разработке моделей пучка ТВЭЛОВ необходимо уделять внимание взаимодействию ДР и оболочек ТВЭЛОВ. Использование для этой цели детальной трехмерной пространственной КЭ-модели с учетом контактного взаимодействия в системе ТВЭЛ — ячейка ДР не рационально ввиду очевидной громоздкости и

ресурсоемкости. В свою очередь, стержневые модели ТВС на основе теории изгиба балки Тимошенко [2] намного проще и эффективнее КЭ-моделей, но стержневые модели не позволяют исследовать эффекты, связанные с движением твэлов относительно друг друга, при колебаниях пучка и многие другие явления.

Таким образом, целесообразно пойти по пути разработки КЭ-модели, которая, с одной стороны, даст возможность изучать движение отдельного твэла в пучке, а с другой — будет учитывать влияние ДР на это движение. В данной работе предлагается методика разработки КЭ-модели пучка твэлов, в которой ДР имитированы сетью упругих стержней, эквивалентной своими жесткостными характеристиками реальной ДР. Замена реальной ДР эквивалентной сетью стержней приводит к удовлетворительным результатам без привлечения значительных вычислительных мощностей.

Несмотря на обилие различных моделей ТВС (стержневые, конечно-элементные и др.), все они недостаточно удовлетворительно описывают контактное взаимодействие в системе твэл — ячейка ДР. Например, в [4] разработана КЭ-модель бесчехловой ТВС третьего поколения для реактора ВВЭР-440 с учетом только линейной жесткости ячейки ДР, в то же время никоим образом не оговорена жесткость ячейки на поворот из плоскости, которая является ключевой (согласно работе [1]). Кроме того, жесткость ячейки вычисляют без учета предварительного ее деформирования от запрессовки твэла.

В основу разрабатываемой в данной работе КЭ-модели пучка положены следующие предположения:

- каждый твэл моделируют стержневым конечным элементом с распределенными параметрами;
- со стороны головки ТВС твэл считают шарнирно опертым, со стороны хвостовика — заделанным;
- ДР имитируют сетью упругих стержней, т. е. принимают, что соседние ячейки ДР соединяются друг с другом одинаковыми упругими связями (фиктивными стержнями). При этом жесткости фиктивных стержней подбирают из решения контактной задачи с заданной реальной геометрией ячейки ДР и твэла.

В разрабатываемой модели ТВС принят ряд упрощений:

- не учитывается влияние теплоносителя как среды, демпфирующей колебания (об учете демпфирования см. работу [3]);
- не учитывается изменение механических свойств материалов кассеты и неравномерность их распределения вследствие воздействия тепловых потоков и потоков ионизирующих излучений и т. п.;
- исключена возможность проскальзывания твэла в ячейках ДР.

Для моделирования пучка твэлов в программном комплексе выбран КЭ ВЕАМ4 — трехмерная упругая балка с 12 степенями свободы. Для упругих связей, имитирующих ДР, использован тот же балочный элемент, но с другими характеристиками. Преимущество данного элемента состоит в том, что матрицы жесткости и масс в нем получают аналитически, т. е. отсутствует необходимость в численном интегрировании. Это обстоятельство помогает уменьшить число элементов в той части модели, где не требуется детальное изучение формы изогнутой оси стержня. Тем самым может быть значительно снижена размерность задачи.

Материалом для оболочек твэлов и дистанционирующих решеток служит циркониевый сплав Zr + 1 % Nb (Э-110), механические характеристики которого приведены ниже [5]:

Модуль упругости, МПа:	
при 20 °С	93 600
при 320 °С	76 200
Коэффициент Пуассона	0,34
Плотность, кг/м ³	6 510

Перед созданием эквивалентной стержневой модели ДР были установлены жесткостные характеристики ячейки: угловая жесткость (при повороте твэла в ячейке из плоскости ДР) и линейная жесткость (при линейном смещении твэла в плоскости ДР). Определение указанных жесткостей сводилось к трем последовательным шагам:

- 1) постановка и решение задачи о посадке ячейки ДР на оболочку (радиальный натяг задавали равным 0,07 мм);
- 2) определение перемещения под действием заданной внешней нагрузки с учетом предварительного напряжения ячейки и оболочки твэла от посадки с натягом;
- 3) вычисление жесткостей как отношения величины приложенной нагрузки к полученным перемещениям характерных узлов системы.

При решении контактной задачи ячейку ДР и оболочку твэла набирали пространственными восьмиузловыми шестигранными элементами SOLID185. Использование трехмерных элементов вместо двумерных оболочечных (например SHELL63) в данном случае позволяет избежать трудностей с локализацией контактных поверхностей, поскольку при использовании оболочечных элементов модель необходимо создавать по срединной поверхности, не являющейся контактной. Для моделирования контактного взаимодействия использована пара взаимосвязанных элементов: CONTA173 (элементы принадлежат поверхности ячейки ДР) и TARGE170 (располагаются на оболочке твэла). В качестве метода решения контактной задачи предпочтительным оказался метод «штрафных» функций [6].

Полученная КЭ-модель, а также одна из контактных пар изображены на рис. 1. С учетом симметрии можно рассматривать только половину ячейки ДР и оболочки твэла. По толщине ячейку и твэл разбивали конечными элементами на три слоя. В непосредственной близости от предполагаемых линий контакта плотность сетки становилась выше, чем в местах, удаленных от них.

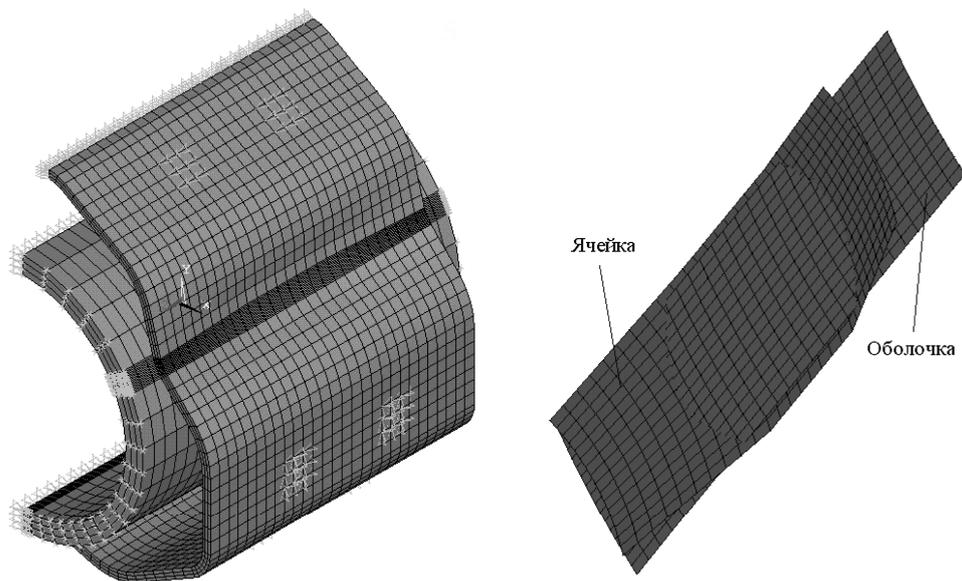


Рис. 1. Конечно-элементная модель ячейки ДР и оболочки твэла. Контактная пара

В целях учета симметрии в модели были запрещены перемещения ячейки и оболочки твэла в направлении, перпендикулярном плоскости симметрии. В местах соединения ячеек между собой контактной сваркой запрещены перемещения узлов по всем направлениям. Очевидно, что последнее предположение в действительности не совсем верно, так как стенки соседних ячеек не являются абсолютно жесткими. В данных условиях такое допущение все же приемлемо, что подтверждается результатами расчета. Для учета взаимного влияния соседних ячеек модуль упругости материала элементов, принадлежащих соединяемым поверхностям, был увеличен в два раза.

В итоге модель включала в себя 11 610 элементов (в том числе 1 344 контактных элементов) и 13 926 узлов, всего 41 778 степеней свободы. Считали, что расчет контактной задачи по условию выполнен успешно, если глубина проникновения неконтактирующих поверхностей не превышала 1 мкм.

Угловую жесткость ячейки определяли путем нагружения торцов оболочки нагрузкой, эквивалентной нагрузке разнонаправленными

силами величиной $F = 0,5$ Н (рис. 2, *а*). С учетом того, что длина участка оболочки составила $h = 12$ мм, величина изгибающего момента $M = Fh = 6$ Н·мм. По результатам расчета перемещений центров каждого из торцов Δ_1 и Δ_2 найдена угловая жесткость ячейки

$$k_M = 2 \frac{Fh^2}{|\Delta_1| + |\Delta_2|}. \quad (1)$$

Линейную жесткость определяли аналогичным образом: торцы нагружали одинаково направленными силами $F = 0,5$ Н (рис. 2, *б*) и вычисляли среднее перемещение центров двух торцов. Отношение суммарной силы $2F$ к этой величине дает линейную жесткость ячейки

$$k_F = \frac{8F}{|\Delta_1| + |\Delta_2|}. \quad (2)$$

Поскольку в расчете использована симметрия и рассматривается только половина ячейки и половина оболочки твэла, то величины в правых частях формул (1) и (2) увеличены вдвое.

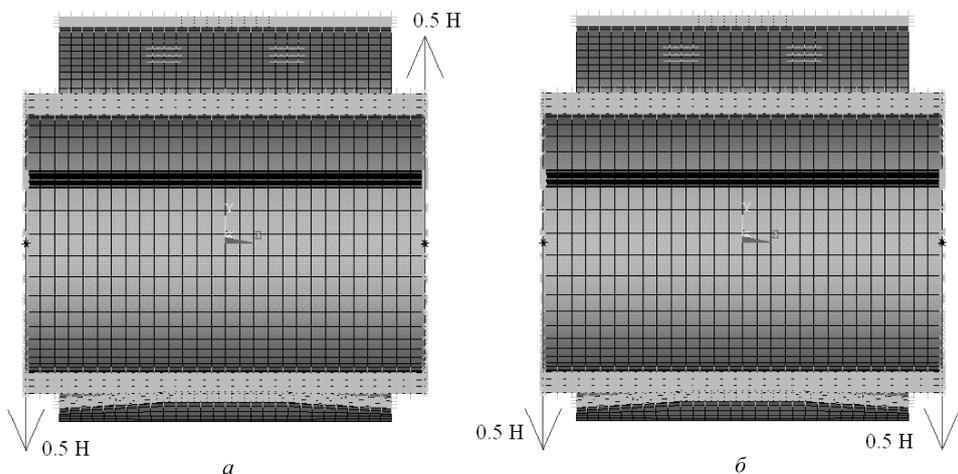


Рис. 2. Схемы для определения жесткостей:

а — угловой; *б* — линейной

Полученная картина изополей радиальных перемещений узлов (мм), представленная на рис. 3, является удовлетворительной, следовательно, перемещения точек в зоне контакта вычислены с достаточной точностью.

Жесткости, рассчитанные по формулам (1) и (2), составили

$$k_M = 10,8 \cdot 10^4 \frac{\text{Н} \cdot \text{мм}}{\text{рад}} \quad \text{и} \quad k_F = 4,8 \cdot 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}.$$

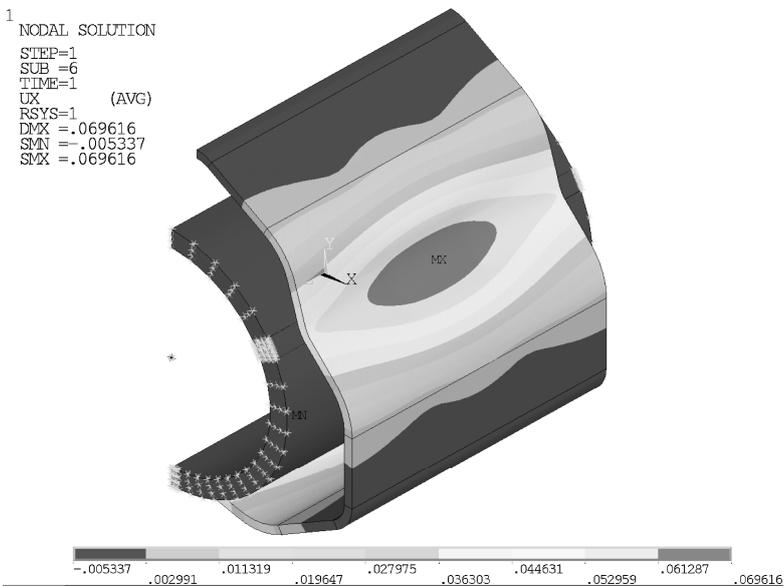


Рис. 3. Изополя радиальных перемещений в задаче посадки

По определенным выше жесткостям разработана эквивалентная стержневая модель ячейки ДР, обладающая такими же жесткостными характеристиками, как и сама ячейка. В качестве эквивалентной стержневой системы выбрана схема, изображенная на рис. 4.

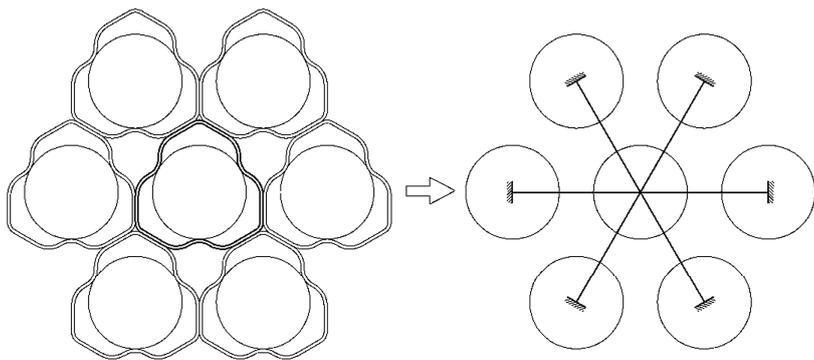


Рис. 4. Эквивалентная стержневая система для одной ячейки ДР

Подбор характеристик поперечных сечений осуществляли в следующем порядке:

1) поперечное сечение приняли такой формы, чтобы соблюдалось равенство $J_y = J_z = J_x/2$;

2) величину момента инерции подобрали таким образом, чтобы при нагружении центрального узла единичным моментом, вектор которого лежит в плоскости рамы, угол поворота составил $1/k_M$;

3) площадь поперечного сечения A подобрали так, чтобы при действии единичной силы, лежащей в плоскости стержней, перемещение центрального узла было равно $1/k_F$.

В результате расчета найдены следующие характеристики поперечного сечения стержней в эквивалентной системе: $A = 0,16 \text{ мм}^2$; $J_y = J_z = 1,2 \text{ мм}^4$; $J_x = 2J_z = 2,4 \text{ мм}^4$.

Объединяя балочные модели для всех ячеек, получили стержневую систему, по жесткости эквивалентную реальной ДР (рис. 5).

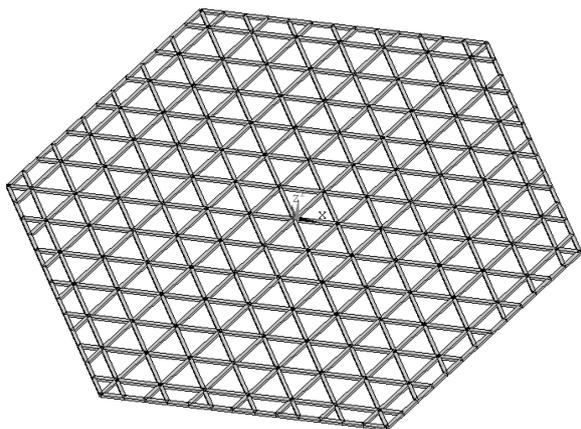


Рис. 5. Эквивалентная стержневая модель ДР

Важно отметить, что периферийные ячейки ДР будут иметь несколько иные жесткостные характеристики по сравнению с полученными выше. Это объясняется прежде всего тем, что у них другая форма, а также наличием обода. Предполагаем, что погрешность, связанная с пренебрежением данным фактом, будет носить характер краевого эффекта и не внесет значительные ошибки в расчет частот и форм пучка твэлов.

Расчетная схема, принятая для стержневой модели пучка твэлов, приведена на рис. 6. Согласно предположению, со стороны опорной решетки хвостовики твэлов жестко заделаны, а с противоположной стороны твэлы можно считать шарнирно опертыми.

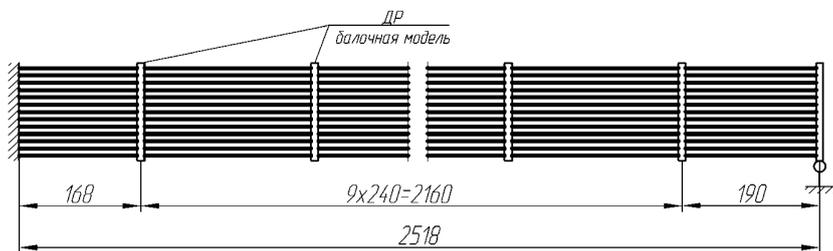


Рис. 6. Расчетная схема для определения частот и форм колебаний пучка твэлов

Характеристики поперечного сечения твэла: $A^{TB} = 17,3 \text{ мм}^2$;
 $J_y^{TB} = 2J_z^{TB} = 155 \text{ мм}^4$; $J_x^{TB} = 2J_y^{TB} = 310 \text{ мм}^4$.

Приведенную плотность материала твэла (трубка с топливом) определяют с учетом загрузки трубки топливом не по всей длине [5]: она складывается из плотности циркония и средней плотности топлива, отнесенной к площади поперечного сечения твэла и его длине:

$$\rho_e = 31\,463 \text{ кг/м}^3.$$

Предполагают, что ДР являются безмассовыми, так как их вклад незначителен по сравнению с массой твэлов.

Полученная КЭ-модель (рис. 7) содержит в себе 19 448 элементов, 14 955 узлов и 89 730 степеней свободы.

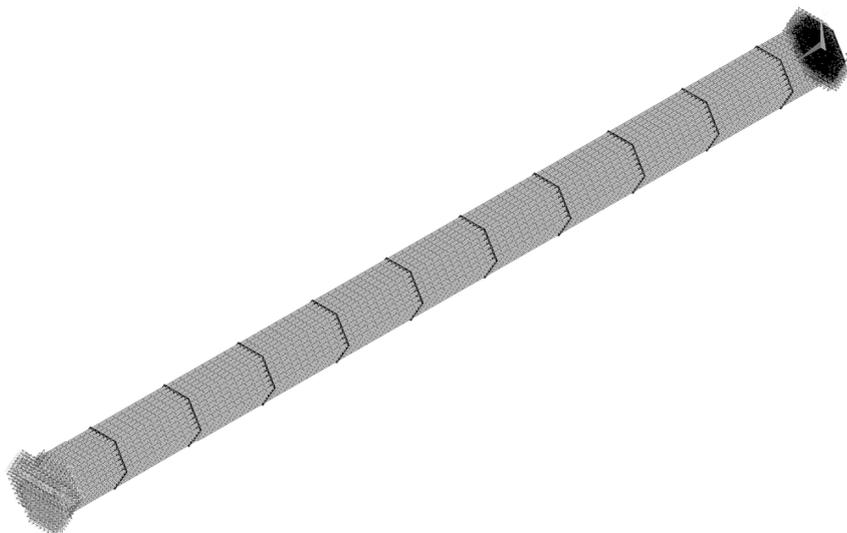


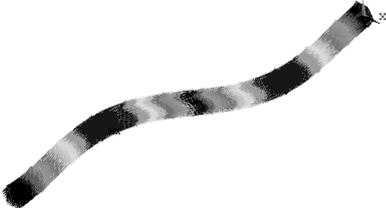
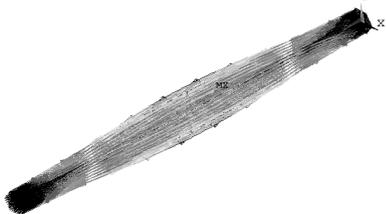
Рис. 7. КЭ-модель пучка твэлов ТВС ВВЭР-440

С помощью встроенных в программный комплекс ANSYS алгоритмов модального анализа рассчитаны первые пять частот и форм колебаний пучка твэлов. В воде коэффициент присоединенной массы жидкости принимали одинаковым для всех твэлов и подбирали таким образом, чтобы низшая частота колебаний равнялась 3,9 Гц (результат экспериментального изучения колебаний пучка твэлов в воде [2]). Коэффициент присоединенной массы для всех твэлов составил $\alpha = 10,7$.

Результаты расчета частот и форм колебаний в воде и воздухе приведены в таблице. Все изгибные формы имеют парные кратные частоты, что соответствует качественно одинаковым колебаниям в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Согласно работе [7],

отсутствие демпфирования воды не может значительно сказаться на частотах колебаний пучка. Важно отметить, что крутильная форма 5 имеет следующую особенность: помимо интенсивного скручивания пучка происходит и характерное его «дыхание», т. е. движение твэлов относительно друг друга в радиальном направлении. Величина радиального смещения твэла тем больше, чем ближе твэл расположен к периферийной области пучка.

Частота и форма колебаний пучка твэлов в воздухе и воде

Номер моды	Частота, Гц		Форма колебаний	Изображение
	в воздухе	в воде		
1	5,89	3,90	Изгибная	
2				
3	13,13	8,70	Изгибная	
4				
5	17,20	11,40	Крутильная	

Выводы

1. По известным из экспериментов частотам изгибных колебаний в воздухе и воде настроена полномасштабная КЭ-модель ТВС реактора ВВЭР-440, в которой учитываются жесткости ячейки ДР на линейное перемещение в плоскости и поворот из плоскости.

2. Получены новые результаты, в частности, формы и частоты крутильных колебаний пучка твэлов. Эти результаты важны в связи с тем, что некоторые экспериментальные данные можно объяснить только наличием кручения пучка.

3. Обнаружен новый эффект «дыхания» пучка при кручении. Данное явление гипотетически может оказаться одной из причин за-

кручивания пучка, т. е. при сжатии пучка гидродинамическими нагрузками ему энергетически выгодно повернуться.

4. Настроенная по результатам эксперимента модель может быть использована для полномасштабного моделирования движения пучка при заданных гидродинамических нагрузках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Троянов В. М. Расчетно-экспериментальное обоснование термомеханики активных зон реакторов типа ВВЭР: дис. ... докт. техн. наук. – Обнинск, 2003. – 237 с.
2. Солонин В.И., Перевезенцев В.В., Сорокин Ф.Д. Нестационарные гидродинамические нагрузки и вибрации пучка твэлов в ТВС ВВЭР-440 // Изв. вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – № 4. – С. 104–112.
3. Солонин В.И., Перевезенцев В.В., Сорокин Ф.Д. Демпфирование колебаний пучка тепловыделяющих элементов водоохлаждаемых реакторов в потоке теплоносителя // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2009. – № 3. – С. 57–65.
4. 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.
5. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций / В.Д. Шмелев, Ю.Г. Драгунов, В.П. Денисов, И.Н. Васильченко. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 220 с.
6. Belytschko T. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. – N.Y.: Wiley, 2000. – 650 p.
7. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. – М.: Высш. шк., 1980. – 408 с.

Статья поступила в редакцию 28.09.2012