

Метод расчета релаксации контактного взаимодействия между тепловыделяющим элементом и ячейкой дистанционирующей решетки

10, октябрь 2013

DOI: 10.7463/1013.0654596

Гусев М. П., Данилов В. Л.

УДК.621

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

gusev.m.p@yandex.ru

vldanilov@mail.ru

Введение

Тепловыделяющие элементы (ТВЭлы) и дистанционирующие решетки (ДР), в узлах которых закреплены ТВЭлы посредством соединения с натягом, являются основными элементами тепловыделяющей сборки (ТВС). Поскольку в активной зоне атомного реактора, которая состоит из набора ТВС, действуют интенсивные температурное и нейтронное поля, то в таких условиях происходит ослабление всех нагруженных компонентов сборки, в том числе происходит ослабление или релаксация контактного взаимодействия между ТВЭлом и ячейкой ДР. Релаксация контактного взаимодействия приводит к снижению контактных сил, действующих между ТВЭлом и ячейкой ДР с течением времени, что, в результате, приводит к проскальзыванию ТВЭла вдоль ячейки ДР. Проскальзывание большого числа ТВЭлов в топливной сборке приводит к недопустимому искривлению и снижению жесткости конструкции ТВС. Недопустимые искривление и снижение жесткости ТВС непосредственно влияют на безопасность и надежность реакторной установки, поэтому решение задачи релаксации контактного взаимодействия является актуальной задачей.

Постановка задачи

В рамках настоящей работы автором была поставлена задача разработки метода расчета релаксации контактного взаимодействия между ТВЭлом и ячейкой ДР, имеющая в себе цель определить зависимость контактной силы между ТВЭлом и ячейкой ДР от времени.

Разработка метода расчета релаксации контактного взаимодействия

Тепловыделяющие элементы представляют собой длинные тонкостенные стержни, в которых расположены таблетки диоксида урана. ТВЭлы объединены в пучок, посредством дистанционирующих решеток рис. 1, [1]. Объединение ТВЭлов в пучок представляет из себя тепловыделяющую сборку, которая является основным элементом активной зоны атомного реактора. Закрепление ТВЭлов в ячейках ДР осуществляется посредством соединений с натягом.

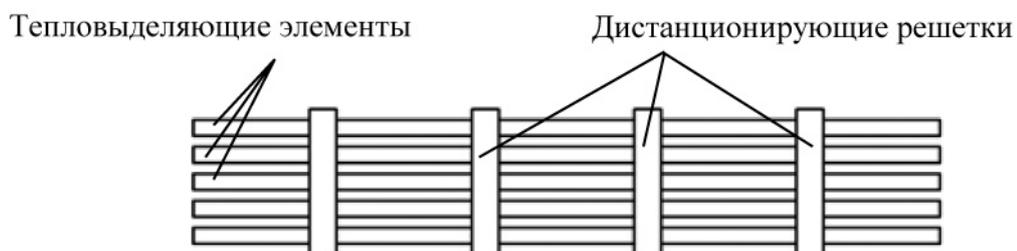


Рис. 1. Пучок тепловыделяющих элементов с дистанционирующими решетками

В результате действия высокой температуры и нейтронного облучения, возникает релаксация контактного взаимодействия между ТВЭлом и ячейкой ДР, рис. 2, [2]. Как уже отмечалось выше, релаксации контактного взаимодействия приводит к проскальзыванию ТВЭла в ячейке ДР. Эти явления снижают жесткость конструкции ТВС и приводят к недопустимому деформированию сборки [3].

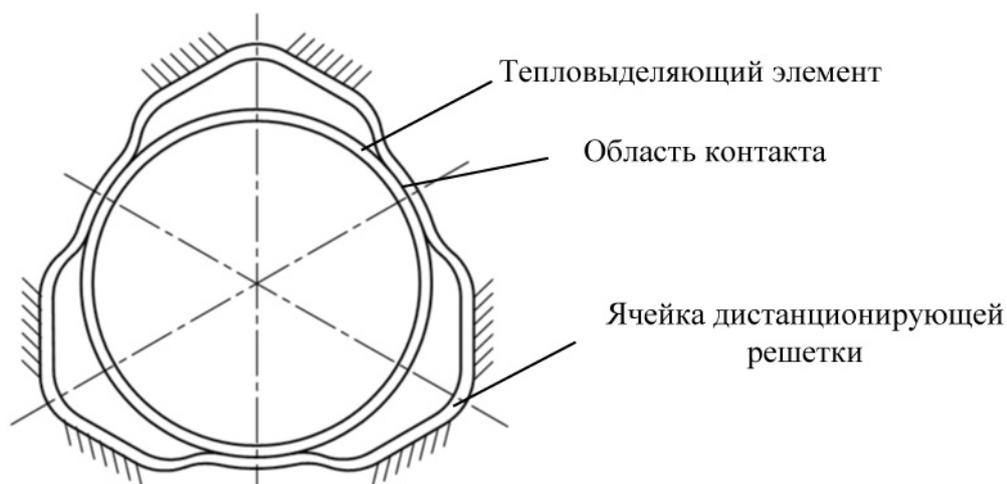


Рис. 2. Схема соединения тепловыделяющего элемента и ячейки дистанционирующей решетки

Разработка метода расчета релаксации контактного взаимодействия между ТВЭлом и ячейкой ДР требуется для оценки ресурса работоспособности ТВЭла и всей топливной сборки.

В настоящем исследовании рассматривается метод решения задачи релаксации контактного взаимодействия на основе метода конечных элементов и альтернирующего метода Шварца, [4, 5].

Метод решения задачи релаксации контактного взаимодействия состоит из следующих этапов.

На первом этапе создаются отдельные конечно-элементные модели оболочки ТВЭла и ячейки ДР. На втором этапе решается контактная задача взаимодействия оболочки ТВЭла и ячейки ДР, [4]. На третьем этапе для каждого конечного элемента двух тел рассчитывается вектор напряжений $\{\sigma_{\alpha,i-1}\}^e$, где индекс $\alpha = 1, 2$ означает принадлежность вектора напряжений к ячейке ДР или к оболочке ТВЭла, индекс i означает шаг по времени и e - принадлежность конкретному конечному элементу.

На четвертом этапе по формуле

$$\{\dot{\varepsilon}_{\alpha,i-1}^c\}^e = B\{\sigma_{\alpha,i-1}^n\}^e,$$

где $\{\dot{\varepsilon}_{\alpha,i-1}^c\}^e$ - вектор скорости деформаций ползучести для конечного элемента, B, n - экспериментальные коэффициенты, определяется вектор скоростей деформаций ползучести на промежутке времени $t_i - t_{i-1}$. Далее определяются деформации ползучести на текущем шаге по времени, на основе явной схемы Эйлера:

$$\{\varepsilon_{\alpha,i}^c\}^e = \{\varepsilon_{\alpha,i-1}^c\}^e + (t_i - t_{i-1})\{\dot{\varepsilon}_{\alpha,i-1}^c\}^e,$$

где $\{\varepsilon_{\alpha,i}^c\}^e$, $\{\varepsilon_{\alpha,i-1}^c\}^e$ - вектор деформаций ползучести на текущем шаге i и на предыдущем шаге $i - 1$.

На пятом этапе формируется вектор узловых сил $\{F_{\alpha,i}^c\}^e$ для каждого конечного элемента двух тел, эквивалентный действию деформаций ползучести $\{\varepsilon_{\alpha,i}^c\}^e$ по формуле

$$\{F_{\alpha,i}^c\}^e = \int_{V^e} [B^e]^T [D^e] \{\varepsilon_{\alpha,i}^c\}^e dV^e,$$

где $[B^e]$ - матрица связи деформаций с узловыми перемещениями, $[D^e]$ - матрица упругих постоянных и V^e - объем конечного элемента.

На шестом этапе составляется глобальный вектор узловых сил $\{F_{\alpha,i}^c\}$, эквивалентный действию деформаций ползучести $\{\varepsilon_{\alpha,i}^c\}$. Формируется суммарный глобальный вектор узловых сил $\{F_{\alpha,i}^\Sigma\}$, учитывающий приложенную нагрузку $\{F_{\alpha,i}\}$ и вектор $\{F_{\alpha,i}^c\}$.

$$\{F_{\alpha,i}^\Sigma\} = \{F_{\alpha,i}\} + \{F_{\alpha,i}^c\}.$$

На седьмом этапе решается контактная задача взаимодействия двух тел, где в качестве внешней нагрузки уже выступает суммарный глобальный вектор узловых сил $\{F_{\alpha,i}^\Sigma\}$. На основе решения контактной задачи определяются контактные усилия $\{F_{\alpha,i}^{cont}\}$ для каждого из контактирующих тел.

Далее последовательно в цикле повторяются этапы решения со второго по шестой и цикл продолжается до тех пор, пока время $t_i \leq t_{\max}$.

В результате решения задачи в каждый момент времени t_i определены контактные усилия $\{F_{\alpha,i}^{cont}\}$. На рис. 3. приведем решение задачи релаксации контактного взаимодействия при температуре 313°C и при плотности потока нейтронов $1,73 \cdot 10^{18} \text{ н} / \text{м}^2\text{с}$.

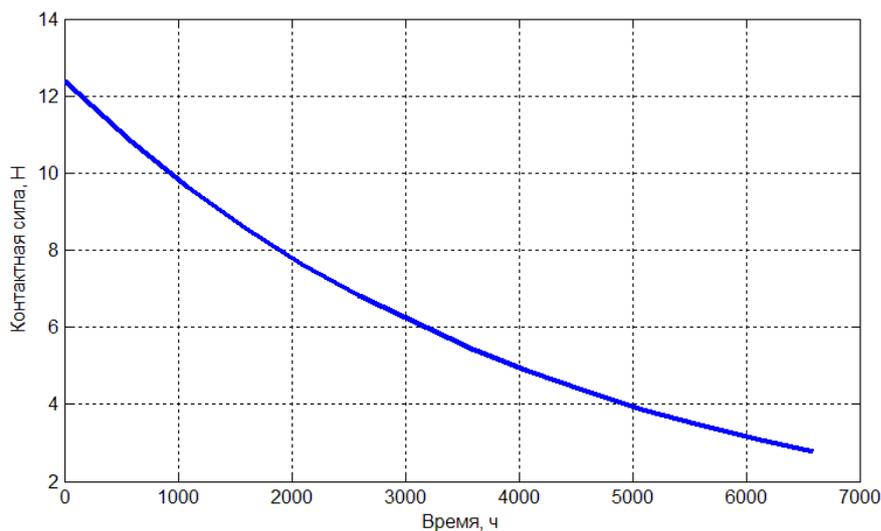


Рис. 3. Релаксация контактной силы между ТВЭлом и ячейкой ДР для одной области контакта

Проскальзывание ТВЭла в ячейке ДР возникает в момент времени t_s , когда силы трения в области контакта становятся меньше продольной внешней силы, действующей на ТВЭл.

Однако проскальзывание единичного ТВЭла в ячейке ДР не является признаком полной потери работоспособности всей топливной сборки. Полная потеря работоспособности наступает тогда, когда количество ТВЭлов, подвергнутых проскальзыванию, превышает предельно допустимое значение для топливной сборки и жесткость ТВС становится ниже критической. Время, при котором происходит проскальзывание критического количества ТВЭлов, является одной из оценок ресурса работы ТВС.

Выводы

1. Разработан метод расчета релаксации контактного взаимодействия на основе метода конечных элементов и альтернирующего метода Шварца.
2. Предложен метод определения времени проскальзывания единичного ТВЭла в ячейке дистанционирующей решетки, на основе расчета релаксации контактного взаимодействия.
3. Предложен критерий потери работоспособности топливной сборки, который заключается в определении времени проскальзывания критического количества ТВЭлов в узлах дистанционирующих решеток.

Список литературы

- 1) Семишкин В.П. Расчётно-экспериментальные методы обоснования поведения твэлов и ТВС ВВЭР в аварийных режимах с большой течью из первого контура РУ: дис. ... докт. техн. наук. Подольск, 2007. 360 с.
- 2) Троянов В.М. Расчетно-экспериментальное обоснование термомеханики активных зон реакторов типа ВВЭР: дис. ... докт. техн. наук. Обнинск, 2003. 237 с.
- 3) Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. 191 p.

4) Станкевич И.В., Яковлев М. Е., Си Ту Хтет. Разработка алгоритма контактного взаимодействия на основе альтернирующего метода Шварца // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2011. Спец. вып. “Прикладная математика”. С. 134-141.

5) Станкевич И.В., Яковлев М.Е., Си Ту Хтет. Математическое моделирование контактного взаимодействия упругопластических сред // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 4. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/353180.html> (дата обращения 26.11.2013).

Method of relaxation analysis of contact interaction between a fuel element and a cell of a spacer grid

10, October 2013

DOI: 10.7463/1013.0654596

Gusev M.P., Danilov V.L.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

gusev.m.p@yandex.ru

vldanilov@mail.ru

Development of a method for calculating relaxation of a contact between a fuel element and a spacer grid cell is a necessary condition for solving complex deformation problems of fuel assembly under intensive temperature and neutron fields. Due to relaxation of contact interaction the fuel element can slide in the spacer grid cell; this results in decreasing stiffness of overall assembly and its deformation. A method for calculating relaxation of contact interaction between a fuel element and a spacer grid cell based on the finite element method and the Schwarz alternating method was proposed in this work. Calculation of relaxation with the use of the proposed method will allow to estimate operation time of a fuel element till its sliding, and also to determine the disability criterion of fuel assembly.

Publications with keywords: [FEM](#), [fuel element](#), [the contact interaction relaxation](#), [fuel assembly](#), [spacer grid](#)

Publications with words: [FEM](#), [fuel element](#), [the contact interaction relaxation](#), [fuel assembly](#), [spacer grid](#)

References

1. Semishkin V.P. *Raschetno-eksperimental'nye metody obosnovaniya povedeniya tvelov i TVS VVER v avariynykh rezhimakh s bol'shoy tech'yu iz pervogo kontura RU. Dokt. diss.* [Calculation and experimental methods of justification of behavior of fuel rods and fuel assemblies of WWER in emergency mode with big leak from the primary circuit of reactor plant. Dr. diss.]. Podol'sk, 2007. 360 p.
2. Troyanov V.M. *Raschetno-eksperimental'noe obosnovanie termomekhaniki aktivnykh zon reaktorov tipa VVER. Dokt. diss.* [Calculation and experimental justification of thermomechanics of active zones of WWER reactors. Dr. diss.]. Obninsk, 2003. 237 p.

3. *Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2010. 191 p.
4. Stankevich I.V., Yakovlev M. E., Si Tu Khtet. Razrabotka algoritma kontaktnogo vzaimodeystviya na osnove al'terniruyushchego metoda Shvartsa [Development of algorithm of contact interaction on the basis of Schwarz alternating method]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Natural science], 2011, Spec. iss. "Prikladnaya matematika" ["Applied mathematics"], pp. 134-141.
5. Stankevich I.V., Yakovlev M.E., Si Tu Khtet. Matematicheskoe modelirovanie kontaktnogo vzaimodeystviya uprugoplasticheskikh sred [Mathematical simulation of contact interaction of elasto-plastic environments]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2012, no. 4. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/353180.html> , accessed 26.11.2013.