

АТОМНОЕ РЕАКТОРОСТРОЕНИЕ, МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.039

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПОЛНОЙ РЕЛАКСАЦИИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ОБОЛОЧКОЙ ТВЭЛА И УПРУГИМ ЭЛЕМЕНТОМ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩЕЙ РЕШЕТКИ В ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКЕ РЕАКТОРА ВВЭР

М.П. Гусев, В.Л. Данилов, В.Ю. Яковлев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: gusev.m.p@yandex.ru; vldanilov@mail.ru; donvladimir23@mail.ru

Тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) и дистанционирующие решетки являются основными элементами тепловыделяющей сборки ядерного реактора. В дистанционирующих решетках ТВЭЛы закреплены посредством соединения с натягом. Поскольку в активной зоне ядерного реактора действуют интенсивные температурное и нейтронные поля, происходит ослабление всех нагруженных соединений в сборке, в том числе уменьшаются контактные силы между ТВЭЛом и ячейкой дистанционирующей решетки или релаксация контактного взаимодействия. Рассмотрена релаксация контактного взаимодействия только за счет температурных эффектов. Релаксация контактного взаимодействия приводит к проскальзыванию ТВЭЛов в ячейке дистанционирующей решетки. Определение времени проскальзывания и решение задачи релаксации являются актуальными задачами, поскольку проскальзывание ТВЭЛов приводит к интенсивному процессу фреттинг-износа оболочки ТВЭЛА, а также к снижению жесткости конструкции тепловыделяющей сборки и, как следствие, к снижению безопасности и надежности реакторной установки.

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка, релаксация контактных сил, тепловыделяющий элемент, дистанционирующая решетка.

DETERMINING TIME OF THE COMPLETE RELAXATION OF CONTACT INTERACTION BETWEEN THE FUEL CLAD AND THE ELASTIC SPACER GRID CELL IN WWER FUEL ASSEMBLY

M.P. Gusev, V.L. Danilov, V.Yu. Yakovlev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: gusev.m.p@yandex.ru; vldanilov@mail.ru; donvladimir23@mail.ru

Fuel rods and spacer grids are the main elements of the power reactor fuel assembly. The fuel rods are fixed inside the spacer grid cells with negative allowance. Negative allowance produces contact forces between the fuel rod and the spacer grid cell. Contact forces are reduced to zero during the fuel assembly's operating because there are high temperature and intense neutron fields in the power reactor core. Reducing contact forces is the relaxation of contact interaction. The relaxation of contact interaction only due to temperature effects is considered. The relaxation

causes slippage between the fuel rod and the spacer grid cell. Slippage time determination and finding solution to the problem of relaxation are urgent because slippage of the fuel rods causes the intensive process of fuel clad fretting wear, as well as the reduction of fuel assembly stiffness.

Keywords: fuel assembly, contact force relaxation, fuel rod, spacer grid.

Постановка задачи. Решение задачи релаксации контактного взаимодействия и определение времени проскальзывания тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) в ячейках дистанционирующих решеток (ДР) выполнялись поэтапно. На первом этапе выполнен расчет зависимости контактных сил между ТВЭЛОМ и ячейкой ДР от времени и температуры и определено напряженно-деформированное состояние взаимодействующих элементов. На втором этапе — верификация расчетов посредством сравнения расчетных и экспериментальных данных по релаксации контактного взаимодействия. На третьем этапе проведен расчет времени проскальзывания ТВЭЛА. Для решения поставленных задач построена геометрическая модель взаимодействия ТВЭЛА и ячейки ДР (рис. 1). Геометрическая модель импортировалась из САД системы Solid Works в конечно-элементный комплекс Ansys 15, где проводились основные вычисления.

Как следует из рис. 1, ТВЭЛ взаимодействует с ячейкой ДР по трем контактными областям. Контактные силы в области взаимодействия элементов в начальный момент времени максимальны и не позволяют ТВЭЛУ проскальзывать вдоль ячейки ДР, однако в процессе работы реакторной установки происходит ослабление контактных сил и возникает проскальзывание ТВЭЛОВ в ячейках ДР. Проскальзывание ТВЭЛОВ приводит к интенсивному процессу фреттинг-износа оболочки ТВЭЛА, а также снижает жесткость конструкции ТВС, поэтому расчет релаксации контактных сил между ТВЭЛАМИ и ячейками ДР необходим для определения времени проскальзывания ТВЭЛА.

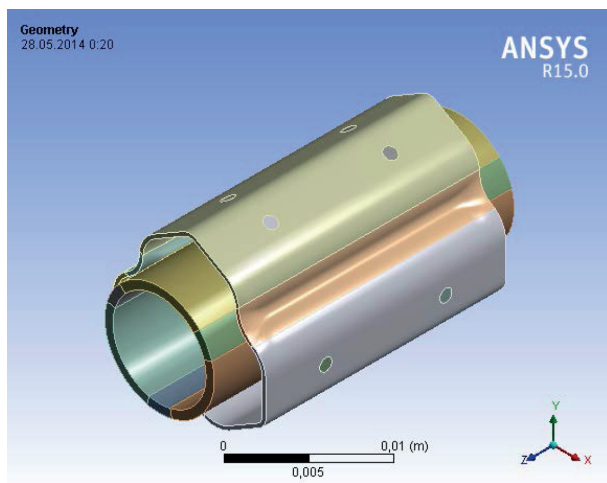


Рис. 1. Геометрическая модель тепловыделяющего элемента и ячейки ДР

Решение контактной задачи с ползучестью в комплексе Ansys 15 основано на следующих базовых конечно-элементных соотношениях:

$$[K] \{\delta\} - \{F\} = 0, \quad (1)$$

где $[K]$ — матрица жесткости ансамбля; $\{\delta\}$ — вектор узловых перемещений; $\{F\}$ — вектор узловых сил, обусловленный внешними нагрузками, начальными напряжениями и деформациями.

Соотношение (1) является уравнением метода конечных элементов для линейной теории упругости. Вывод этого соотношения основан на линейной связи между напряжениями и деформациями:

$$\{\sigma\} = [D] (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) + \{\sigma_0\}, \quad (2)$$

где $\{\sigma\}$, $\{\sigma_0\}$ — векторы текущих и начальных напряжений в модели; $\{\varepsilon\}$, $\{\varepsilon_0\}$ — векторы текущих и начальных деформаций в модели; $[D]$ — матрица упругих постоянных.

При решении задач ползучести, для которых справедлива нелинейная связь между напряжениями и деформациями, следует изменить только соотношение (2). В этом случае связь между напряжениями и деформациями можно записать в общем виде следующим образом:

$$F(\{\sigma\}, \{\varepsilon\}) = 0. \quad (3)$$

Решение уравнения (1) для нелинейных задач ползучести можно получить в случае подбора таких параметров $[D]$, $\{\varepsilon_0\}$ и $\{\sigma_0\}$, при которых уравнения (2) и (3) будут удовлетворяться при одинаковых значениях напряжений и деформаций.

Очевидно, что определение неизвестных параметров $[D]$, $\{\varepsilon_0\}$ и $\{\sigma_0\}$ целесообразно выполнять посредством итерационной процедуры.

При решении задач установившейся ползучести выполнение соотношения (2) обеспечивается подбором начальных деформаций $\{\varepsilon_0\}$, поскольку соотношение (3) записывается для приращений деформаций ползучести

$$\Delta \{\varepsilon_c\} = \frac{d}{dt} \{\varepsilon_c\} \Delta t, \quad \text{где} \quad \frac{d}{dt} \{\varepsilon_c\} = \frac{d}{dt} \{\varepsilon\} = f(\{\sigma\}, T). \quad (4)$$

Решение основных уравнений в комплексе Ansys 15 осуществляется методом Ньютона – Рафсона [1].

При решении задач ползучести важным также является выбор соотношения (4) для скорости деформаций ползучести. Для термомеханических расчетов элементов активной зоны реакторной установки чаще всего используется соотношение ползучести в форме Ф. Нортона [2]:

$$\dot{\varepsilon}_e^c = C_1 \sigma_e^{C_2} \exp\left(-\frac{C_3}{T}\right),$$

где $\dot{\epsilon}_e^c$ — скорость деформаций ползучести; $\sigma_e^{C_2}$ — эквивалентное напряжение; T — температура; C_1, C_2, C_3 — экспериментальные постоянные.

Экспериментальные постоянные для циркониевого сплава Zr1Nb [3]:

$$C_1 = 1,97 \cdot 10^9, \quad C_2 = 1,1, \quad C_3 = 4,5 \cdot 10^4.$$

Термомеханический расчет релаксации контактного взаимодействия твэлов и ячеек ДР требует знаний характеристик материала, из которого изготовлены эти элементы тепловыделяющих сборок (ТВС). В ТВС-2М как твэлы, так и ДР изготовлены из циркониевого сплава Zr1Nb [4]. Важным расчетным параметром является температура. В рамках настоящего исследования расчеты взаимодействия твэла и ячейки ДР при испытаниях на релаксацию контактного взаимодействия [5] выполнялись при температуре 500 °С, а 320 °С — это температура в активной зоне реакторной установки. Механические характеристики циркониевого сплава Zr1Nb для исследуемых температур, используемые в расчете, следующие [6]:

Модуль упругости при 20 °С, МПа	93600
Модуль упругости при 320 °С, МПа	76200
Коэффициент Пуассона	0,34
Плотность, кг/м ³	6510

В рамках расчета контактного взаимодействия твэла и ячейки ДР проводилось исследование влияния различных условий (температуры и давления внутри твэла) на развитие деформаций ползучести, напряжения и на контактные силы в областях соприкосновения твэла и ячейки ДР. Реализовано три варианта расчета, в каждом из которых натяг между ячейкой ДР и твэлом задавался равным 0,12 мм [6].

В первом расчете параметры нагружения модели были следующими: нагрев до $T = 500$ °С в течение 27 мин; выдержка в течение 7 ч 54 мин при температуре $T = 500$ °С; охлаждение модели до температуры $T = 20$ °С проводилось в течение 3 ч 9 мин. Параметры расчета были идентичны условиям натурального эксперимента на релаксацию контактного взаимодействия между твэлом и ячейкой ДР и расчет проводился в целях сравнения с экспериментом [5].

Во втором расчете параметры нагружения были идентичны параметрам в первом расчете, но добавилось внутреннее давление 2 МПа, имитирующее давление гелия и газообразных продуктов деления внутри твэла [7]. В результате расчета оценивали влияние давления на развитие деформаций ползучести и напряжение в области контакта.

В третьем варианте расчета параметры нагружения были близки к реальным нагрузкам, действующим при эксплуатации ТВС: давление внутри твэла 2 МПа, температура $T = 320$ °С. Цель расчета — определение времени полной релаксации контактного взаимодействия, при котором произойдет проскальзывание твэлов.

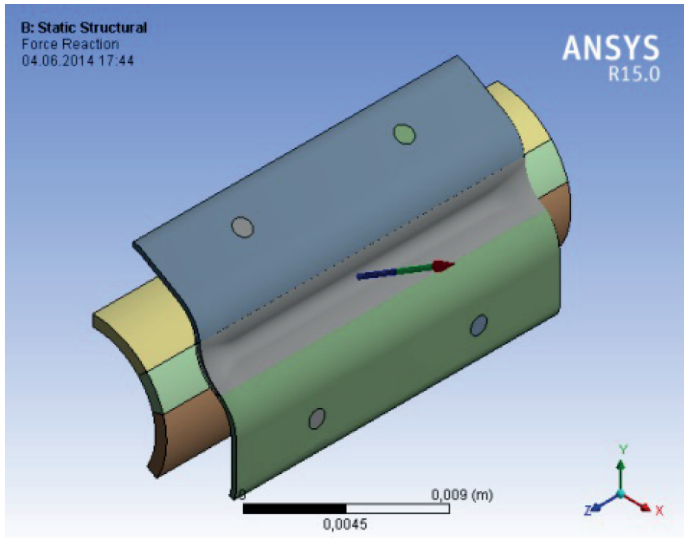


Рис. 2. Векторное представление интегральной силы в контакте

Результаты расчетов. Решение первой поставленной задачи было выполнено с использованием третьей части геометрической модели для снижения числа степеней свободы задачи (рис. 2). Контактную силу в области взаимодействия твэла и ячейки ДР определяли как интеграл по площади от контактного давления. Векторное изображение интегральной контактной силы приведено на рис. 2. Зависимость интегральной контактной силы от времени приведена на рис. 3.

Из графика на рис. 3 следует, что исходная контактная сила уменьшилась в 3,6 раза за 8 ч (28 800 с). Релаксация контактной силы во времени (см. рис. 3) согласуется с результатами, полученными авторами [8]. Влияние нагрева и охлаждения на контактную силу незначитель-

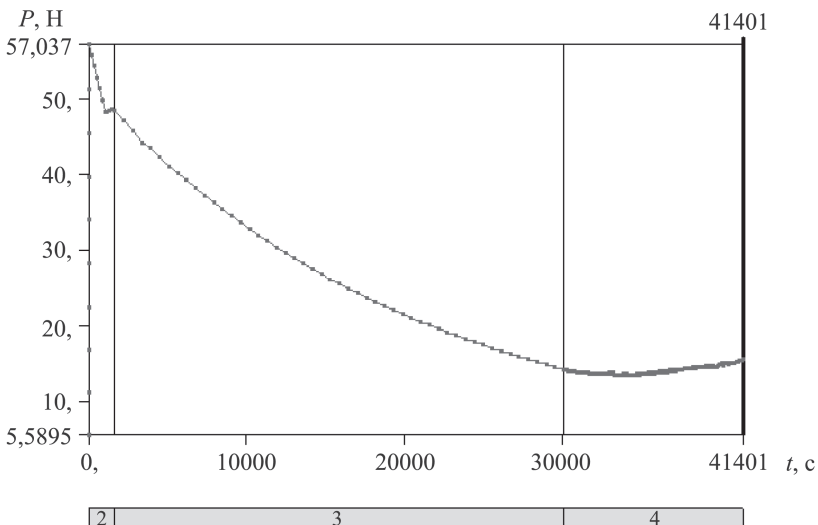


Рис. 3. Изменение интегральной силы в контакте во времени

но. В табл. 1 приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений релаксации контактной силы [5].

Таблица 1

Сравнение расчетного и экспериментального значений релаксации контактной силы

	Исходная контактная сила, Н	Конечная контактная сила — сила после релаксации, Н	Погрешность эксперимента по отношению к расчету, %
Расчет	57	15,5	
Эксперимент	57,7	19,1	6,31

В процессе решения первой задачи были определены зависимости деформации ползучести и напряжения от времени для точек контакта с наибольшим напряжением и деформацией ползучести, соответственно (рис. 4 и 5).

Из графика на рис. 4 следует, что максимальное значение накопленной деформации ползучести составляет $3,06 \cdot 10^{-3}$ и накопление деформаций ползучести во временной области нагрева и охлаждения пренебрежимо мало.

На рис. 5 видно, что напряжение существенно меняется во время нагрева и охлаждения, однако интегральная контактная сила в этих же областях изменяется незначительно, что следует из рис. 3.

Распределение эквивалентных напряжений и деформаций ползучести в области контакта в конечный момент времени приведено на рис. 6.

Из рис. 6 следует, что максимальные деформации ползучести возникают в краевых частях контактной области в отличие от макси-

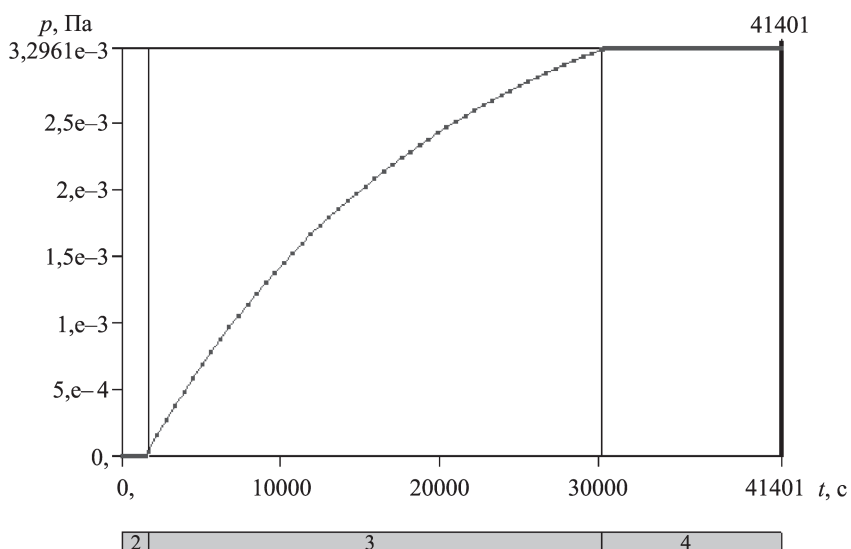


Рис. 4. Накопление максимальных деформаций ползучести во времени

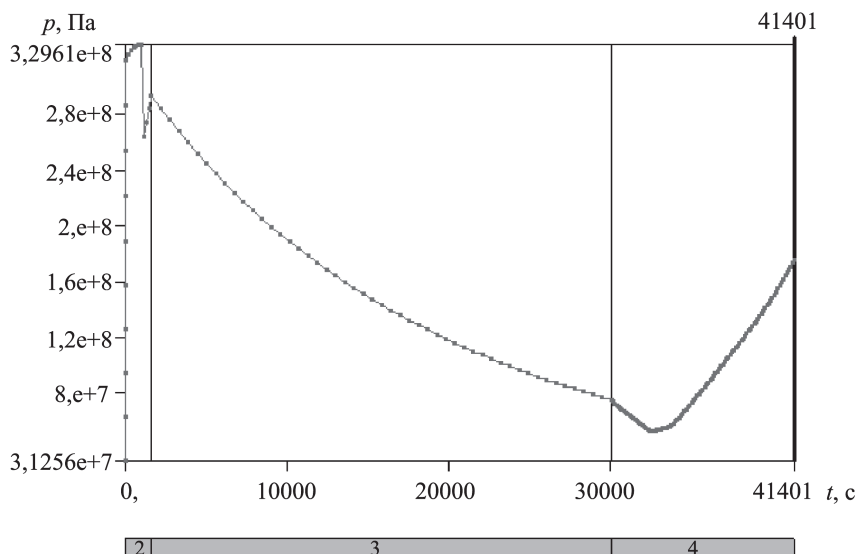


Рис. 5. Изменение максимальных напряжений во времени

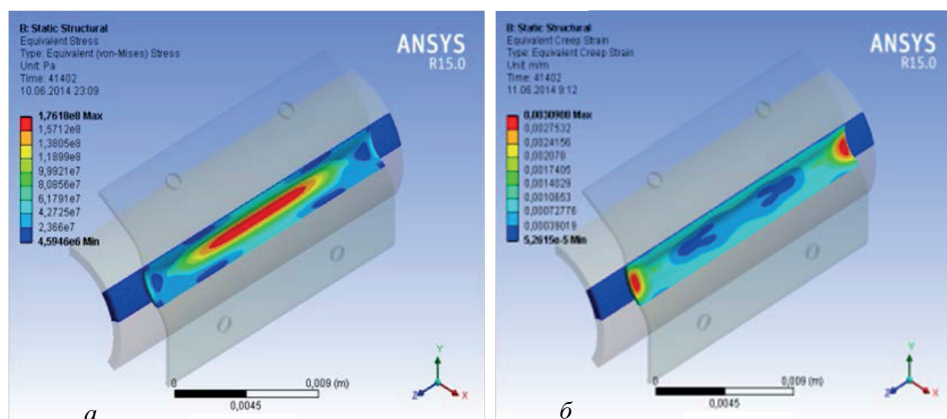


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений (а) и деформаций ползучести в конечный момент времени (б)

мальных эквивалентных напряжений, локализованных в центральной части контактной области.

Результаты второго варианта расчета с введением давления 2 МПа, действующего внутри твэла, несущественно отличаются от результатов расчета по первому варианту (без давления). В табл. 2 приведены сравнительные параметры двух расчетов.

Расчет по третьему варианту проводился с целью определить время проскальзывания твэла — важную характеристику эксплуатации ТВС, которая влияет на изменение жесткости конструкции сборки во времени. Условия расчета были максимально приближены к реальным условиям эксплуатации ТВС: температура 320 °С и давление, действующее внутри твэла, равно 2 МПа.

Сравнение результатов расчетов без учета и с учетом внутреннего давления, действующего на твэл

	Интегральное усилие после релаксации, Н	Общая деформация	Деформация ползучести	Максимальное эквивалентное напряжение, МПа
Без учета внутреннего давления	15,5	$6,62 \cdot 10^{-2}$	$3,06 \cdot 10^{-3}$	175
С учетом внутреннего давления $p = 2$ МПа	15,8	$6,73 \cdot 10^{-2}$	$3,09 \cdot 10^{-3}$	176

График релаксации контактной силы во времени — результат третьего варианта расчета — приведен на рис. 7, из которого следует, что полная релаксация контактной силы произойдет через $6,3 \cdot 10^6$ с (приблизительно 1660 ч), что меньше, чем длительность топливной кампании (приблизительно 13140 ч, [4]), т.е. в процессе эксплуатации происходит проскальзывание твэлов, что может снижать жесткость конструкции ТВС.

Выводы. 1. В результате проведенных исследований на основе математического моделирования установлено существенное изменение во времени контактного давления, что подтверждается сравнениями с экспериментами авторов [5].

2. Учет влияния давления, действующего внутри твэла и равного 2 МПа, показал незначительное его влияние на напряженно-деформированное состояние взаимодействующих элементов: твэла и ячейки ДР.

3. При расчете времени полной релаксации контактного взаимодействия выявлено, что время проскальзывания твэла составляет при-

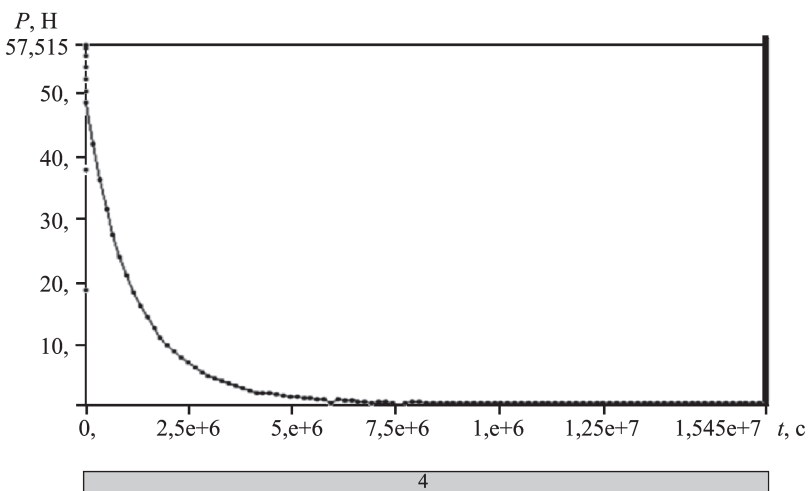


Рис. 7. Релаксация контактной силы при условиях, приближенных к условиям эксплуатации ТВС

близительно 1660 ч, что меньше длительности топливной кампании, поэтому в процессе эксплуатации ТВС снижение жесткости конструкции может происходить за счет проскальзывания твэлов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-08-3170814_мол_а

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зинкевич О.* Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 343 с.
2. *The applicability of Norton's creep power law and its modified version to a single-crystal superalloy type CMSX-2 / O. Golan, A. Arbel, D. Eliezer, D. Moreno // Materials Science and Engineering A216.* 1996. P. 125–130.
3. *Троянов В.М.* Расчетно-экспериментальное обоснование термомеханики активных зон реакторов типа ВВЭР. Дисс. . . д-ра техн. наук. Обнинск, 2003. 237 с.
4. *Драгунов Ю.Г., Рыжов С.Б., Васильченко И.Н., Кобелев С.Н.* Разработка и внедрение ТВС-2М для перспективных топливных циклов // *Атомная энергия.* 2005. Т. 99. С. 432–437.
5. *Гусев М.П., Данилов В.Л.* Экспериментальное исследование релаксации контактного взаимодействия тепловыделяющего элемента и ячейки дистанционирующей решетки // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение.* 2014. № 10. С. 64–69.
6. *Пузанов Д.Н., Сатин А.А.* Анализ и обобщение данных по свойствам циркониевых сплавов, применяющихся в качестве конструкционных материалов // *Науч.-техн. конф. молодых специалистов: Материалы конф. ОКБ "Гидропресс", 16–17 марта 2011 г., URL: http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2011/documents/kms2011-013.pdf (дата обращения 20.05.2014).*
7. *Семшикин В.П.* Расчетно-экспериментальные методы обоснования поведения твэлов и ТВС ВВЭР в аварийных режимах с большой течью из первого контура РУ. Дисс. . . д-ра техн. наук. Подольск, 2007. 360 с.
8. *Gusev M.P., Danilov V.L.* Creep inverse problem of the power reactor fuel assembly elements contact interaction // *Applied Mechanics and Materials.* 2015. Vol. 698. P. 643–648. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.698.643

REFERENCES

- [1] Zinkevich O. Metod konechnykh elementov v tekhnike [Finite-element method in engineering]. Moscow, Mir Publ., 1975. 343 p.
- [2] Golan O., Arbel A., Eliezer D., Moreno D. The applicability of Norton's creep power law and its modified version to a single-crystal superalloy type CMSX-2. *Materials Science and Engineering*, 1996, A216, pp. 125–130.
- [3] Troyanov V.M. Raschetno-eksperimental'noe obosnovanie termomekhaniki aktivnykh zon reaktorov tipa VVER. Diss. dokt. tekhn. nauk [Calculated experimental justification of thermomechanics of the nuclear reactor core in terms of pressurized water type reactor. Dr. tehn. sci. diss.]. Obninsk, 2003. 237 p.
- [4] Dragunov Yu.G., Ryzhov S.B., Vasil'chenko I.N., Kobelev S.N. [Development and application of TVC-2M for future fuel cycles]. *Atomnaya energiya*, 2005, vol. 99, pp. 432–437 (in Russ.).
- [5] Gusev M.P., Danilov V.L. Experimental study of contact interaction relaxation of a fuel element and a spacer grid cell. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Mashinost.* [Proc. Univ., Mech. Eng.], 2014, no. 10, pp. 64–69 (in Russ.).

- [6] Puzanov D.N. Satin A.A. Data analysis and collation according to zirconium alloy properties being used as engineering structural materials. *Sci. and Tech. Conf. of Young Professionals: Conf. Proc. OKB "Gidropress"*, March 16–17, 2011. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2011/documents/kms2011-013.pdf> (accessed 20.05.2014).
- [7] Semishkin V.P. Raschetno-eksperimental'nye metody obosnovaniya povedeniya tvelov i TVS VVER v avariynykh rezhimakh s bol'shoi tech'yu iz pervogo kontura RU. Diss. dokt. tekhn. nauk [Calculated experimental methods for validating the behavior of nuclear fuel elements and a fuel-rod array of the pressurized water type reactor in emergency operations with a large break in the primary coolant circuit of the reactor unit equipment. Dr. tehn. sci. diss.]. Podol'sk, 2007. 360 p.
- [8] Gusev M.P., Danilov V.L. Creep inverse problem of the power reactor fuel assembly elements contact interaction. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 643–648. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.698.643

Статья поступила в редакцию 23.12.2014

Гусев Михаил Павлович — аспирант кафедры “Прикладная механика” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Gusev M.P. — Ph.D. student, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Данилов Владимир Львович — профессор кафедры “Прикладная механика” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Danilov V.L. — D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Applied Mechanics.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Яковлев Владимир Юрьевич — выпускник кафедры “Прикладная механика” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Yakovlev V.Yu. — graduated from Bauman Moscow State Technical University, Department of Applied Mechanics.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гусев М.П., Данилов В.Л., Яковлев В.Ю. Определение времени полной релаксации контактного взаимодействия между оболочкой твэла и упругим элементом дистанционирующей решетки в тепловыделяющей сборке реактора ВВЭР // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 5. С. 62–71.

Please cite this article in English as:

Gusev M.P., Danilov V.L., Yakovlev V.Yu. Determining time of the complete relaxation of contact interaction between the fuel clad and the elastic spacer grid cell in WVER fuel assembly. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 5, pp. 62–71.