

УДК 621.039.54: 539.3

# Экспериментальное исследование релаксации контактного взаимодействия тепловыделяющего элемента и ячейки дистанционирующей решетки\*

**М.П. Гусев, В.Л. Данилов**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

## Experimental study of the contact interaction relaxation between fuel elements and spacer grid cells

**M.P. Gusev, V.L. Danilov**

Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.



e-mail: gusev.m.p@yandex.ru, vldanilov@mail.ru



Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ) и дистанционирующая решетка (ДР) являются частями тепловыделяющей сборки (ТВС) атомного реактора. Тепловыделяющие элементы установлены в ячейках ДР с натягом и при эксплуатации атомного реактора с течением времени происходит релаксация контактных усилий между ТВЭЛами и ячейками ДР, что приводит к проскальзыванию ТВЭЛа в ячейке ДР, а это, в свою очередь, снижает жесткость конструкции ТВС. Однако в настоящее время процесс релаксации контактного взаимодействия до конца не изучен, что вносит неопределенность в анализ деформирования сборки с течением времени в процессе эксплуатации реактора. В статье представлены результаты экспериментального исследования релаксации контактного взаимодействия ТВЭЛов в ячейках ДР. Результаты исследования свидетельствуют о наличии интенсивных процессов релаксации контактных усилий в паре ТВЭЛ — ячейка ДР и их взаимосвязи с величинами температуры и начального натяга.

**Ключевые слова:** тепловыделяющий элемент, дистанционирующая решетка, релаксация контактного взаимодействия, тепловыделяющая сборка.



Fuel elements and spacer grids are parts of the fuel assembly in nuclear reactors. The fuel elements are inserted in spacer grid cells with interference. During the operation of a nuclear reactor, the contact forces between the fuel rods and spacer grid cells decrease, which leads to the slippage of fuel rods in the cells, and this in turn reduces the rigidity of the fuel assembly. Since the contact interaction relaxation process is not currently fully understood, the assembly deformation cannot be adequately analyzed during the reactor operation. This article presents the results of experimental studies of the contact interaction relaxation of the fuel elements in spacer grid cells. The experiments showed that the contact force relaxation in a fuel element – spacer grid cell pair is significant and depends on its temperature and initial interference.

**Keywords:** fuel element, spacer grid, contact interaction relaxation, fuel assembly.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №14-08-3170814\_мол\_а.

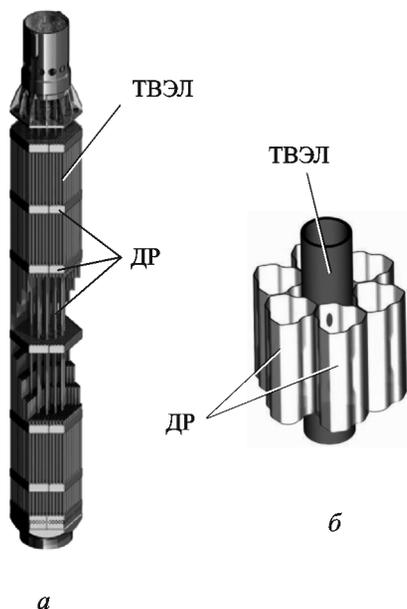


Рис. 1. Конструкция ТВС:

а — элементы ТВС; б — соединение ТВЭЛ — ячейка ДР

Основными элементами тепловыделяющей сборки (ТВС) являются тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы), в которых происходит энерговыделение. В сборке ТВЭЛы собраны в пучок и скреплены вместе посредством дистанционирующих решеток (ДР), расположенных с определенным шагом по всей длине сборки (рис. 1).

Важный показатель нормальной эксплуатации сборки — степень ее искривления. Искривление ТВС не должно превышать проектное значение в любой момент времени в процессе эксплуатации. Искривление сборки тем меньше, чем больше жесткость конструкции ТВС. Жесткость конструкции ТВС придают сварные соединения ДР и направляющих каналов, количество которых в ТВС последнего поколения равно 18 [1], и ТВЭЛы, посаженные с натягом в ячейках ДР, количество которых в сборке составляет 312.

Условия работы атомного реактора таковы, что под действием высокой температуры и нейтронного облучения происходит ослабление

всех нагруженных соединений в сборке вследствие развития необратимых деформаций ползучести. В этих условиях возникает релаксация контактных взаимодействий между ТВЭЛами и ячейками ДР. Процессы релаксации контактных сил в соединении ТВЭЛ — ячейка ДР приводят к проскальзыванию ТВЭЛов в ТВС, что снижает жесткость конструкции сборки. Однако в настоящее время процессы релаксации контактного взаимодействия до конца не изучены и в литературе вопрос релаксации контактного взаимодействия рассмотрен только в некоторых расчетных исследованиях [2, 3]. Экспериментальные исследования, посвященные вопросу релаксации контактного взаимодействия, ранее не проводились.

Цель работы — анализ и обобщение результатов экспериментального исследования релаксации контактного взаимодействия в паре ТВЭЛ — ячейка ДР.

Экспериментальные исследования состояли из двух серий. В каждой серии испытанию подвергались три запрессовки ТВЭЛ — ячейка ДР, изготовленные из циркониевого сплава Э110 (рис. 2).

В первой серии исследовалась релаксация контактных сил в одиночном ТВЭЛе, запрессованном в ячейку ДР, во второй серии — для группы из семи ТВЭЛов, запрессованных в вырезанную часть ДР. Осредненные внешний и внутренний диаметры всех ТВЭЛов до выдержки в печи составляли 9,156 и 7,604 мм.

Для определения релаксации контактных сил каждый образец проходил следующие операции:

1) запрессовка ТВЭЛа в ячейку ДР на испытательной машине Zwick Z100 (рис. 3, а). Определение силы запрессовки в зависимости от перемещения;

2) выдержка запрессовки в печи при определенной температуре, заданном времени и в различных средах на испытательных машинах АТS и Zwick Z050 (рис. 3, б, в);

3) распрессовка ТВЭЛа из ячейки ДР на испытательной машине Zwick Z100. Определе-

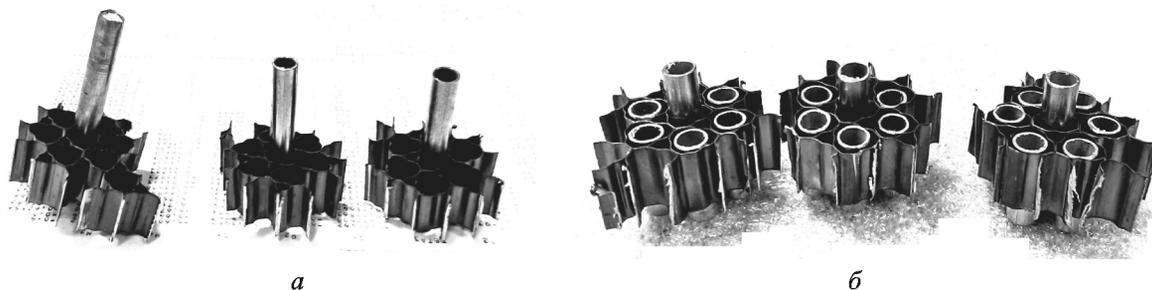
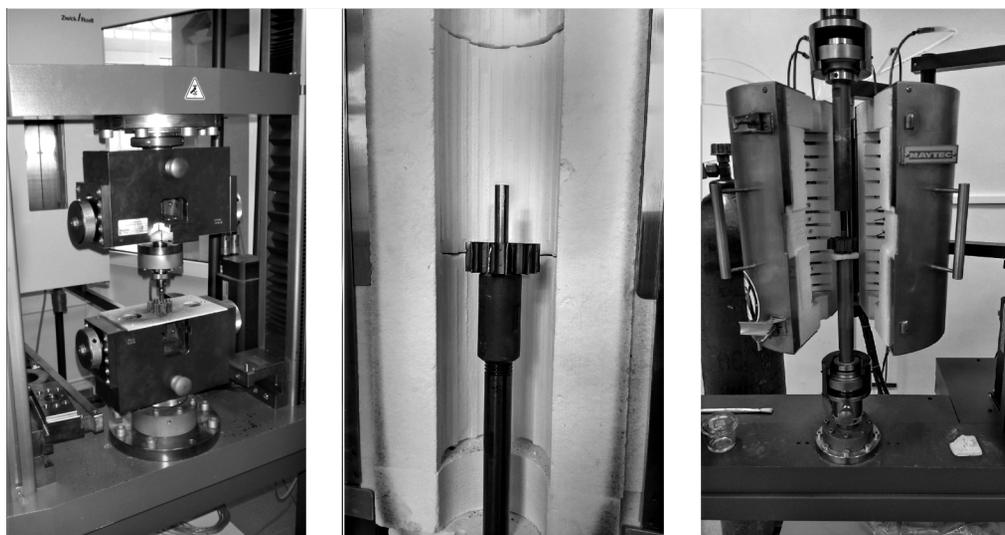


Рис. 2. Образцы для испытания:

а — первая серия; б — вторая серия



а

б

в

Рис. 3. Экспериментальное оборудование:

а — универсальная испытательная машина Zwick Z100; б — печь испытательной машины ATS для испытания материалов на ползучесть, длительную прочность и релаксацию напряжений; в — печь универсальной испытательной машины Zwick Z050 с возможностью заполнения объема печи аргоном

ние силы распрессовки в зависимости от перемещения;

4) косвенное определение релаксации контактных усилий на основе данных о силе запрессовки и распрессовки и при значении коэффициента трения в паре ТВЭЛ — ячейка ДР, равно 0,3 [2].

Данные о параметрах выдержки в печи каждого образца сведены в табл. 1.

В результате испытания образцов для каждого ТВЭЛа в образце определялась сила запрессовки ТВЭЛа в ячейке ДР и сила распрессовки в зависимости от перемещения после выдержки образца в печи. Зависимости запрессовки и распрессовки ТВЭЛов в ячейке ДР от перемещения для экспериментов первой серии образца № 3, выдержки в печи в течение 7,6 ч при температуре 500 °С и второй серии образца № 1 центрального ТВЭЛа, выдержки в печи в течение 8,5 ч при температуре 550 °С приведены на рис. 4.

Осреднение сил запрессовки проводилось по силам, соответствующим перемещениям, превы-

шающим 20 мм (см. рис. 4), поскольку начальные экспериментальные точки соответствуют неполному внедрению ТВЭЛа в ячейку ДР: высота ячейки ДР составляет 20 мм. Осредненные внешний и внутренний диаметры всех ТВЭЛов после выдержки в печи составили 9,168 и 7,629 мм.

Таким образом, все экспериментальные данные представлены значениями силы запрессовки и силы распрессовки для каждого из ТВЭЛов при различных условиях выдержки образца в печи. Для определения нормальной контактной силы, действующей на ТВЭЛ со стороны ячейки ДР, предлагается использовать закон трения скольжения [4], в котором сила трения  $F_{тр}$ , соответствующая силе запрессовки, связана с контактной нормальной силой  $F_k$  соотношением

$$F_{тр} = 3\mu F_k, \quad (1)$$

где  $\mu$  — коэффициент трения,  $\mu = 0,3$  [2]; 3 — количество контактных областей ТВЭЛа и ячейки ДР.

Таблица 1

Параметры выдержки образцов в печи

Номер серии	Номер образца	Температура, °С	Время выдержки, ч	Среда
1	1	650	134	Воздух
1	2	550	22	Аргон
1	3	500	7,6	—
2	1	550	8,5	—
2	2	500	11,33	—
2	3	450	6	—

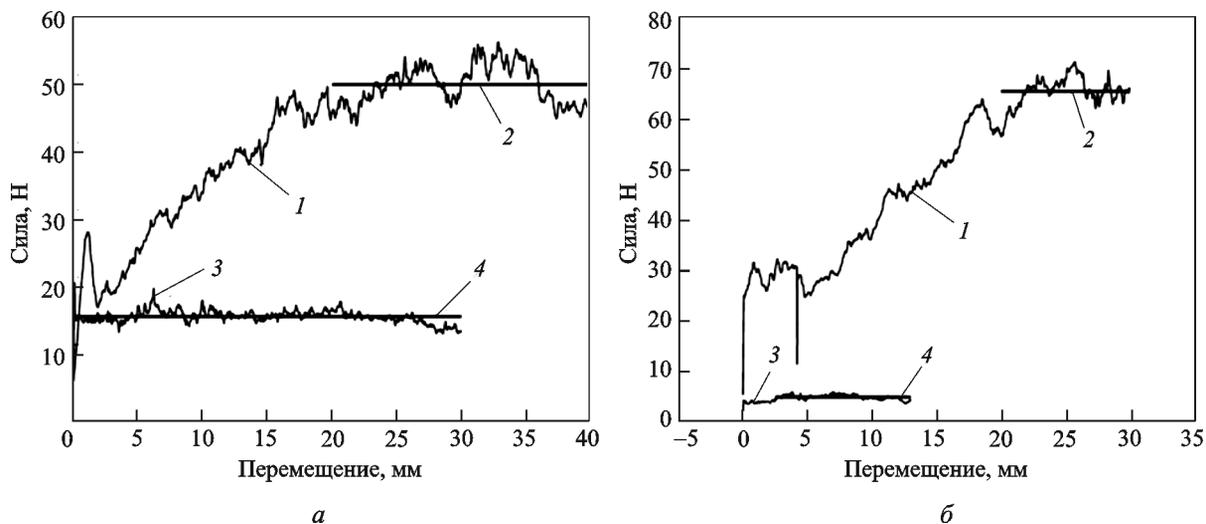


Рис. 4. Усилие запрессовки и релаксовки:

*a* — первая серия, образец № 3; *б* — вторая серия, образец № 1 центрального ТВЭЛа; 1, 3 — эксперимент; 2, 4 — расчет

По формуле (1) пересчетом сил запрессовки и релаксовки определяются значения релаксации контактных сил. Релаксация контактных сил для испытаний второй серии приведена на рис. 5.

Для наглядности представления экспериментальных данных каждые две экспериментальные точки соединены прямой линией.

На рисунке видно, что запрессовка седьмого (центрального ТВЭЛа) происходила с максимальной силой, по сравнению с остальными.

Это, по-видимому, объясняется тем, что седьмой ТВЭЛ запрессовывался в центральную ячейку ДР последним и жесткость центральной ячейки была выше в условиях, когда остальные шесть ТВЭЛов уже запрессованы в соседние ячейки (см. рис. 1, *a*).

Данные по релаксации для каждого ТВЭЛа представлены в табл. 2.

Анализ экспериментальных данных показал следующее: релаксация контактного взаимодействия в паре ТВЭЛ —ячейка ДР, является фун-

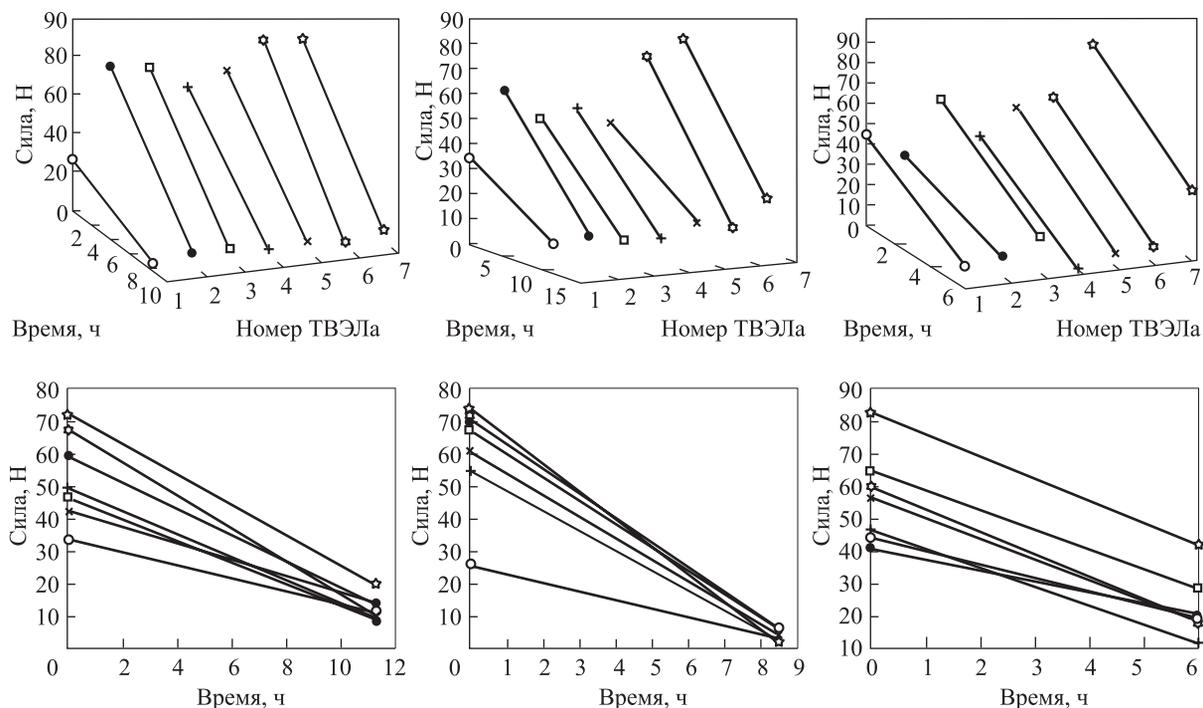


Рис. 5. Релаксация контактных сил для испытаний второй серии:

*a* — образец № 1, 550 °С, 8,5 ч; *б* — образец № 2, 500 °С, 11,33 ч; *в* — образец № 3, 450 °С, 6 ч

Таблица 2

## Релаксация контактных сил для ТВЭЛов

Номер серии	Номер образца	Номер ТВЭЛа	Контактная сила при запрессовке, Н	Контактная сила при распрессовке, Н	Релаксация, %
1	3	1	48,2531	14,1652	70,6439
2	1	1	26,7131	4,1402	84,5013
		2	71,4961	7,1128	90,0515
		3	68,4243	6,6759	90,2435
		4	55,7336	4,1097	92,6261
		5	62,0678	5,3183	91,4315
		6	75,1012	2,4719	96,7086
		7	72,4418	6,1708	91,4817
	2	1	34,2970	11,8657	65,4029
		2	60,0697	13,5705	77,4087
		3	47,1177	9,1700	80,5382
		4	49,9719	9,0711	81,8477
		5	42,7662	14,6691	65,6993
		6	67,8695	10,2824	84,8497
		7	72,5722	19,9126	72,5617
	3	1	44,9405	20,3371	54,7465
		2	41,9983	21,5291	48,7381
		3	65,8712	29,5771	55,0987
		4	46,6947	12,4186	73,4047
		5	57,7546	19,1566	66,8311
		6	60,8430	19,0230	68,7343
		7	84,1156	42,8680	49,0368

кцией трех параметров испытания: температура, контактная сила при запрессовке (уровень напряжений) и время. Такой вывод оправдывает необходимость использования в термопрочностных расчетах ТВС зависимостей теории ползучести металлов и сплавов [2, 3, 5, 6].

## Выводы

1. Релаксация контактного взаимодействия тем больше, чем выше температура выдержки образца в печи. При испытании образцов № 1 и 2 второй серии при температурах 550 и 500 °С средняя релаксация составила 91,0 и 75,4 % соответственно. Средняя релаксация образца № 3 второй серии, испытанного при температуре 450 °С, составила 59,5 %.

2. Релаксация контактного взаимодействия тем выше, чем больше контактная сила при запрессовке ТВЭЛа в ячейку ДР. Такой вывод

можно сделать, проанализировав релаксацию контактных сил для каждого ТВЭЛа, принадлежащего одному образцу. Если рассматривать образец № 1 второй серии, то максимальная релаксация 96,7 % достигается для шестого ТВЭЛа, для которого контактная сила при запрессовке из всех ТВЭЛов образца № 1 была максимальной (75,1 Н). Поскольку в случае максимальной контактной силы в контактных областях пары ТВЭЛ — ячейка ДР возникают наибольшие напряжения, то можно сказать, что релаксация тем больше, чем выше уровень напряжений в образце;

3. Релаксация контактного взаимодействия тем сильнее, чем больше время выдержки образца в печи. Такой вывод можно сделать, если сравнить релаксации для различных образцов второй серии экспериментов. Минимальная средняя релаксация со значением 59,5 % наблюдается для образца № 3 второй серии, выдержанного в печи наименьшее количество времени 6 ч.

## Литература

- [1] 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, № 6, с. 432–437.
- [2] Семишкин В.П. *Расчетно-экспериментальные методы обоснования поведения ТВЭЛов и ТВС ВВЭР в аварийных режимах с большой течью из первого контура РУ*. Дисс. ... д-ра. тех. наук. Подольск, 2007. 360 с.

- [3] Троянов В.М. *Расчетно-экспериментальное обоснование термомеханики активных зон реакторов типа ВВЭР*. Дисс. ... д-ра. тех. наук. Обнинск, 2003. 237 с.
- [4] Wang Z.G., Yoshikawa Y., Suzuki T., Osakada K. Determination of friction law in dry metal forming with DLC coated tool. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2014, vol. 63, issue 1, pp. 277–280. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.050> (дата обращения 2 июня 2014).
- [5] 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 конференции ОКБ «Гидропресс»*, 16–17 марта 2011 г. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2011/documents/kms2011-013.pdf> (дата обращения 20 мая 2014).
- [6] Danilov V.L., Dobrov M.V., Semishkin V.P., Vasilchenko I.N. Analysis of Dismantling Possibility and Unloading Efforts of Fuel Assemblies from Core of WWER. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference WWER FUEL Performance, Modelling and Experiment Support*, 19–23 September 2005, Albena, Bulgaria, pp. 319–327.

## References

- [1] Dragunov Iu.G., Ryzhov S.B., Vasilchenko I.N., Kobelev S.N. Razrabotka i vnedrenie TVS-2M dlia perspektivnykh toplivnykh tsiklov [Elaboration and Implementation of TBC-2M Designs with Increased Fuel Loading for Perspective Fuel Cycles with the Extended Operating Periods]. *Atomnaia energiya* [Atomic Energy]. 2005, vol. 99, no. 6, pp. 432–437.
- [2] Semishkin V.P. *Raschetno-eksperimentalnye metody obosnovaniia povedeniia TVElov i TVSVVER v avariinykh rezhimakh s bol'shoi tech'iu iz pervogo kontura RU*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Calculation and experimental methods and study the behavior of VVER fuel rods in emergency mode with the big leak from the primary circuit of the reactor facility. Dr. tech. sci. diss.]. Podol'sk, 2007. 360 p.
- [3] Troianov V.M. *Raschetno-eksperimental'noe obosnovanie termomekhaniki aktivnykh zon reaktorov tipa VVER*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Numerical and experimental study of active zones thermomechanics VVER reactors. Dr. tech. sci. diss.]. Obninsk, 2003. 237 p.
- [4] Wang Z.G., Yoshikawa Y., Suzuki T., Osakada K. Determination of friction law in dry metal forming with DLC coated tool. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2014, vol. 63, issue 1, pp. 277–280. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.050> (accessed 2 June 2014).
- [5] Puzanov D.N., Satin A.A. *Analiz i obobshchenie dannykh po svoistvam tsirkonievnykh splavov, primenaiushchikhsia v kachestve konstruksionnykh materialov* [Analysis and synthesis of data on the properties of zirconium alloys are used as structural materials]. *Nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia molodykh spetsialistov: Materialy konferentsii ОКБ «Гидропресс»*, 16–17 marta 2011 g. [Scientific and technical conference of young specialists: Conference ОКБ «Hydraulic», 16–17 March 2011]. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2011/documents/kms2011-013.pdf> (accessed 20 May 2014).
- [6] Danilov V.L., Dobrov M.V., Semishkin V.P., Vasilchenko I.N. Analysis of Dismantling Possibility and Unloading Efforts of Fuel Assemblies from Core of WWER. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference WWER FUEL Performance, Modelling and Experiment Support*, 19–23 September 2005, Albena, Bulgaria, pp. 319–327.

Статья поступила в редакцию 17.06.2014

## Информация об авторах

**ГУСЕВ Михаил Павлович** (Москва) — аспирант кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: gusev.m.p@yandex.ru).

**ДАНИЛОВ Владимир Львович** (Москва) — профессор кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vldanilov@mail.ru).

## Information about the authors

**GUSEV Mikhail Pavlovich** (Moscow) — Post-Graduate of «Applied Mechanics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: gusev.m.p@yandex.ru).

**DANILOV Vladimir Lvovich** (Moscow) — Professor of «Applied Mechanics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: vldanilov@mail.ru).