

## Методические особенности моделирования работоспособности тепловыделяющих элементов

© Г.В. Кулаков<sup>1</sup>, Ю.В. Коновалов<sup>2</sup>, А.А. Косауров<sup>1</sup>, А.В. Ватулин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. А.А. Бочвара», Москва, 123098, Россия

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

*Представлена разработанная расчетная модель тепловыделяющего элемента (твэла) атомных реакторов, включающая комплекс взаимосвязанных верифицированных методик: расчета напряженно-деформированного состояния твэлов; верификации расчетной модели твэла и определения свойств материалов твэлов по экспериментальным данным; вероятностного расчета напряженно-деформированного состояния твэлов; обоснования работоспособности дисперсионных твэлов, а также свойств материалов.*

**Ключевые слова:** ядерный реактор, тепловыделяющий элемент, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов.

**Введение.** Основным элементом активной зоны реактора, определяющим ее ресурсные характеристики, безопасность и надежность, является тепловыделяющий элемент (твэл). Работы по созданию твэлов, обоснованию их работоспособности и надежности — ключевой момент разработки активных зон реакторов различного назначения (транспортных, транспортабельных, малой мощности).

Активная зона указанных реакторных установок неремонтопригодна, что требует обеспечения ее работоспособности в течение длительного периода при разгерметизации части твэлов. Преждевременная замена активной зоны приводит к тяжелым стратегическим и экономическим потерям. Выполнение этой операции возможно только в заводских условиях, поскольку требуется вскрытие прочного корпуса. В результате реакторная установка надолго выбывает из строя.

К активным зонам названных реакторов, по сравнению с реакторами типа водо-водяных, предъявляются повышенные требования по маневренности, надежности и безопасности в нормальных и аварийных условиях. Этим определены жесткие требования к достоверности обоснования работоспособности и ресурсных характеристик твэлов.

Обоснование надежности разрабатываемых твэлов — комплексная задача, решаемая на основе расчетной модели и анализа результатов сравнительных испытаний новых конструкций твэлов и твэлов-прототипов, начинающихся с испытаний макетов твэлов в петлевых реакторах и заканчивающихся испытаниями активных зон и стенда-прототипа.

На всех этапах разработки твэлов основным инструментом, позволяющим анализировать экспериментальные данные, оптимизировать конструкцию и обосновывать ресурсные характеристики с учетом реальных условий эксплуатации, является расчетная модель твэла. Расчетная модель дисперсионных твэлов состоит из комплекса взаимосвязанных верифицированных методик и свойств материалов твэла, используемых при расчетах (рис. 1).



Рис. 1. Расчетная модель твэла

В АО «ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара» (далее — АО «ВНИИНМ») разработаны следующие методики, прошедшие апробацию на обширном экспериментальном материале.

**Методика расчета напряженно-деформированного состояния твэлов.** Программные комплексы MARC и FENIX позволяют проводить расчеты температуры, напряженно-деформированного состояния и формоизменения твэлов любой формы (рис. 2) в упруговязко-

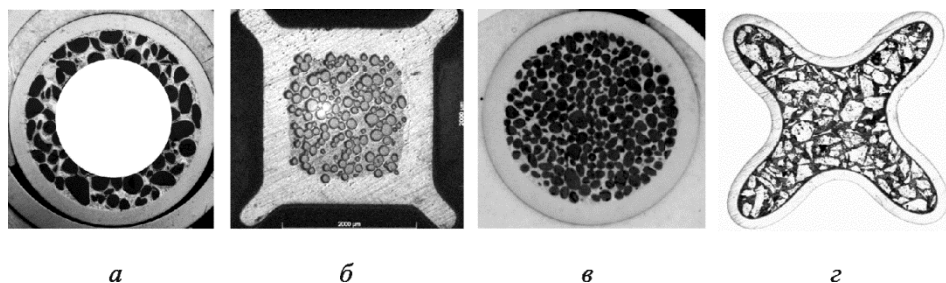


Рис. 2. Поперечные сечения твэлов:

а — макет твэла; б — стержневой твэл исследовательского реактора типа ИРТ; в — твэл плавучей АЭС; г — твэл реакторов СМ и ПИК

пластической трехмерной и квазитрехмерной (задача обобщенной плоской деформации) постановке в соответствии с теорией пластического течения. Для практических расчетов, как правило, используют задачу обобщенной плоской деформации, т. е. сводят трехмерную задачу к двумерной с учетом особенностей конструкции и характера нагружения твэлов.

Программные комплексы дают возможность учесть следующие особенности конструкции дисперсионных твэлов: неоднородность структуры сердечника (наличие пор и пустот); локальные нарушения диффузионно-металлургического сцепления сердечника с оболочкой и утонения оболочки (например, вследствие язвенной коррозии).

Квазитрехмерная задача, основанная на полупространственной теории стержней, позволяет определить трехмерное напряженно-деформированное состояние твэла в упруговязкопластической постановке, используя задачу обобщенной плоской деформации. В методике учитывается наличие нагрузки на торцы твэла, не имеется ограничений на форму его поперечного сечения, а продольная деформация может быть определена без дополнительной итерационной процедуры. Решение задачи получено в традиционной трактовке метода конечных элементов (вариант метода перемещений) и реализовано в комплексе FENIX, разработанном в АО «ВНИИНМ» [1]. Для проведения расчетов использован также программный комплекс MARC, созданный фирмой MSC Software (США) [2].

Применяемый авторами подход методически близок к методу прогнозирования надежности и долговечности элементов конструкций высокого давления [3, 4].

**Методика верификации расчетной модели твэла и определения свойств материалов твэлов по экспериментальным данным.** Для создания работоспособной расчетной модели твэла необходимо иметь набор свойств материалов в виде зависимостей от условий работы и метод верификации (проверки и настройки) расчетной модели по экспериментальным данным.

Достоверность расчетной модели твэла определяется тем, насколько точно она описывает экспериментальные данные. Точность описания экспериментальных данных оценивают по остаточной дисперсии, характеризующей сумму квадратов отклонений расчетных значений одного или нескольких параметров, прогнозируемых расчетной моделью твэла, от соответствующих экспериментальных значений.

В ходе верификации расчетной модели твэла может проводиться ее уточнение, могут корректироваться либо определяться впервые некоторые константы или зависимости механических свойств от условий работы.

Создание и практическая реализация такой методики возможны при выполнении следующих условий: если объем эксперименталь-

ных данных достаточен для проведения количественного анализа и если экспериментальные данные чувствительны к изменению неизвестных механических свойств и поддаются количественной обработке.

Многофакторный регрессионный анализ данных по планиметрии поперечных сечений отработавших твэлов показал, что указанные условия выполняются. Наиболее чувствительны к изменению условий работы и механических свойств геометрические размеры облученных твэлов.

Специфической особенностью работы дисперсионных твэлов является низкая скорость деформирования материалов. В связи с этим сильное влияние на напряженно-деформированное состояние и изменение твэла оказывают установившаяся скорость ползучести топливной композиции и коэффициент распухания. Топливная композиция работает в условиях неравномерного объемного сжатия, смоделировать которое вне твэла невозможно. Единственным методом определения зависимости напряженно-деформированного состояния от скорости ползучести и коэффициента распухания является разработанный авторами расчетно-экспериментальный метод.

Метод сводится к следующему. В расчетной модели твэла функции, описывающие изменение скорости ползучести и коэффициента распухания топливной композиции от условий работы и напряжения, задают с точностью до констант. Значения этих констант определяют при минимизации суммы квадратов отклонений экспериментальных значений относительного изменения геометрических размеров твэла под облучением от значений, вычисляемых с помощью расчетной модели твэла.

Математическая постановка задачи выглядит так.

Найти значения неизвестных параметров модели твэла  $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_L)$ , где  $L$  — число параметров, минимизирующих функцию

$$U(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_L) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\Delta S}{S}(\bar{\chi}_i, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_L) - \left( \frac{\Delta S}{S} \right)_i \right]^2;$$

здесь  $(\Delta S/S)_i$  — экспериментально определенное относительное изменение площади  $i$ -го поперечного сечения твэла;  $\bar{\chi}_i(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_M)$  — значения факторов в  $i$ -м сечении;  $M$  — число факторов;  $N$  — число сечений;  $\Delta S/S(\bar{\chi}_i, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_L)$  — относительное изменение площади  $i$ -го поперечного сечения твэла, определяемое расчетной моделью.

**Методика вероятностного расчета напряженно-деформированного состояния твэлов.** Методика значительно расширяет возможности расчетной модели твэла, поскольку позволяет определить

вид и параметры законов распределения выходных параметров модели. Применение методики в практических расчетах дает возможность оценить влияние колебаний геометрических размеров твэлов (в пределах допусков), изменений свойств материалов (в рамках точности их определения) и условий работы твэлов на напряженно-деформированное состояние, выдать рекомендации по оптимизации формы твэла и корректировке допусков, направленные на повышение ресурсных характеристик. Методику используют также при расчетно-экспериментальном определении свойств материалов твэла.

Для выявления законов распределения выходных переменных больших вычислительных программ, к которым относятся комплексы MARC и FENIX, применен метод поверхности отклика.

Метод состоит в том, что программу в окрестности точки, имеющей координаты, равные номинальным (средним) значениям входных переменных, заменяют системой полиномов второго порядка (поверхностей откликов), которые используют затем вместо программы для нахождения законов распределения выходных переменных. Расчеты для построения поверхностей откликов проводят с использованием теории планирования эксперимента.

Как правило, вид закона распределения выходной переменной неизвестен. В этом случае наиболее удобным методом его определения является метод согласования моментов искомого распределения с моментами семейства распределений Пирсона. Зная первые четыре центральных момента выходной переменной, можно оценить ее плотность распределения.

Моменты выходных переменных вычисляют по методу разложения ошибки, в котором используются центральные моменты входных переменных и коэффициенты поверхности отклика.

При проведении вероятностных расчетов по методу поверхности отклика одновременно решают следующие задачи:

- 1) проверка эффективности входных переменных (цель — отсечение незначимых факторов, сокращение объема расчетов);
- 2) разложение дисперсий выходных переменных программы на вклады от дисперсий входных переменных (цель — выбор и обоснования допусков на конструктивные и технологические параметры твэлов);
- 3) выявление законов распределения выходных переменных на основе информации о законах распределения входных переменных (цель — расчет вероятности разгерметизации и вероятности выхода геометрических размеров за допустимые пределы).

Методика может быть применена к любой программе, реализующей расчетную модель какого-либо объекта.

**Методика обоснования работоспособности дисперсионных твэлов.** Методика устанавливает правила и порядок анализа экспе-

риментальных данных, расчетов и определения ресурсных характеристик твэлов.

Необходимой частью методики является анализ работоспособности твэлов-прототипов и твэлов-аналогов в различных условиях испытаний или эксплуатации. На основании анализа экспериментальных данных определяют свойства материалов твэла, используемые в расчетах напряженно-деформированного состояния, деформации оболочек твэлов до разгерметизации в различных условиях эксплуатации и критическую деформацию оболочки твэла.

Для определения наиболее тяжелых условий работы твэлов (когда деформация оболочки максимальна) рассчитывают напряженно-деформированное состояние твэлов тепловыделяющих сборок в основных зонах физического профилирования по высоте активной зоны. Для дальнейших расчетов выбирают твэл и его сечение, характеризующиеся наиболее тяжелыми условиями работы. Для этих условий проводят вероятностный расчет, чтобы определить максимальную деформацию оболочки, по которой, в свою очередь, оценивают ресурсные характеристики твэла. Для этих же условий рассчитывают циклическую повреждаемость оболочки твэла.

**База данных по послереакторным исследованиям твэлов.** В АО «ВНИИНМ» разработана база данных, включающая результаты послереакторных исследований [5]. Основные цели разработки: хранение информации (с возможностью сортировки, поиска, различных представлений данных); использование данных для расчетно-экспериментального определения свойств материалов твэла.

В настоящее время в базе данных хранится следующая информация: результаты изготовления и контроля твэлов; условия реакторных испытаний (история облучения); результаты послереакторных исследований для твэлов активных зон атомных ледоколов с оболочками из стали, циркониевых сплавов, хромоникелевого сплава [6]; полноразмерных и укороченных твэлов с топливной композицией диоксид урана + алюминиевый сплав [7]; полноразмерных твэлов и минутвэлов с уран-молибденовым топливом [8, 9].

В базе данных хранятся оцифрованные теплогидравлические и нейтронно-физические характеристики условий облучения за весь период испытаний, оцифрованные результаты гамма-сканирования твэлов. Предусмотрено графическое представление этих данных.

Результаты послереакторных исследований хранятся в виде таблиц (результаты измерений геометрических размеров облученных твэлов, в том числе в планиметрии) и фотографических изображений облученных твэлов и их фрагментов, разбитых на следующие категории: внешний вид; макроструктура; микроструктура (рис. 3); электронная микроскопия.

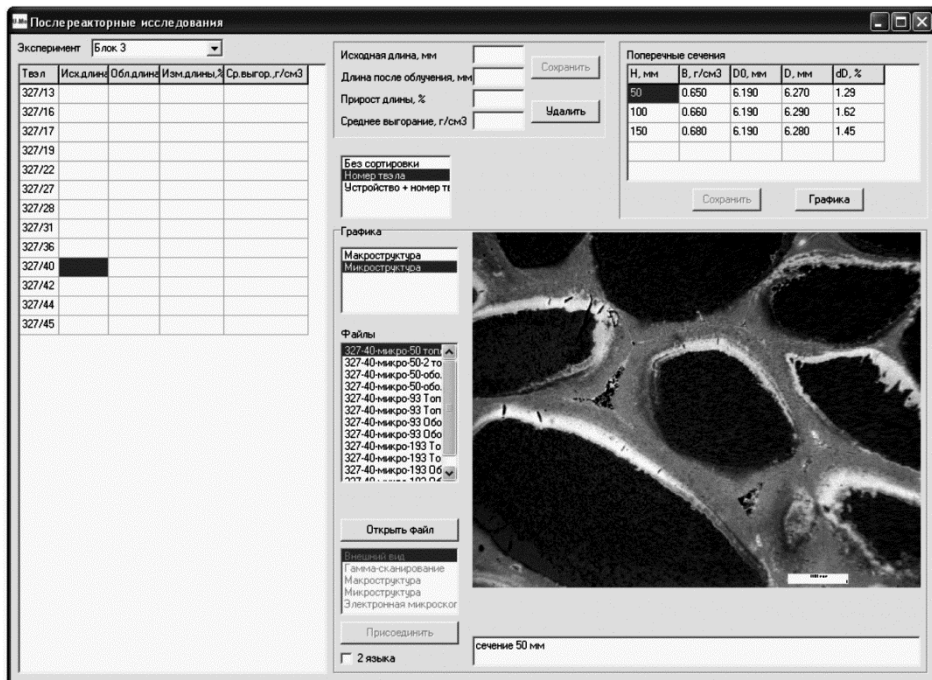


Рис. 3. Микроструктура поперечного сечения облученного твэла с топливной композицией диоксид урана + алюминиевый сплав

Полученные результаты использовались при проведении совместных работ с Аргоннской национальной лабораторией (США) в рамках программы снижения обогащения топлива исследовательских реакторов RERTR, а также при обосновании работоспособности твэлов с топливной композицией диоксид урана + алюминиевый сплав, в том числе твэлов, облучавшихся в реакторе МИР, и твэлов головного плавучего энергоблока «Академик Ломоносов».

Базу данных разрабатывали с ориентацией на расчетно-экспериментальное определение свойств материалов твэлов: количественные сведения в базе данных хранятся в виде, максимально удобном для проведения расчетов; предусмотрен экспорт таблиц базы данных в текстовые файлы с разделителями и файлы типа Excel; разработан блок графического представления экспериментальных данных; имеется возможность их статистической обработки.

**Заключение.** Разработанная в АО «ВНИИНМ» модель твэла, включающая комплекс взаимосвязанных верифицированных методик и свойств материалов, может с успехом применяться при расчетах.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ватулин А.В., Каширин Б.А., Кулаков Г.В., Темис Ю.М. Учет несимметричных факторов при расчете дисперсионных твэлов. *Сб. докл. Второй*

- конф. «Методы и программное обеспечение расчетов на прочность». Геленджик, Россия, 30 сентября–5 октября 2002 г. Москва, 2003, с. 193–209.
- [2] MSC.MARC&MENTAT. Лицензионное свидетельство ЕС 9068 от 15 мая 2000 г.
- [3] Димитриенко Ю.И., Юрин Ю.В., Европин С.В. Прогнозирование долговечности и надежности элементов конструкций высокого давления. Ч. 1: Численное моделирование накопления повреждений. *Изв. вузов. Сер. Машиностроение*, 2013, № 11, с. 3–11.
- [4] Димитриенко Ю.И., Юрин Ю.В., Шиверский Е.А. Прогнозирование долговечности и надежности элементов конструкций высокого давления. Ч. 2: Численное статистическое моделирование. *Изв. вузов. Сер. Машиностроение*, 2013, № 12, с. 11–19.
- [5] Коновалов Ю.В., Кулаков Г.В., Ватулин А.В., Новоселов А.Е., Миндукшева И.А. Разработка базы данных по результатам послереакторных исследований и по свойствам твэлов дисперсионного типа. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы*, 2013, вып. 1 (74), с. 17–25.
- [6] Самойлов О.Б., Преображенский Д.Г., Морозов О.А. и др. Результаты эксплуатации и условия работы ледокольных активных зон. *Тез. докл. 9-й Рос. конф. по реакторному материаловедению*. Димитровград, НИИАР, 14 сентября 2009 г., с. 68–70.
- [7] Кулаков Г.В., Ватулин А.В., Ершов С.А., Коновалов Ю.В., Морозов А.В., Сорокин В.И., Федотов В.В., Новоселов А.Е., Овчинников В.А., Шишин В.Ю. Разработка твэлов плавучих энергоблоков и атомных станций малой мощности. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы*, 2012, вып. 1 (72), с. 14–25.
- [8] Vatulin A., Morozov A., Suprun V., Dobrikova I. Main Results and Status of the Development of LEU Fuel for Russian Research Reactors. *Transactions of Int. Topical Meeting Research Reactor Fuel Management, RRFM–2005*, Budapest, April 10–13, 2005, pp. 76–82.
- [9] Izhutov A.L., Alexandrov V.V., Novosyolov A.Ye., et al. Results of PIE pin type LEU U–Mo fuel elements tested in the MIR reactor. *The 2006 Int. Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*. Cape Town, Republic of South Africa, October 29–November 2, 2006.

Статья поступила в редакцию 09.06.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кулаков Г.В., Коновалов Ю.В., Косауров А.А., Ватулин А.В. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 6.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/nre/1408.html>

**Кулаков Геннадий Валентинович** — канд. техн. наук, директор отделения АО «ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара». Сфера деятельности и научных интересов — исследования в области атомной энергетики.



**Коновалов Юрий Валентинович** — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера деятельности и научных интересов — статистическое моделирование процессов в области атомной энергетики. e-mail: [kon20002000@mail.ru](mailto:kon20002000@mail.ru).



**Косауров Александр Анатольевич** — начальник отдела АО «ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара». Сфера деятельности и научных интересов — исследования в области атомной энергетики.

**Ватулин Александр Викторович** — д-р техн. наук, профессор Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». Сфера деятельности и научных интересов — исследования в области атомной энергетики.

## Methodical basis for justification of fuel elements operability

© G.V. Kulakov<sup>1</sup>, Y.V. Konovalov<sup>2</sup>, A.A. Kosaurov<sup>1</sup>, A.V. Vatulin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>JSC "A.A. Bochvar High-Technology Research Institute

of Inorganic Materials" (JSC "VNIINM"), Moscow, 123060, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

<sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPhI

(Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409, Russia

*The article presents a developed calculation model for fuel elements of nuclear reactors. This model includes complex of interconnected verified techniques and materials properties to be used in calculations, in particular: technique of fuel elements stress and strain state calculations; technique of model verification and fuel elements material properties using experimental data; technique of fuel elements stress and strain state probability calculations; technique for justification of fuel elements operability.*

**Keywords:** nuclear reactor, fuel element, stress and strain state, finite element method.

### REFERENCES

- [1] Vatulin A.V., Kashirin B.A., Kulakov G.V., Temis Y.M. Uchet nesimmetrichnykh faktorov pri raschete dispersionnykh tvelov [Accounting asymmetrical factors when calculating the dispersion fuel rods]. *Sbornik dokladov Vtoroy konferentsii "Metody i programmnoe obespechenie raschetov na prochnost", Gelendzhik, Rossiya, 30 sentyabrya – 5 oktyabrya 2002* [Coll. rep. Second Conf. "Methods and software calculations of strength", Gelendzhik, Russia, 30 september – 5 october, 2002]. Moscow, 2003, pp. 193–209.
- [2] MSC.MARC&MENTAT. License EC 9068 of 15 May, 2000.
- [3] Dimitrienko Yu.I., Yurin Yu.V., Evropin S.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 11, pp. 3–11.
- [4] Dimitrienko Yu.I., Yurin Yu.V., Shiverskiy E.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 2013, no. 12, pp. 11–19.
- [5] Konovalov Y.V., Kulakov G.V., Vatulin A.V., Novoselov A.E., Minduksheva I.A. *Voprosy Atomnoi Nauki i Techniki. Seriya Materialovedenie i novye materialy — Issues of Atomic Science and Engineering, Series Material Science and New Materials*, 2013, vol. 1 (74), pp. 17–25.
- [6] Samoilov O.B., Preobrazhensky D.G., Morozov O.A., et al. Rezultaty ekspluatatsii i usloviya raboty ledokolnykh aktivnykh zon [The operating results and conditions of icebreakers cores]. *Tezisy dokladov 9-y Rossiyskoi konferentsii po reaktornomu materialovedeniyu. Dimitrovgrad, NIAR, 14 sentyabrya 2009 g.* [Abstracts of IX Russian Conference on Reactor Materials Science. Dimitrovgrad, RIAR, 14 September, 2009]. Dimitrovgrad, RIAR, 2009, pp. 68–70.
- [7] Kulakov G.V., Vatulin A.V., Ershov S.A., Konovalov Y.V., Morozov A.V., Sorokin V.I., Fedotov V.V., Novoselov A.E., Ovchinnikov V.A., Shishin V.Y. *Voprosy Atomnoi Nauki i Techniki. Seriya Materialovedenie i novye materialy — Issues of Atomic Science and Engineering, Series Material Science and New Materials*, 2012, issue 1 (72), pp. 14–25.
- [8] Vatulin A., Morozov A., Suprun V., Dobrikova I. Main Results and Status of the Development of LEU Fuel for Russian Research Reactors. *Transactions of Int. Topical*

*Meeting Research Reactor Fuel Management, RRFM-2005*, Budapest, April 10–13, 2005, pp. 76–82.

- [9] Izhutov A.L., Alexandrov V.V., Novosyolov A.Ye., et al. Results of PIE pin type LEU U–Mo fuel elements tested in the MIR reactor. *The 2006 Int. Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*. Cape Town, Republic of South Africa, October 29–November 2, 2006.

**Kulakov G.V.**, Cand. Sci. (Eng.), chief of department, JSC “VNIINM”. Research interests: research in the field of nuclear energy.

**Konovalov Y.V.**, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of the Computational Mathematics and Mathematical Physics Department at Bauman Moscow State Technical University. Research interests: statistical modeling in the field of nuclear energy. e-mail: kon20002000@mail.ru

**Kosaurov A.A.**, director of department, JSC “VNIINM”. Research interests: research in the field of nuclear energy.

**Vatulin A.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, National Research Nuclear University MEPhI. Research interests: statistical modeling in the field of nuclear energy.