

С. М. Богатырь, М. П. Галанин,  
М. М. Горбунов-Посадов, А. С. Гусев,  
А. С. Еременко, А. В. Ермаков,  
В. И. Кузнецов, В. В. Лукин,  
В. В. Новиков, А. С. Родин,  
А. В. Салатов, М. В. Сыпченко,  
А. А. Фальков, К. Л. Шаповалов

## КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ РАСЧЕТОВ ТЕРМОМЕХАНИКИ ТЕПЛОТЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Отражены результаты анализа известных литературных источников по использованию вероятностных методик расчета термомеханики твэлов в различных режимах и выбора методики расчета методом Монте-Карло. Разработан программный код (комплекс) CaPrAPI (Complex of Programs for Probability Investigations) вероятностных расчетов, реализующий алгоритм вероятностных расчетов поведения твэла на основе метода Монте-Карло с использованием кодов START-3 и RAPTA-5.2 и теплогидравлических условий, рассчитываемых кодом RELAP/SCDAPSIM. Описана архитектура разработанного кода. Представлено описание реализации многовариантного расчета решения задачи и графический интерфейс. Приведены результаты работы кода. Код учитывает неопределенности входных параметров, погрешности эмпирических корреляций и погрешности расчетных моделей. Код позволяет получать реалистические оценки основных критериальных параметров твэлов в авариях типа LOCA, например, максимальной температуры оболочки, максимальной эквивалентной степени окисления оболочки и др. с оценками их неопределенностей в виде границ доверительного интервала с заданным уровнем доверия.*

**E-mail:** [vvlukin@gmail.com](mailto:vvlukin@gmail.com), [galan@keldysh.ru](mailto:galan@keldysh.ru)

**Ключевые слова:** твэл, метод ВЕРУ, неопределенность параметров, метод Монте-Карло, формула Wilks, авария LOCA, ключевой параметр, доверительный интервал, уровень доверия, коды, интерфейсные данные, функции распределения

**Введение и постановка задачи.** Одними из наиболее ответственных результатов математического и численного моделирования явлений и процессов являются критериальные, которые призваны дать ответ на вопрос о попадании некоторых выходных параметров в заданные множества. Часто такие вопросы возникают в связи с проблемами безопасности. Типичный и очевидный (по применимости к нему данных вопросов) пример, который и рассматривается в работе, — атомная энергетика [1–8].

Рассмотрим следующую ситуацию (рис. 1.). Пусть имеется  $m$  входных величин  $p_1, p_2, \dots, p_m$ , называемых далее параметрами, по которым некоторая математическая (чаще всего вычислительная) модель

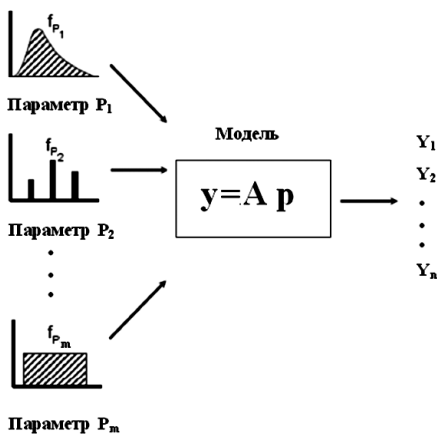


Рис. 1. Модель объекта как „черный ящик“

определяет  $n$  выходных параметров  $y_1, y_2, \dots, y_n : y = Ap$ , где  $A$  — некоторый оператор. Будем считать эти выходные параметры критериальными, остальные выходные результаты рассматривать не будем.

Хорошо известно (см., например, [9]), что результат моделирования содержит ошибку, определяемую неточностью входных данных, неточностью модели, неточностью алгоритма и неточностью вычислений. Допустим, что три последние составляющие результирующей ошибки либо пренебрежимо малы, либо находятся под жестким контролем и известны. Тогда основным источником неопределенности выходных данных является неопределенность входных параметров. Чаще всего она носит случайный характер. Далее будем считать, что законы распределения случайных величин, поступающих на вход системы математического моделирования, известны. Однако сложность системы такова, что найти законы распределения выходных величин невозможно даже при известных законах распределения входных параметров. В результате выходные величины приходится считать случайными с неизвестными законами распределения. Чаще всего между собой выходные величины являются зависимыми. Ситуацию иллюстрирует рис. 1.

Целью работы является создание компьютерной системы для проведения критериальных расчетов термомеханики тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов). Система должна обеспечивать возможность варьирования по заданным вероятностным законам входных параметров, изменять количество выходных параметров и в удобной форме представлять полученные результаты.

В качестве математической модели, находящейся в центре системы, используются коды START-3 [10], RAPTA-5.2 [11], RELAP/SCDAPSIM (далее — RELAP) [12], каждый из которых рассчитывает свою часть задачи. Разработанная методика вероятностных расчетов

реализована в виде программного кода CaPpaPI (Complex of Programs for Probability Investigations), объединяющего имеющиеся коды в единый программный комплекс.

Разработанная вероятностная методика должна позволить снизить консерватизм определения критериальных параметров твэлов в аварии LOCA (Loss Of Coolant Accident — авария с потерей теплоносителя) и увеличить их запасы до предельных значений. В соответствии с современными требованиями нормативных документов [1, 13] и сложившейся практикой обоснований проектов должно быть показано, что критерии безопасности выполняются для наиболее горячего твэла с вероятностью не менее 95 % при уровне доверия 95 %.

В статье отражены материалы литературных данных по использованию вероятностных методик в расчетах выходных параметров аварии LOCA. Представлена блок-схема выполнения вероятностных расчетов. Описана программная реализация общей блок-схемы решения задачи в виде программного кода (комплекса). Реализован многовариантный расчет решения задачи. Код оснащен графическим интерфейсом для представления результатов.

Комплекс включает программные коды START-3 и RAPTA-5.2 и интерфейсные данные кода RELAP. В коде реализована возможность выбора коммуникативных схем связей между START-3, RAPTA-5.2, RELAP и, соответственно, выбора структуры итерационного цикла для последовательного уточнения входных данных, получаемых из перечисленных программ.

Разработанный программный код (комплекс) соответствует процедуре GRS [7] и позволяет получать реалистические оценки основных критериальных параметров твэлов, в частности, для условий LOCA, PCT — максимальной температуры оболочки, ECR — максимальной эквивалентной степени окисления оболочки, с оценкой их неопределенностей в виде доверительного интервала и квантиля.

Более подробно представленные здесь результаты изложены в работе [8].

Работа выполнена при финансовой поддержке топливной компании „ТВЭЛ“ (Госкорпорация „Росатом“).

**Вероятностная методика и программный комплекс.** В последние годы возрастает интерес к разработке программных комплексов, обеспечивающих численный анализ безопасности реакторных установок АЭС. При этом акцент смещается с детерминистского консервативного подхода к так называемому BEPU (Best Estimate Plus Uncertainty — наилучшая оценка плюс неопределенность поведения моделируемой системы) подходу. Например, the USA Code of Federal

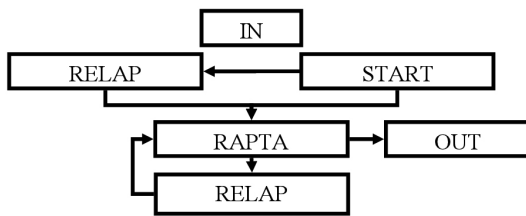
Regulation (CFR) [1] позволяет использовать для этих целей или программу с наилучшей оценкой неопределенности и численную оценку неопределенности, или консервативную вычислительную программу. Понятие наилучшая оценка относится к программному комплексу, моделирующему работу объекта. Анализ неопределенности включает идентификацию и численную оценку всех важнейших неопределенных параметров вместе с методологией количественного определения их влияния на выходные параметры объекта.

GRS метод оценки распределений параметров исследуемой системы разработан в рамках CSAU (Code Scaling, Applicability and Uncertainty [2]) подхода [7]. Он использует формулу Wilks [14], включающую число контролируемых выходных параметров, оценку допуска и уровень доверия к получаемым результатам, для определения необходимого количества расчетов и до настоящего времени является наиболее используемым на практике. При его применении выполняются следующие шаги:

- идентифицируются относящиеся к неопределенности входные параметры;
- определяются диапазоны и законы вероятностных распределений параметров;
- необходимое количество расчетов определяется из требований к оценке допуска и доверительному интервалу для выбранного параметра [14];
- генерируются выборки векторов случайных значений параметров из этих распределений;
- выполняется расчетов по модели объекта с этими векторами входных параметров;
- получают количественные предписания на выходные неопределенности (интервал допустимых пределов);
- проводят численное исследование чувствительности по результатам (ранжированные (Spearman's) или простые (Пирсон) коэффициенты корреляции).

Метод GRS не имеет ограничений по количеству рассматриваемых неопределенных параметров. Рассчитанная неопределенность имеет хорошо обоснованную теоретическую базу [7, 15, 16].

Расчет термомеханики твэла (модели объекта) выполняется путем последовательного выполнения трех различных программ (рис. 2), обмен данными между которыми осуществляется на уровне файлов. Программа START-3 проводит термомеханический расчет твэла (или их группы) в случае моделирования режима нормальной эксплуатации или готовит данные для расчета аварии типа LOCA с помощью кода RAPTA-5.2. Программа RELAP проводит серию теплогидравлических расчетов, в результате которых определяются внешние условия



**Рис. 2.** Схема взаимодействия расчетных кодов в комплексе программ

на границах твэлов и их неопределенности. Возможны многочисленные варианты связи отдельных кодов, включая их итерационное взаимодействие. Помимо общего расчета каждый из кодов может решать свою задачу, представляющую самостоятельный интерес. Программный комплекс дает возможность проводить вероятностные расчеты для различных комбинаций описываемых программ.

При проведении вероятностных испытаний могут контролироваться такие выходные параметры указанных кодов, как давление газа под оболочкой, окружные напряжения на внутренней поверхности оболочки, максимальная температура топлива, среднерадиальная энтальпия топлива, максимальная температура оболочки, эквивалентная степень окисления, доля прореагировавшего циркония.

Программный комплекс, реализующий методику вероятностных испытаний кодов START-3, RAPTA-5.2 и RELAP, включает в себя ряд утилит:

- 1) графическую оболочку планировщика расчета. В рамках данной утилиты происходит задание данных о варьируемых технологических и модельных параметрах расчетов по кодам START-3, RAPTA-5.2 и RELAP, а также о проверяемых критериях;
- 2) утилиту, осуществляющую подготовку, запуск и отслеживание прохождения серии вероятностных испытаний заданной конфигурации расчетных кодов;
- 3) графическую утилиту (постобработчик), позволяющую производить построение графиков контролируемых параметров, представляющая в визуальной форме результаты испытаний и проверки критериев (рис. 3);
- 4) динамическую математическую библиотеку для расчета вероятностных параметров и моделирования случайных величин.

**Пример работы программного кода SaPpaPI.** С помощью программного кода решен ряд задач оценки неопределенности параметров твэлов с использованием различных распределений входных параметров и контролируемых критериев.

Одна из серий расчетов была направлена на контроль выполнения следующих критериев в рамках нормальной эксплуатации твэла и в случае аварии типа LOCA.

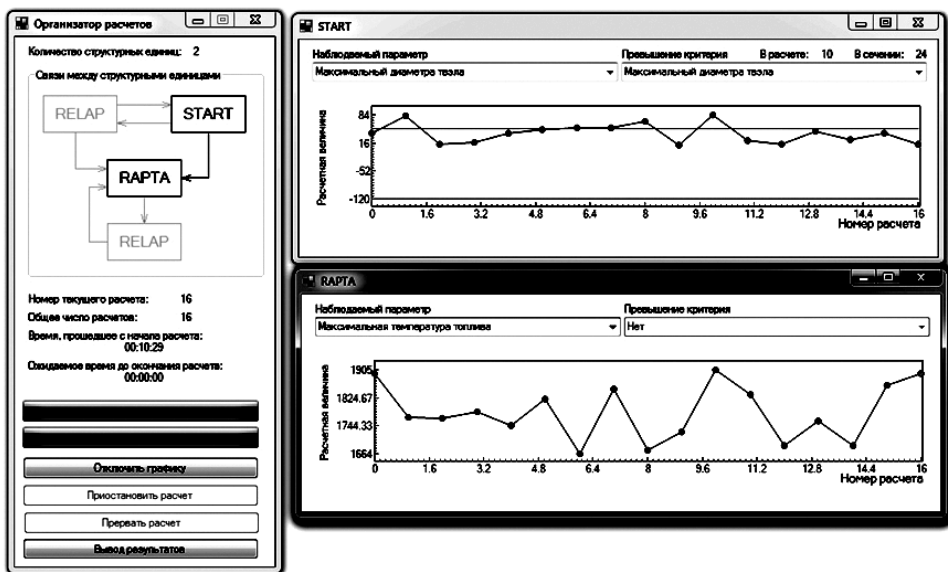


Рис. 3. Визуальный интерфейс постобработки расчетов в комплексе CaPrPI

1. Давление газа под оболочкой PGAS < 15,8 МПа.
2. Окружные напряжения на внутренней поверхности оболочки SCI < 260 МПа.

Изменение максимальной линейной мощности твэла (варьируемый параметр расчета) и окружные напряжения на внутренней поверхности оболочки для расчета параметров нормальной эксплуатации твэла представлены на рис. 4. Значения линейной мощности твэла варьировались в диапазоне  $\pm 10\%$ .

Для данной серии расчетов значение квантиля  $\beta = 0.95$  и уровень доверия  $\gamma = 0.95$ . Произведено 93 расчета с использованием расчетного кода START-3, в том числе один расчет с номинальным значением входных параметров и 92 расчета со смоделированными по методу Монте-Карло входными параметрами.

Время расчета составило 6645 с (1, 84 ч) с учетом постобработки выходных файлов кода START-3. В среднем на один расчет по коду START-3 потребовалось 71.46 с. Общий объем полученных данных составил 724.3 Мб. В результате серии вероятностных расчетов указанные критерии подтверждены.

Результаты расчетов с аналогичными параметрами для случая аварии типа LOCA представлены на рис. 5.

**Заключение.** Приведены материалы работы, посвященной созданию кода вероятностных расчетов критериальных характеристик твэлов в условиях нормальной эксплуатации и постулируемых аварий типа LOCA. Работа основана на применении кодов START-3, RAPTA-5.2, RELAP.

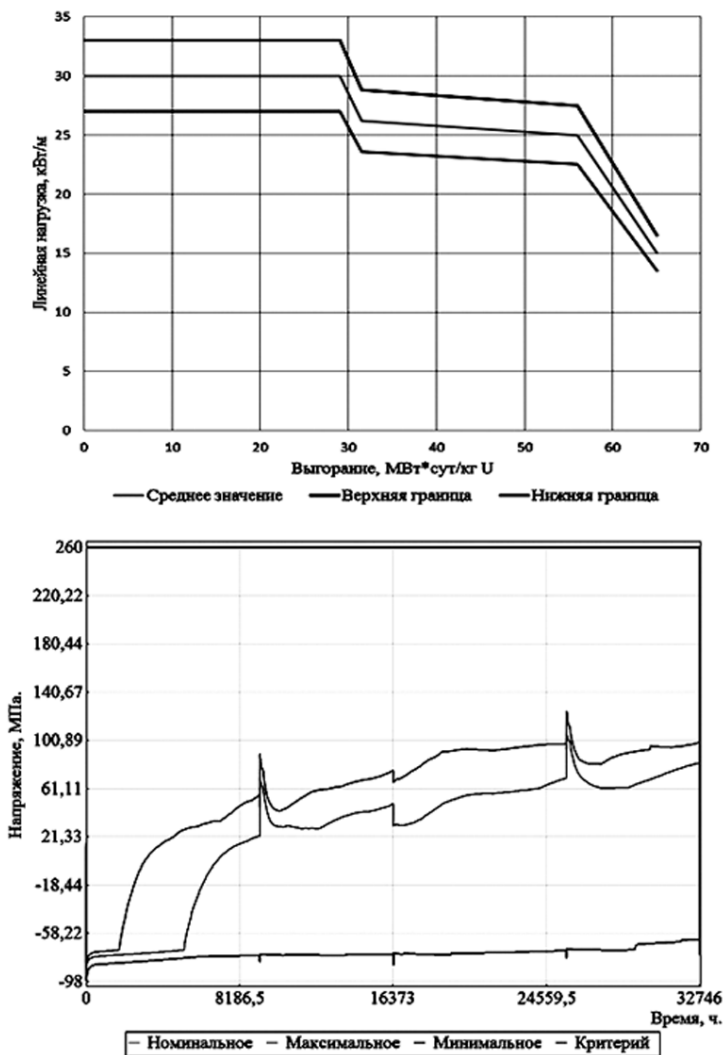
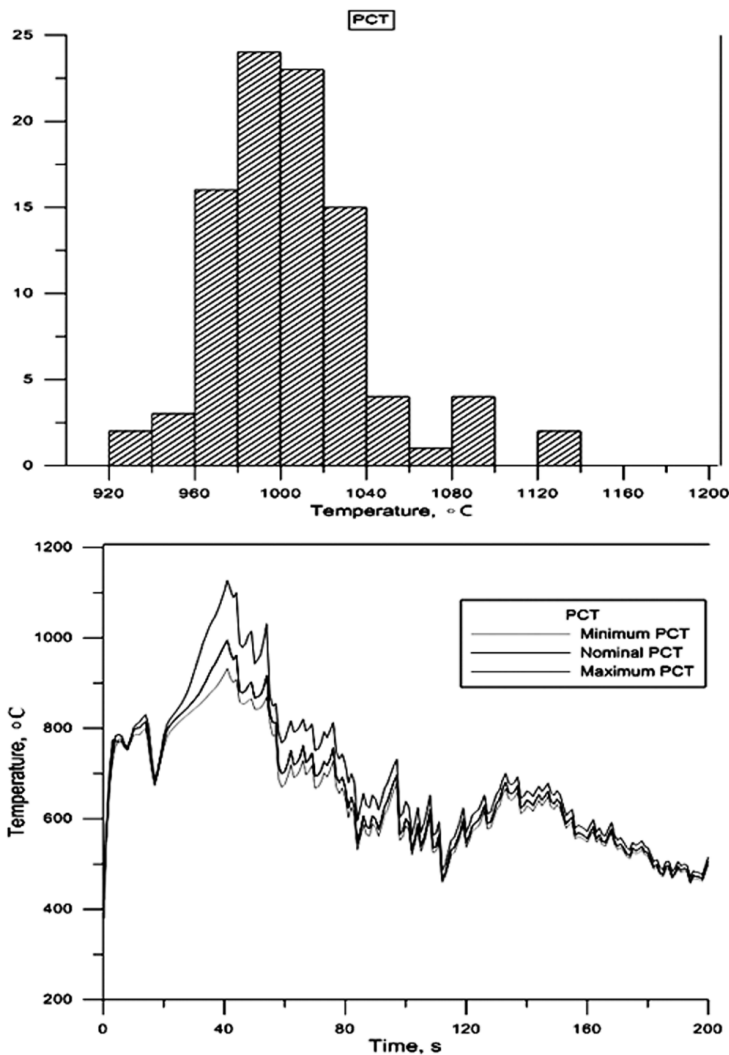


Рис. 4. Зависимость линейной нагрузки от выгорания и зависимость окружных напряжений в оболочке от времени

В результате выполненных исследований определена методика проведения вероятностных расчетов. За основу принят метод GRS, который разработан в рамках CSAU подхода. Он использует формулу типа Wilks [14, 16] для определения необходимого количества запусков программы и до настоящего времени является наиболее используемым на практике.

В разработанном программном коде заложена возможность изменения количества и значений параметров, подлежащих варьированию.

По результатам разработки методики и анализа параметров кодов START-3, RAPTA-5.2, RELAP определена архитектура аппаратного обеспечения программного кода.



**Рис. 5.** Гистограмма распределения результатов 93 расчетов максимальной температуры оболочки (PCT), изменение температуры оболочки в процессе аварии в расчетах с реализацией max, nom, min PCT

Описана программная реализация общей блок-схемы решения задачи в виде программного кода (комплекса). Для него выполнен тестовый вероятностный расчет с учетом наиболее значимых параметров задачи. В коде реализован многовариантный расчет решения задачи. Код оснащен разработанным графическим интерфейсом для представления полученных результатов.

В комплексе реализована возможность выбора коммуникативных схем связей между кодами START-3, RAPTA-5.2, RELAP и, соответственно, выбора структуры итерационного цикла для последовательного уточнения входных данных, получаемых из перечисленных программ, и определения критерия прекращения итераций.



Разработанный код соответствует процедурам CSAU/EMDAP и позволяет получать реалистические оценки основных критериальных параметров твэлов, в частности, для условий LOCA, РСТ Ц максимальной температуры оболочки, ECR Ц максимальной эквивалентной степени окисления оболочки, с оценкой их неопределенностей в виде доверительного интервала и заданного уровня доверия. Комплекс включает программные коды START-3 и RAPTA-5.2 и интерфейсные данные кода RELAP.

Проведены тестовые расчеты по разработанному комплексу с использованием файлов эффективных коэффициентов теплоотдачи (со случайным множителем) и температур теплоносителя в LOCA, полученных в результате расчета по коду RELAP.

Тестовые примеры показали работоспособность разработанного комплекса.

*Авторы благодарны А.В. Плеханову за сотрудничество в выполнении работы.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. U S Federal Law 10 Code of Federal Regulation // Part 50 and Appendices.
2. B o y a c k B., et al. Quantifying reactor safety margins // Nuclear Engineering and Design. – 1990. – Vol. 119. Issue 1. – P. 1–117.
3. Y o u n g M. Y., et al., Application of code scaling applicability and uncertainty methodology to the large break loss of coolant // Nuclear Engineering and Design. – 1998. – Vol. 186. – Issue 1. – P. 39–52.
4. Z h a n g J., et al. Application of the WCOBRA/TRAC best-estimate methodology to the AP600 large-break LOCA analysis // Nuclear Engineering and Design. – 1998. – Vol. 186. – Issue 1. – P. 279–301.
5. O r t i z M. G., G h a n L. S. Uncertainty analysis of minimum vessel liquid inventory during a small break LOCA in a Babcock and Wilcox Plant: an Application of the CSAU methodology using the RELAP5/MOD3 computer code // Rep, NUREC/CR-5818, EGG-2665, Idaho National Engineering Lab., ID (1992).
6. B e s t estimate safety analysis for nuclear power plants: uncertainty evaluation // Safety reports series No. 52. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2008.
7. G l a e s e r H. GRS Method for Uncertainty and Sensitivity Evaluation of Code Results and Applications, Science and Technology of Nuclear Installations, 2008.
8. К о м п л е к с программ CaPPaPI для проведения вероятностных расчетов термомеханики тепловыделяющих элементов / С.М. Богатырь, М.П. Галанин, М.М. Горбунов-Посадов, А.С. Гусев и др. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 2012. В печати.
9. Г а л а н и н М. П., С а в е н к о в Е. Б. Методы численного анализа математических моделей. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 591 с.
10. М е д в е д е в А. В., Б о г а т ы р ь С. М., К о р ы с т и н Л. В., К у з н е ц о в В. И., Л а г о в с к и й В. Б., Х в о с т о в Г. А., Б и б и л а ш в и л и Ю. К. СТАРТ-3: Программа для прочностного и теплофизического расчета полномасштабного твэла в базовых и маневренных режимах работы твэлов тепловых и быстрых реакторов // ФНР ЯРБ, регистрационный номер 76 паспорта аттестации программного средства от 22.09.97.

11. Программное средство РАПТА-5.2 // НТЦ ЯРБ Ростехнадзора, паспорт аттестации ПС № 299 от 29.09.2011.
12. RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 Code Manual. Innovative Systems Software, LLC, 2003.
13. U. S. Nuclear Regulatory Commission, “Standard Review Plan”, NUREG/CR-0800, Rev.3.
14. Wilks S. S., Determination of sample sizes for setting tolerance limits // Annals of Mathematical Statistics. – 1941. – Vol. 12. – P. 91–96.
15. Glaeser H. Uncertainty evaluation of thermal-hydraulic code results“, Best estimate methods in nuclear installation safety analysis // Proc. Int. Mtg. Washington, DC, 2000. American Nuclear Society, La Grange Park, IL (2000) CD-ROM.
16. Pall L. and Makai M. Remarks on statistical aspects of safety analysis of complex systems // KEKI Atomic Energy Research Institute H-1525 Budapest 114 POB 49 Hungary, 2002.

Статья поступила в редакцию 27.07.2012