

P13-2010-59

Ким Тхэ Гюн, Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТВЭЛА
РЕАКТОРА **ИБР-2**
(СТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА)

Ким Тхэ Гюн, Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д.
Теплофизический анализ твэла реактора ИБР-2
(стационарная задача)

P13-2010-59

Представлены результаты теплофизического анализа тепловыделяющего элемента (твэла) быстрого импульсного реактора ИБР-2 с плутониевым топливом и натриевым теплоносителем. Максимальная температура в центре топлива в виде брикетов при максимальной тепловой нагрузке твэла (137,52 Вт/см) и для твэла со средним энерговыделением (109,31 Вт/см) — 1135 и 948 °С соответственно. Максимальная температура на внутренней поверхности топлива в виде втулок для максимально нагруженного твэла — 944 °С. Максимальная температура теплоносителя на выходе в канале при максимальной тепловой нагрузке твэла — 398 °С и его подогрев — 108 °С. Представлены результаты только для стационарного состояния реактора.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2010

Kim Tae Gyoun, Pelyolyshev Yu. N., Rogov A. D.
Thermal Analysis of a Fuel Rod in IBR-2 Pulsed Reactor
(Steady-State Problem)

P13-2010-59

Computational results of a thermal analysis for a fuel rod of fast pulsed reactor IBR-2 with plutonium as fuel and liquid sodium as coolant are presented. The maximum temperature in the center of rod-shaped fuel subjected to maximum thermal load (137.52 W/cm) and to average thermal load (109.31 W/cm) is 1135 and 948 °C, respectively. And the maximum temperature on an inner surface of hollow-shaped fuel subjected to maximum thermal load is 944 °C. The maximum temperature of a coolant on the output of the coolant channel with a fuel rod subjected to maximum thermal load is 398 °C and the heating of coolant is 108 °C. Only thermal analysis of a steady-state fuel rod is presented.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2010

ВВЕДЕНИЕ

В работе представлены результаты теплофизического анализа тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ) быстрого импульсного реактора ИБР-2 с натриевым теплоносителем и плутониевым топливом. Расчетный анализ был проведен по методике и программе [1], позволяющей вычислить распределение температур в топливе, в зазоре между топливом и оболочкой ТВЭЛ, в оболочке, а также в слое движущегося вблизи оболочки натрия [1–7].

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОГО АНАЛИЗА ТВЭЛА

В ТВЭЛ ИБР-2 топливом служат таблетки из спеченной двуокиси плутония, которые могут быть как втулочного типа (с отверстием в центре), так и брикетного (сплошные). Таблетки помещены в оболочку из нержавеющей стали и сверху в газовом промежутке поджаты пружиной.

Теплопередача в осевом направлении ТВЭЛ не учитывается, поскольку градиенты температуры по радиусу ТВЭЛ значительно больше, чем по высоте. Для численного решения методом конечных разностей ТВЭЛ разделяется по оси на сегменты. Каждый сегмент, в свою очередь, разделяется на ряд круговых элементов в радиальном направлении. Число сегментов в ТВЭЛ может выбираться произвольно, но обычно определяется высотой топливной таблетки и равно 22 или 44. Число круговых элементов в каждом сегменте равно: в топливе — 10, в зазоре — 1 и в оболочке — 3. При анализе температурного градиента по радиусу ТВЭЛ для каждого осевого сегмента использовалось одномерное уравнение теплопроводности. Предполагалось, что тепловые свойства топлива в кольцевом элементе зависят от температуры.

Уравнение теплопроводности на одном осевом сегменте можно представить следующим образом [1–3]:

$$\frac{\partial}{\partial t}[C_v(T, r)T(r, t)] = \nabla k(T, r) \nabla T(r, t) + q(r, t), \quad (1)$$

где T — температура; r — координата в радиальном направлении; C_v — объемная удельная теплоемкость; k — теплопроводность; q — энерговыделение.

Вид разностного уравнения для центральной и боковой области топлива, области зазора между таблеткой и оболочкой и для, собственно, оболочки существенно зависит от модельного представления обмена энергией между отдельными элементами твэла.

Отметим также, что конечный результат зависит от выбора модели представления теплофизических параметров отдельных элементов твэла (топлива, оболочки, газового промежутка), таких как коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и т.д. Поэтому, для объективности, в расчетах использовались несколько наиболее распространенных моделей оценки указанных параметров. Первый источник данных по теплофизическим параметрам материалов, входящих в состав твэла, — библиотека «A Library of Materials Properties for Light Water Reactor Accident Analysis» [8, 9]. Данные, взятые из этой библиотеки, отмечены в тексте как данные по модели MATPRO. Второй источник — данные, ранее применявшиеся для анализа твэла ИБР-2 [10]; в тексте отмечены как модель ИБР-2.

Распределение тепловыделения. Профиль распределения тепловыделения по радиусу определяется функцией распределения энерговыведения по формуле Робертсона [1–3]. Эта функция позволяет выполнить разделение переменных по времени и координате. Кроме того, использовались расчетные и экспериментальные данные по распределению энерговыведения по высоте активной зоны ИБР-2 [10–12].

Модель теплопроводности в зазоре. Теплопроводность в зазоре определяется суммой проводимости через излучение, теплопередачи через газ в зазоре таблетка–оболочка и теплопроводности через точки контакта твердых тел [1, 3, 4, 6, 7]. Для теплопроводности в зазоре использовалась измененная модель Росса-Строте [1, 2], а для теплопроводности газовой смеси — модель MATPRO [9].

Тепловая модель в газовом промежутке. Модель для расчета температуры газа в газовом промежутке твэла основана на предположениях о том, что температура верхней поверхности таблетки не зависит от температуры газа; газ хорошо перемешивается естественной конвекцией, и осевые температурные градиенты в пружине твэла и оболочке являются незначительными.

Принятая тепловая модель позволяет вычислить обмен энергии между газом и структурными компонентами — поддерживающей пружиной, верхней таблеткой и оболочкой. Обмен энергии между газом и структурными компонентами происходит путем естественной конвекции, проводимости и излучения [1].

Для теплопередачи путем естественной конвекции энергия передается газу от пружины и затем от газа к стенке оболочки или наоборот.

Перенос энергии излучением между пружиной и оболочкой включен в модель газового промежутка при помощи коэффициентов теплопередачи.

Учитывался также гамма-нагрев пружины и оболочки за счет гамма-излучения от деления плутония. Приблизительно 10% энергии от деления плутония выделяется в виде гамма-излучения.

Модель роста энтальпии и коэффициент теплопередачи теплоносителя. Энтальпия теплоносителя по оси активной зоны и во времени задается интегралом по пространственно-временному пути [1, 3]. Для вычисления коэффициента теплопередачи при вынужденной конвекции для однофазного состояния жидкометаллического теплоносителя используется отношение Диттуса–Болтера [1–5].

Коэффициент теплопроводности топлива. Теплопроводность компактных веществ, полученных методом порошковой металлургии, существенно зависит от пористости спеченной матрицы. Зависимость теплопроводности от пористости для керамических тел может быть представлена в аналитическом виде. Коэффициенты этой зависимости, в свою очередь, зависят от структуры пор, температуры и многих других факторов [8, 9].

Теплопроводность топлива ИБР-2 может быть описана двумя моделями: моделью MATPRO или моделью ИБР-2.

В модели MATPRO теплопроводность топлива зависит от температуры, плотности, отношения кислорода к металлу и содержания плутония в топливе [9].

В модели ИБР-2 используется температурная зависимость коэффициента теплопроводности диоксида плутония с теоретической плотностью и плотностью $10,0 \text{ г/см}^3$, представленная в работе [10], в диапазоне температур 200–1500 К.

Удельная теплоемкость и теоретическая плотность топлива. Теплоемкость топлива, как и теплопроводность, может быть описана моделями MATPRO и ИБР-2. Отметим, что данные, вычисленные по двум моделям, отличаются друг от друга [8–10].

Теоретическая плотность топлива определяется плотностью топлива при комнатной температуре и деформацией тепловых расширений.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Ниже на рис. 1–9 представлены основные результаты расчета по стационарному распределению температур в активной зоне ИБР-2: в топливе, зазоре и оболочке твэла. Для сравнения расчетные данные приведены для разных моделей теплопроводности и значений линейной мощности тепловыделения при средней мощности реактора 2 МВт. Распределения температур по высоте и радиусу в среднем сечении твэла даны для моделей теплопроводности MATPRO и ИБР-2 для максимально нагруженного твэла (максимальная ли-

нейная плотность энерговыделения $q_l^{\max} = 137,52$ Вт/см) и для твэла со средним по активной зоне максимальным энерговыделением ($q_l^{\max} = 109,3$ Вт/см).

При уменьшении или увеличении средней мощности значения температур будут линейно меняться с мощностью. Это справедливо для рабочих температур активной зоны ИБР-2 (для нормальных, не аварийных режимов) и только в первом приближении. Нагрев, например, внешней стороны топливных таблеток и оболочки твэла имеет нелинейный характер. Средняя температура топлива будет отличаться от расчетной максимальной на коэффициент неравномерности энерговыделения, который для ИБР-2 был измерен в начале кампании и оценен равным 1,54 [11]. В процессе эксплуатации реактора коэффициент неравномерности уменьшился и составил по расчету $\sim 1,25-1,30$.

ВЫВОДЫ

Анализ расчетных данных по термодинамике твэла ИБР-2 позволяет сделать следующие выводы.

1. Распределение температуры в топливных таблетках существенно зависит от используемых моделей теплопроводности топлива. Модель MATPRO

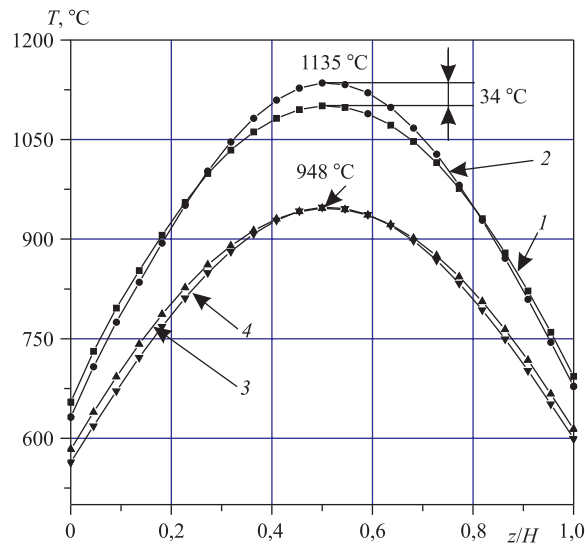


Рис. 1. Распределение температуры (T , °C) в центре топлива в виде брикетов по высоте (z/H) для моделей теплопроводности MATPRO (1, 3) и ИБР-2 (2, 4) для максимально нагруженного твэла (1, 2 — $q_l^{\max} = 137,52$ Вт/см) и для твэла со средним энерговыделением (3, 4 — $q_l^{\max} = 109,31$ Вт/см). Средняя мощность 2 МВт

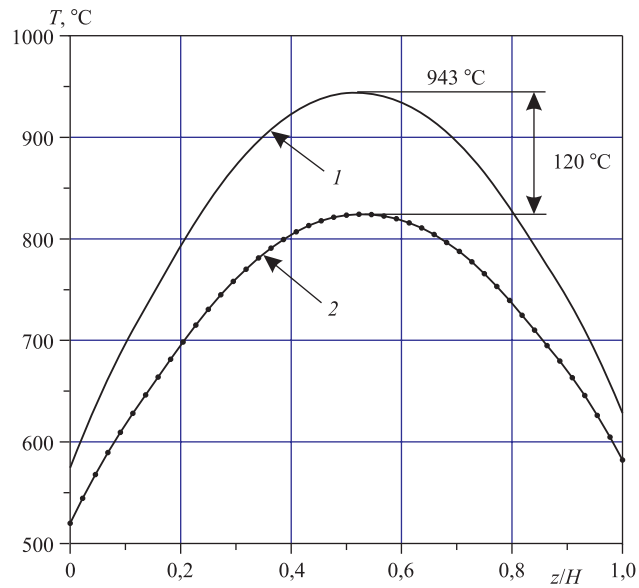


Рис. 2. Распределение температуры (T , °C) на внутренней поверхности топлива в виде втулок по высоте твэла для моделей теплопроводности MATPRO и ИБР-2 при $q_l^{\max} = 137,52$ Вт/см. 1, 2 — модели MATPRO и ИБР-2

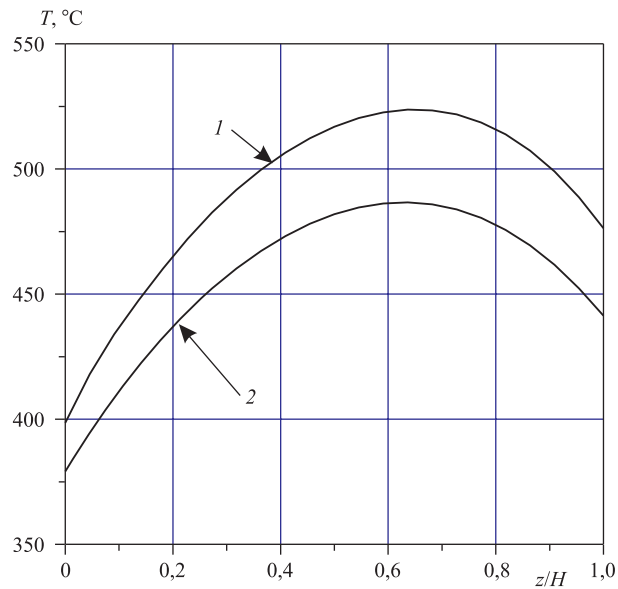


Рис. 3. Распределение температуры (T , °C) на внешней поверхности топлива в виде втулок по высоте твэла для модели теплопроводности MATPRO при различной мощности тепловыделения: 1 — $q_l^{\max} = 137,52$ Вт/см; 2 — $q_l^{\max} = 109,31$ Вт/см

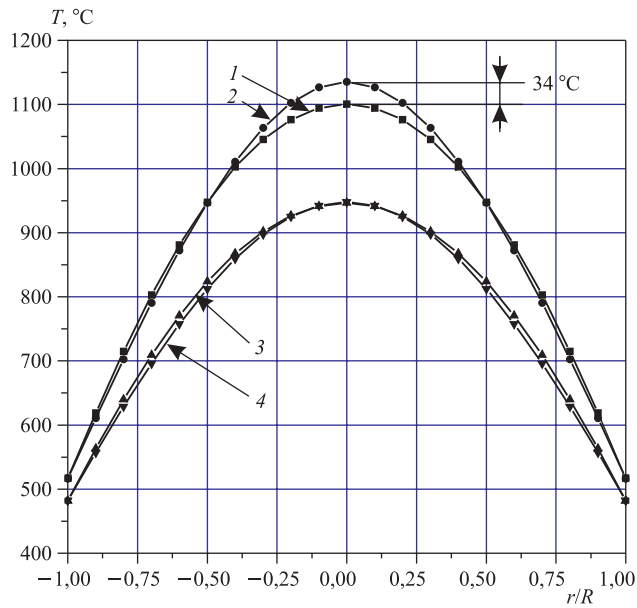


Рис. 4. Распределение температуры (T , °C) топлива в виде брикетов по радиусу (r/R , R — радиус топлива) в среднем сечении твэла для разных моделей теплопроводности при различной мощности тепловыделения: 1, 2 — модели МАТPRO и ИБР-2 при $q_l^{\max} = 137,52$ Вт/см; 3, 4 — модели МАТPRO и ИБР-2 при $q_l^{\max} = 109,31$ Вт/см

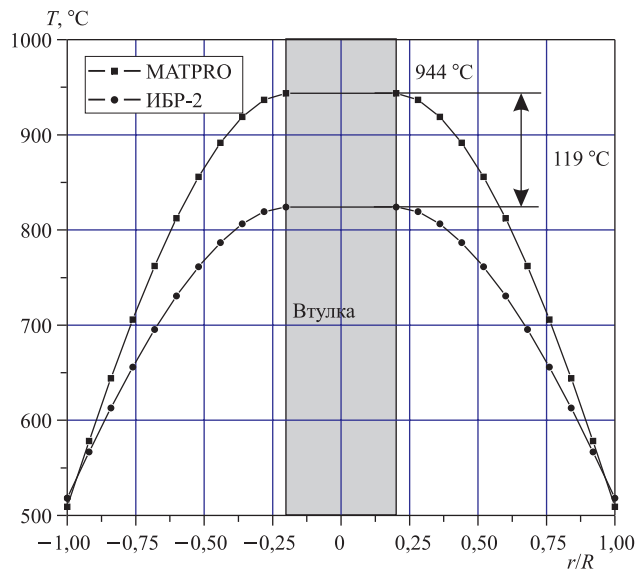


Рис. 5. Распределение температуры в топливе в виде втулок (T , °C) по радиусу в среднем сечении твэла при $q_l^{\max} = 137,52$ Вт/см

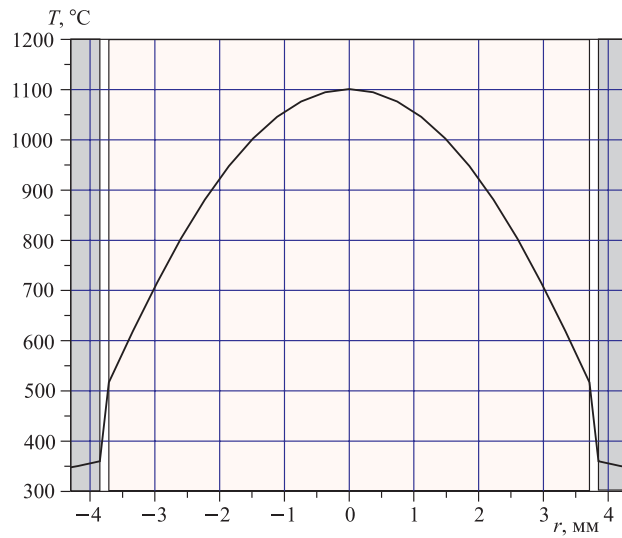


Рис. 6. Распределение температуры в твэле с топливом в виде брикетов по радиусу в среднем сечении твэла при $q_l^{\max} = 137,52$ Вт/см

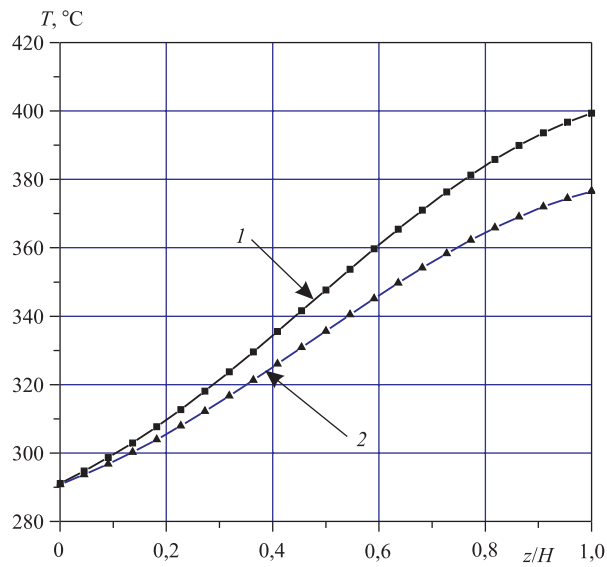


Рис. 7. Распределение температуры на внутренней поверхности оболочки по высоте для модели теплопроводности MATPRO при различных мощностях тепловыделения: 1 — $q_l^{\max} = 137,52$ Вт/см; 2 — $q_l^{\max} = 109,31$ Вт/см

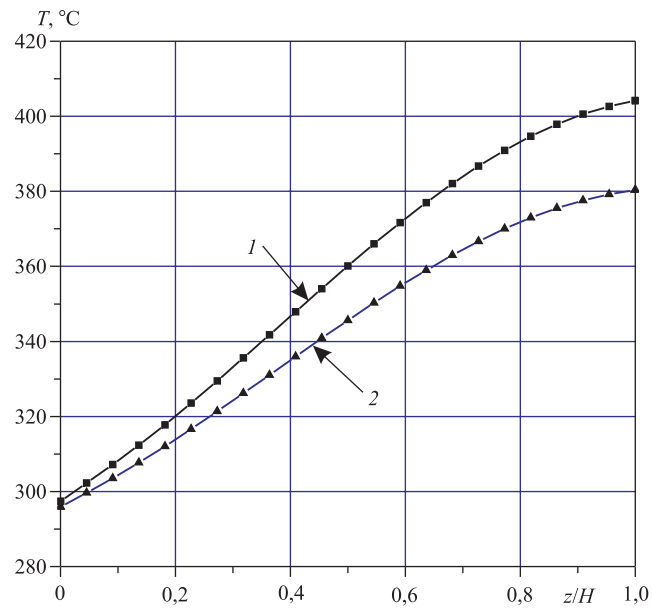


Рис. 8. Распределение температуры на внешней поверхности оболочки по высоте для модели теплопроводности MATPRO при различных мощностях тепловыделения: 1 — $q_l^{\max} = 137,52$ Вт/см; 2 — $q_l^{\max} = 109,31$ Вт/см

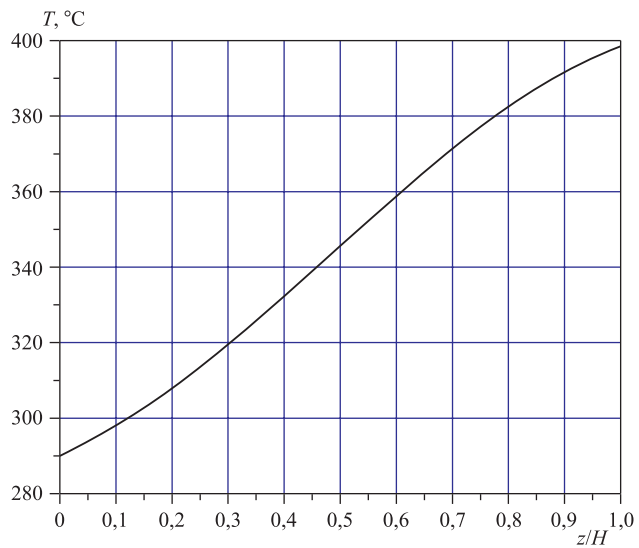


Рис. 9. Распределение температуры теплоносителя по высоте при $q_l^{\max} = 137,52$ Вт/см

дает значение максимальной температуры твэла на 120 °С больше, чем модель ИБР-2. Это объясняется существенным различием теплофизических параметров двух моделей в рабочем диапазоне максимальных температур ИБР-2 700–1100 °С, особенно теплопроводности топлива. По-видимому, это вызвано различием в оценке влияния на теплопроводность растрескивания (или пористости) двуокиси плутония при большом энерговыделении в импульсе мощности.

2. Максимальные температуры топлива в виде брикетов и втулок для максимально нагруженного твэла на мощности 2 МВт составляют 1135 и 944 °С соответственно, т. е. максимальные температуры топлива в виде втулок на 190 °С меньше, чем в брикетах.

3. Максимальные температуры оболочки твэла для топлива в виде брикетов и втулок для максимально нагруженного твэла на мощности 2 МВт практически совпадают и равны 404 и 403 °С соответственно.

4. Подогрев натрия на выходе из активной зоны для максимально нагруженного твэла на мощности 2 МВт и расходе натрия через активную зону 90 м³/ч составляет 108 °С. Расчетные оценки соответствуют среднему подогреву натрия для коэффициента неравномерности энерговыделения в активной зоне ИБР-2, равного 1,54 в начале кампании.

5. Сравнение результатов расчета с более ранними результатами теплофизического анализа твэла ИБР-2 [9, 10] показало их хорошее совпадение. Основное отличие связано с неопределенностью и расхождением теплофизических данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ким Тхэ Гюн, Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д.* Методика теплофизического анализа твэла реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-2010-58. Дубна, 2010.
2. *Cunningham M. E., Beyer C. E., Medvedev P. G.* FRAPTRAN: A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods. NUREG/CR-6739 (V. 1). PNNL-13576. 2001.
3. *Suzuki M., Saitou H.* Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-6 (Ver. 1). JAEA-Data/Code 2005-003. 2006.
4. *Suzuki M.* Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-V (Ver.1). JAERI-Data/Code 2000-030. 2000.
5. *Berna G. A., Beyer C. E.* FRAPCON-3: A Computer Code for the Calculation of Steady-State, Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup. NUREG/CR-6534 (V. 2). PNNL-11513. 1997.
6. *Suzuki M., Saitou H.* Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-IV (Ver. 2). JAERI-Data/Code 97-043. 1997.
7. *Sigeru M., Saitou H.* FEMAXI-III: A Computer Code for the Analysis of Thermal and Mechanical Behavior of Fuel Rods. JAERI-1298. 1985.

8. *Lanning D.D., Beyer C.E., Painter C.L.* FRAPCON-3: Modifications to Fuel Rod Material Properties and Performance Models for High-Burnup Application. NUREG/CR-6534 (V. 1), PNNL-1151. 1997.
9. *Allison C.M., Berna G.A.* SCDAP/RELAP5/MOD3.1 Code Manual Volume IV: MATPRO — A Library of Materials Properties for Light Water Reactor Accident Analysis. NUREG/CR-6150 EGG-2720 (V. 4). 2001.
10. Investigation of Plutonium Dioxide Fuel Elements: Experiments and Modeling (Properties of Fuel for the IBR-2 Reactor Fuel Rods). BNL-JINR Contract No. 5608. 1999.
11. *Пепельшев Ю. Н., Бабаев А. И., Гудовский В., Мелихов В. В., Шабалин Е. П.* Физический пуск реактора ИБР-2. Распределение плотности деления в активной зоне. Сообщение ОИЯИ Р3-12051. Дубна, 1979.
12. *Ломидзе В. Л., Мелихов В. В.* Термомеханический анализ твэлов импульсного реактора ИБР-2. Препринт ОИЯИ 3-11550. Дубна, 1978.

Получено 17 мая 2010 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 29.07.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,81. Уч.-изд. л. 0,95. Тираж 305 экз. Заказ № 57053.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/