

P13-2010-91

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

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТВЭЛА
РЕАКТОРА **ИБР-2**
(ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ)

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

P13-2010-91

Представлены расчетные результаты нестационарных температурных полей в тепловыделяющем элементе (твэле) реактора ИБР-2 на номинальной мощности 2 МВт и при частоте повторения импульсов 5 с^{-1} . Рассмотрен также процесс нагрева твэла при начале развития импульсов мощности в нулевой момент времени. Расчеты показали следующее. Подогрев максимально нагруженного твэла за импульс на внутренней поверхности топлива в виде втулок не превышает $18 \text{ }^\circ\text{C}$, а средние подогревы по радиусу в центре твэла и по объему топлива в данном твэле составляют 17,9 и $14,2 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно. Пульсации средней температуры теплоносителя на выходе из активной зоны и температуры оболочки твэла за импульс малы и составляют 0,2 и $1,1 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно. Значение тепловой инерционности твэла, равное 8,94 с, хорошо совпадает с экспериментальной оценкой временной константы основной составляющей мощностной обратной связи. Отмечено, что время достижения теплового баланса в твэле не более 50 с.

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 Element in the IBR-2 Pulsed Reactor
(Pulse Regime)

P13-2010-91

In the work computational results on transient temperature fields in a fuel rod of the IBR-2 reactor at the rated power 2 MW and frequency of repetition of impulses 5 s^{-1} are presented. And also in case of generation of power impulses from the zero moment, the heating process of a fuel rod is considered. Calculations have shown the following. The heating on an inner surface of hollow-shaped pellet under maximum thermal-loaded condition does not exceed $18 \text{ }^\circ\text{C}$, and average heatings on radius in the centre of a fuel rod and on fuel volume in this fuel rod are 17.9 and $14.2 \text{ }^\circ\text{C}$, respectively. Pulsations of the average temperature of coolant at the exit from the active zone and cladding of a fuel rod during a pulse are small and equal to 0.2 and $1.1 \text{ }^\circ\text{C}$, respectively. The value of thermal inertia of a fuel rod is equal to 8.94 s and well coincides with the experimental estimation of the time constant of the basic component in the power feedback. It is emphasized that the time of achievement of thermal balance in a fuel rod is not greater than 50 s.

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 рассмотрена задача распределения температур при импульсном энерговыделении в тепловыделяющем элементе (ТВэле) реактора ИБР-2: в топливе (в таблетках втулочного типа с отверстием и в брикетах без отверстия), оболочке ТВэла, а также в окружающем оболочку слое движущегося натрия.

Особенности подогрева отдельных элементов ТВэла в импульсе мощности ИБР-2 важны для понимания теплового состояния активной зоны и последующей оценки изгибных деформаций ТВэла, влияющих на динамику быстрой обратной связи и, соответственно, на стабильность работы реактора.

При проектировании и на стадии начальной эксплуатации ИБР-2 подобный расчет в том или ином варианте уже проводился, например, в работе [1]. В данном случае необходимость такого расчета возникла в связи со следующими обстоятельствами. Во-первых, необходима оценка нестационарного поля температур в активной зоне модернизированного реактора ИБР-2М, для которого данные ИБР-2 могли быть некоторым базовым (реперным) состоянием. Кроме того, для объяснения особенностей динамики температур в активной зоне ИБР-2 предыдущие расчеты были неполными. В-третьих, была создана новая программа, использующая более современные данные о теплофизических параметрах топлива, а также более эффективные методы численного решения такого рода задач.

1. ОСОБЕННОСТИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТВЭЛА ИБР-2 В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Общая методика теплофизического анализа и результаты стационарного анализа ТВэла реактора ИБР-2 представлены в работах [2, 3]. Ниже дано краткое описание особенностей использования данной методики для расчета нестационарного температурного поля в активной зоне ИБР-2 во время действия импульса мощности, а также в интервалах между импульсами.

В ТВэле ИБР-2 топливом служат таблетки из спеченной двуокиси плутония, которые могут быть втулочного (с отверстием в центре) и брикетного

типа (сплошные). Таблетки помещены в оболочку из нержавеющей стали и сверху в газовом промежутке поджаты пружиной.

Один раз за время 0,2 с (5 1/с) реактор с помощью модулятора реактивности переводится на короткое время из состояния глубокой подкритичности в состояние надкритичности на мгновенных нейтронах. Таким образом формируется импульс мощности, по форме близкий к гауссовой, длительностью 235 мкс при фоне между импульсами 7 % (для модулятора реактивности ПО-2М, 1996–2003 г.). Пиковая мощность при средней мощности 2 МВт равна 1500 МВт [4]. После замены подвижного отражателя в 2004 г. на ПО-3 полуширина импульса мощности составила 245 мкс, фоновая мощность 8,8 % [5].

Расчеты проводились для оценки динамики подогрева твэла с максимальным энерговыделением в импульсе. Использовались данные, соответствующие работе реактора с модулятором реактивности ПО-2М, т. е. полуширина импульса составляла 235 мкс, частота повторения импульсов 5 1/с и фон между импульсами 7 %. Уровень средней мощности ИБР-2 задавался равным номинальному 2 МВт, а расход и температура натрия на входе в активную зону были равны 90 м³/ч и 290 °С соответственно. Значения указанных выше параметров соответствуют номинальному режиму работы реактора.

Период сканирования энерговыделения во времени задавался равным 2 мкс, т. е. учитывались довольно малые интервалы изменения энерговыделения, значительно меньшие длительности импульсов мощности.

Теплопередача в осевом направлении твэла не учитывалась, поскольку градиенты температуры по радиусу твэла значительно превышают градиенты температуры по высоте. Для численного решения уравнений теплопереноса

Таблица 1. Некоторые геометрические параметры твэла и характеристики натриевого теплоносителя

Параметры твэла и теплоносителя	Твэл с топливом в виде брикетов	Твэл с топливом в виде втулок
Диаметр твэла, м	$8,6 \times 0,45 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \times 0,45 \cdot 10^{-3}$
Материал оболочки	Нерж. сталь	Нерж. сталь
Внешний диаметр топлива, м	$7,425 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
Внутренний диаметр топлива, м	0	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Плотность топлива, кг/м ³	$9,5 \cdot 10^3$	$10,1 \cdot 10^4$
Высота топлива, м	0,444	0,444
Высота газового промежутка, м	0,240	0,24
Теплоноситель	Жидкий натрий	
Температура теплоносителя на входе в активную зону, °С	290	
Расход теплоносителя, м ³ /ч	90	

использовался метод конечных разностей. Твэл по оси разделялся на сегменты. Каждый сегмент в свою очередь в радиальном направлении делился на ряд круговых элементов. Число осевых сегментов в твэле можно было выбирать произвольно, но обычно оно составляло 22 или 44. За нулевую отметку принималась нижняя часть столбика топливных таблеток. Число круговых элементов в каждом сегменте также можно было выбирать произвольно, но обычно в топливе оно было равно 10, в зазоре — 1 и в оболочке — 3. При анализе температурного градиента по радиусу твэла для каждого осевого сегмента использовалось одномерное уравнение теплопроводности. Учитывалось, что тепловые свойства топлива в кольцевом элементе зависят от температуры. Геометрические параметры твэла и некоторые данные по теплоносителю представлены в табл. 1 [5, 6].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И АНАЛИЗ

Рассмотрены две задачи.

- Стационарное в среднем тепловое состояние активной зоны. Характер подогрева твэла за время между двумя любыми соседними импульсами не меняется.

- Нестационарный тепловой режим активной зоны. Характер подогрева твэла от импульса к импульсу меняется.

2.1. Стационарное в среднем тепловое состояние активной зоны.

Результаты расчета подогрева топлива и оболочки твэла в импульсе мощности в стационарном в среднем состоянии активной зоны представлены на рис. 1–5. Рассмотрено распределение температуры в центре твэла (с координатой по высоте 0,22 м) с топливом в виде брикетов и втулок. Для этого слоя линейная мощность энерговыделения в топливе равна $1,3752 \cdot 10^4$ Вт/м и среднее по твэлу объемное энерговыделение для брикетов и втулок $5,798 \cdot 10^8$ и $6,001 \cdot 10^8$ Вт/м³ соответственно. Распределение мощности энерговыделения в топливе взято из работы [7].

На рис. 1 показан подогрев топлива ($\Delta T = T - T_0$, T_0 — установившаяся температура перед началом развития импульса мощности) в виде брикетов в центре и на внешней поверхности максимально нагруженного твэла. Значения установившихся температур перед началом развития импульса мощности для разных элементов твэла приведены в табл. 2. Как видно из рис. 1, подогрев топлива в центре меняется во времени практически линейно, на поверхности топлива линейность нарушается. Отмеченный характер подогрева топлива в центре связан с тем, что время спада температуры между импульсами (0,2 с) намного меньше постоянной времени тепловой инерционности твэла, которая, как показано в п. 2.2, равна ~ 9 с. На внешней стороне топлива отклонение от линейного спада температуры объясняется особенностью теплопередачи в зазоре между топливом и оболочкой.

Для топлива в виде втулок характер подогрева в импульсе практически совпадает с подогревом топлива в виде брикетов.

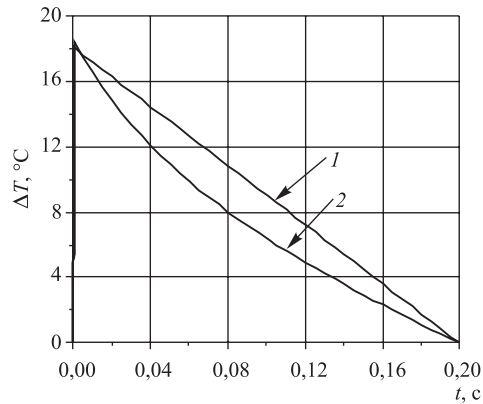


Рис. 1. Подогрев ΔT в центре (1) и на внешней поверхности (2) топлива в виде брикетов в максимально нагруженном твэле в зависимости от времени t (с) за период следования импульсов мощности

Таблица 2. Значения установившихся температур T_0 перед началом развития импульса мощности в максимально нагруженном твэле. Температура натрия на входе в активную зону равна $290\text{ }^{\circ}\text{C}$

Место в твэле	$T_0, \text{ }^{\circ}\text{C}$	
	Топливо в виде брикетов	Топливо в виде втулок
Топливо		
Центр топлива	988	898
Внешняя поверхность	513	507
Оболочка		
Внутренняя поверхность	360	360
Внешняя поверхность	347	347
Теплоноситель		
На выходе из АЗ	398	398

На рис. 2 показан подогрев топлива по радиусу твэла от центра к периферии топлива. Как видно из рисунка, относительный подогрев топлива увеличивается в направлении от центра к периферии твэла и падает вблизи внешней поверхности топлива. Этот эффект связан с ростом удельной теплоемкости топлива с температурой. Последняя уменьшается от центра к периферии. Небольшое падение относительного подогрева вблизи поверхности топлива связано с особенностью теплопередачи в зазоре. Отметим также,

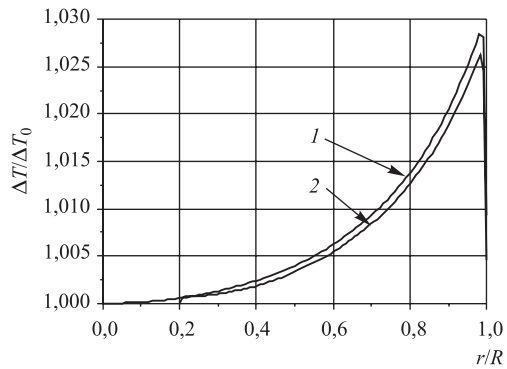


Рис. 2. Относительный подогрев топлива за импульс $\Delta T/\Delta T_0$ по радиусу твэла r/R для брикетов (1) и втулок (2) (R — радиус топливной таблетки, $\Delta T_0 = 18$ °С для брикетов и 17,7 °С для втулок)

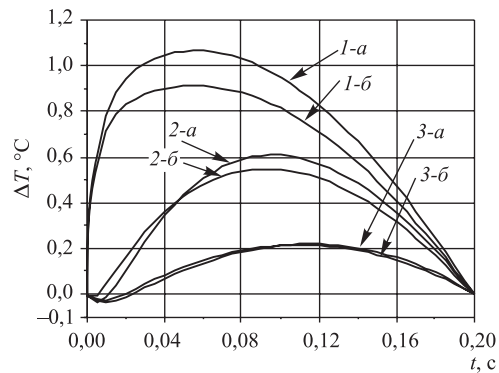


Рис. 3. Подогрев ΔT внутренней (1) и внешней (2) поверхности оболочки максимально нагруженного твэла и теплоносителя на выходе из активной зоны (3) во времени t (с) за период следования импульсов мощности для топлива в виде брикетов (а) и втулок (б)

что относительный подогрев топлива в виде втулок несколько меньше, чем для брикетов (тепловое сопротивление втулок меньше).

На рис. 3 показан установившийся процесс подогрева внутренней и внешней поверхностей оболочки твэла и подогрев теплоносителя за период следования импульсов мощности. Максимальный перепад температуры на внутренней и внешней поверхности оболочки твэла составляет 1,1 и 0,6 °С и достигается через 0,06 и 0,1 с после действия импульса мощности соответственно. Для теплоносителя эти данные составляют 0,22 °С и 0,12 с.

Как видно из рис. 3, подогрев оболочки твэла за импульс мал и не превышает $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Подогрев оболочки твэла с топливом в виде брикетов в среднем на $\sim 15\%$ выше, чем с топливом в виде втулок. Подогрев натрия в импульсе практически не зависит от вида топлива. Из рис. 3 также видно, что непосредственно после действия импульса мощности в интервале времени $\sim 20\text{ мс}$ температура внешней поверхности оболочки твэла и температура теплоносителя несколько снижается ($\sim 0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$). Анализ показал, что этот эффект вызван инерционностью передачи тепла от места импульсного энерговыделения в топливе к оболочке твэла и натрию.

Средние подогревы по радиусу топлива в центре твэла и по объему топлива в виде брикетов за импульс равны $18,2$ и $14,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, для втулок — $17,9$ и $14,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно.

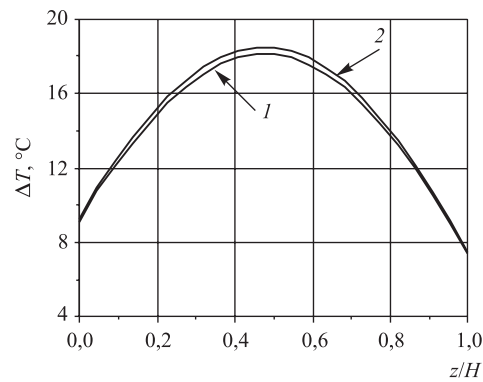


Рис. 4. Подогрев ΔT в центре (1) и на поверхности (2) топлива в виде брикетов в осевом направлении твэла (z) за импульс ($H = 0,444\text{ м}$)

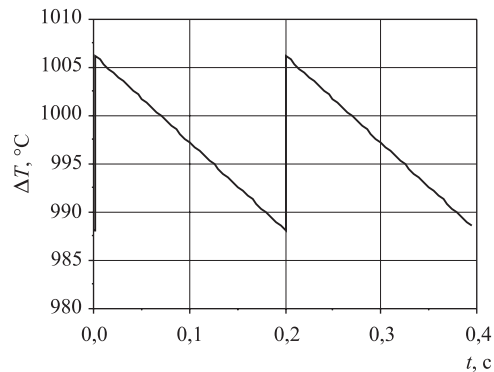


Рис. 5. Изменение температуры T ($^{\circ}\text{C}$) в центре топлива в виде брикетов для максимально нагруженного твэла за время действия двух импульсов мощности

На рис. 4 приведен подогрев в центре и на поверхности топлива в виде брикетов в осевом направлении твэла за импульс.

На рис. 5 показано изменение температуры в центре топлива в виде брикетов во время действия двух импульсов мощности в установившемся в среднем тепловом режиме твэла. Как видно из рис. 5, максимальная температура топлива после появления импульса мощности составляет $1006\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как приращение температуры за импульс не превышает $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, что практически не влияет на тепловое состояние твэла. Температура твэла в импульсе намного ниже температуры плавления топлива $2350\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6].

2.2. Нестационарный тепловой режим активной зоны. На рис. 6 и 7 показан характер нагрева топлива в виде брикетов для среднего сечения максимально нагруженного твэла (0,22 м), оболочки и натрия на выходе из активной зоны за импульс, 1 с, 10 с и 30 с при начале развития импульсов мощности в нулевой момент времени.

Тепловой баланс наступает за время не более 50 с. В оболочке твэла время достижения асимптотического значения температуры $404\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет ~ 24 с, в центре топлива 23 с. Эти данные позволили оценить значения тепловой инерционности твэла, параметра, характеризующего динамические свойства ИБР-2 на мощности.

Расчетные оценки постоянных времени топлива и топлива с оболочкой твэла составили 8,46 и 8,94 с соответственно. В качестве значения постоянной времени твэла взято 8,94 с. Оно хорошо совпадает с экспериментальной оценкой постоянной времени основной компоненты быстрой мощностной обратной связи, определяемой тепловой инерционностью твэла (7–11 с) [8].

На рис. 6, б и в отчетливо прослеживается некоторая закономерность в нагреве топлива в первые несколько секунд после начала действия импульсов мощности. Видно, что в первую секунду температура топлива между импульсами мощности возрастает, дальше наблюдается увеличивающийся со временем спад и в конечном итоге устанавливается некоторое динамическое равновесие. Эта ситуация близка к реальной, поскольку в расчетах учитывался фон между импульсами. Фоновая мощность дополнительно нагревает топливо, а поскольку из-за большой инерционности твэла спад температуры между импульсами в первые секунды работы реактора мал, температура топлива растет.

Подогрев оболочки твэла в течение первой секунды после начала действия импульсов мощности, как показано на рис. 7, не превышает $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом из рис. 7, а видно, что средняя часть оболочки в течение первых 0,5 с нагревается несколько больше, чем ее верхняя часть. Это связано с неравномерностью распределения энерговыделения в топливе, задержкой теплопередачи от топлива через зазор к оболочке и скоростью теплоносителя. Энерговыделение в средней части топлива $1,3726 \cdot 10^4$ Вт/м более чем в 2 раза превышает энерговыделение в его верхней части $5,513 \cdot 10^3$ Вт/м. Теплоноситель, охлаждающий среднюю часть поверхности оболочки твэла, достигает

верхнюю часть активной зоны только через $\sim 0,08$ с. Отсюда ясно, что в начале действия импульсов мощности нагрев средней части оболочки идет быстрее верхней.

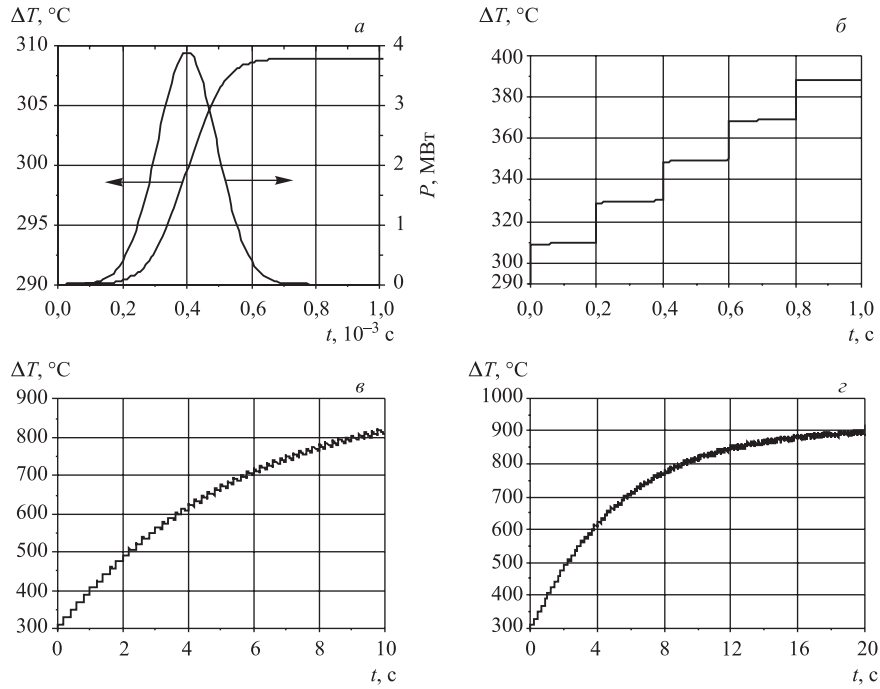


Рис. 6. Нагрев внутренней поверхности топлива в виде втулок в максимально нагруженном твэле за импульс (а), за время 1 с (б), 10 с (в) и 20 с (г) при начале развития импульсов мощности в нулевой момент времени. Температура натрия на входе в активную зону 290°C . На рис. а представлено изменение мощности, выделяемой в твэле, за импульс

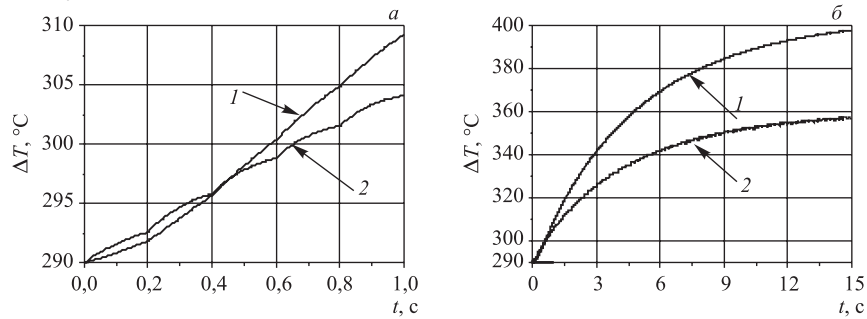


Рис. 7. Нагрев середины оболочки максимально нагруженного твэла в его верхней (1) и средней частях (2) за 1 с (а) и 15 с (б) при начале развития импульсов мощности в нулевой момент времени. Температура натрия на входе в активную зону 290°C

3. ВЫВОДЫ

Расчетный анализ стационарного и нестационарного подогрева твэла в импульсном режиме работы ИБР-2 с топливом в виде таблеток брикетного и втулочного типа на средней мощности 2 МВт и частоте повторения импульсов 5 1/с показал следующее.

1. Подогрев за импульс центра топлива в виде брикетов в максимально нагруженном твэле составляет 18 °С, в виде втулок 17,7 °С.
2. Средние подогревы по радиусу топлива в центре твэла и по объему топлива в твэле за импульс равны: для брикетов 18,2 и 14,5 °С, для втулок 17,9 и 14,2 °С соответственно.
3. Пульсации средней температуры теплоносителя на выходе из активной зоны малы и не превышают 0,2 °С.
4. Пульсации температуры оболочки твэла не превышают 1,1°С.
5. Значение тепловой инерционности твэла, равное 8,94 с, хорошо совпадает с экспериментальной оценкой временной константы основной составляющей мощностной обратной связи.
6. Время достижения теплового баланса в твэле не более 50 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ломидзе В. Л., Мелихов В. В. Термомеханический анализ твэла импульсного реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ 3-11550. Дубна, 1978.
2. Ким Тхэ Гюн, Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д. Методика теплофизического анализа твэла реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-2010-58. Дубна, 2010.
3. Ким Тхэ Гюн, Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д. Теплофизический анализ твэла реактора ИБР-2 (стационарная задача). Сообщение ОИЯИ Р13-2010-59. Дубна, 2010.
4. Ananiev V. D. et al. Theoretical analysis of the IBR-2 fuel rods (Report), IPP-BNL-034-RU. Russia, 2000.
5. Ананьев В. Д. и др. Пуск и исследования основных характеристик реактора ИБР-2 с новым модулятором реактивности гетерогенного типа. Сообщение ОИЯИ Р13-2004-156. Дубна, 2004.
6. Ananiev V. D. et al. The state of fuel rods of the IBR-2 pulsed reactor operated to 2000. The trends for attainment of ultimate fuel burn-up. BNL-JINR Contact N5608. Russia, 2000.
7. Сборка тепловыделяющая и элемент тепловыделяющий реактора ИБР-2. ИНБ № ИБР-2/2739. 1994.
8. Бондарченко Е. А., Пепельшев Ю. Н., Попов А. К. Экспериментальное и модельное исследование особенностей динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2 // ЭЧАЯ. 2004. Т. 35, вып. 4. С. 951.

Получено 5 августа 2010 г.

Редактор Е. В. Сабаева

Подписано в печать 11.10.2010.

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

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,91. Тираж 305 экз. Заказ № 57113.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/