

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЭЛОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА

В.Б. Круглов, А.Б. Круглов, И.Г. Поздеева, В.С. Харитонов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва



Предложена методика определения теплофизических свойств тепловыделяющих элементов энергетических реакторов – теплопроводности, теплоемкости топлива и тепловой проводимости контакта топливо-оболочка. Приведены результаты проверки методики определения теплоемкости топливного сердечника твэла реактора ВВЭР.

Ключевые слова: измерение теплофизических свойств твэлов, нестационарные методы.

Keywords: the measurement of thermophysical properties of the fuel rods, non-stationary methods.

ВВЕДЕНИЕ

Тепловыделяющие элементы с топливом из двуокиси урана в настоящее время используются в энергетических реакторах на тепловых нейтронах и в реакторах на быстрых нейтронах. Для надежного прогнозирования работоспособности энергетической ядерной установки необходимы данные по теплофизическим свойствам (ТФС) топлива и тепловыделяющего элемента в целом. Физические процессы, протекающие в топливе работающего реактора, в настоящее время известны, тем не менее, необходимы результаты прямых измерений ТФС. В реакторах на быстрых нейтронах предполагается использовать топливные композиции на основе инертных матриц. Эксперименты в исследовательских реакторах показали возможность получить выгорания до 200 МВт-сут/кгU. Измерения теплопроводности, проведенные для таких композиций, дают аномально высокие значения [1]. Нельзя забывать и о перспективности использования виброуплотненного топлива для энергетических ядерных реакторов. Вместе с тем, данные по теплофизическим свойствам такого топлива и тепловыделяющих элементов ограничены.

Существуют несколько подходов к определению ТФС топлива и твэла: измерения в петлях исследовательских реакторов; работа с фрагментами твэлов после выдержки в бассейнах хранения; работа с малыми количествами топлива, извлеченными из твэлов либо предварительно облученными в исследовательском реакторе. Каждый из этих подходов обладает достоинствами и ограничениями. Естественно, что совокупность всех подходов позволяет получить наиболее полную информацию о ТФС такого сложного объекта как твэл энергетического реактора.

© В.Б. Круглов, А.Б. Круглов, И.Г. Поздеева, В.С. Харитонов, 2010

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача определения ТФС твэлов энергетических реакторов может быть поставлена следующим образом: определить теплопроводность λ , теплоемкость топлива c , проводимость теплового контакта между топливом и оболочкой a без разрушения твэла, используя только изменение температуры поверхности оболочки при ее нагреве. Свойства оболочки считаются известными. Наиболее информативными для получения сведений о ТФС твэлов являются нестационарные методы, которые позволяют определить температуропроводность a топлива, тепловую проводимость контакта a между топливом и оболочкой [2]. Для твэлов с керамическим топливом (неэлектропроводный топливный сердечник) метод состоит в нагреве оболочки коротким импульсом тока длительностью 0,01 секунды. По двум характерным временам спада температуры оболочки, например, $\tau_{1/2}$ и $\tau_{1/4}$ (времена уменьшения температуры на 1/2 и 1/4 от максимального значения) находят a и α . Определение температуропроводности и контактной проводимости границы топливо-оболочка возможно, если известно отношение объемных теплоемкостей оболочки и топлива. Таким образом, определение теплоемкости твэла является необходимой составляющей методики исследования ТФС нестационарными методами. Необходимо отметить, что величина α , которая определяется в таких измерениях, является, скорее, вспомогательным параметром, так как измерения проводятся при условиях, близких к изотермическим. Полученные результаты для α

не могут напрямую переноситься на условия работы твэла в реакторе из-за различий в термонапряженном состоянии.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ТВЭЛА

При определении ТФС тепловыделяющий элемент помещается в термостатируемый объем. Оболочка твэла нагревается импульсами тока. Производится регистрация температуры поверхности оболочки, тепловыделения в ней и температуры термостата.

В случае нагрева оболочки периодическими импульсами тепла (рис. 1) твэл выходит на квазистационарный температурный режим (рис. 2). Температура каждой точки твэла колеблется около средней температуры, общей для всех точек твэла, период колебаний определяется периодом изменения тепловыделения.

Из рисунка 2 следует, что охлаждение твэла происходит квазилинейно. Скорость остывания топлива и оболочки близки и слабо зависят от времени. Будем считать оболочку изотермичной. Отмеченные особенности упрощают решение нестационарной задачи тепло-

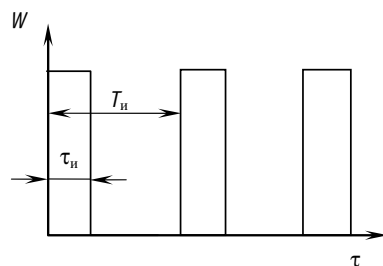


Рис. 1. Зависимость мощности тепловыделения W в оболочке твэла от времени

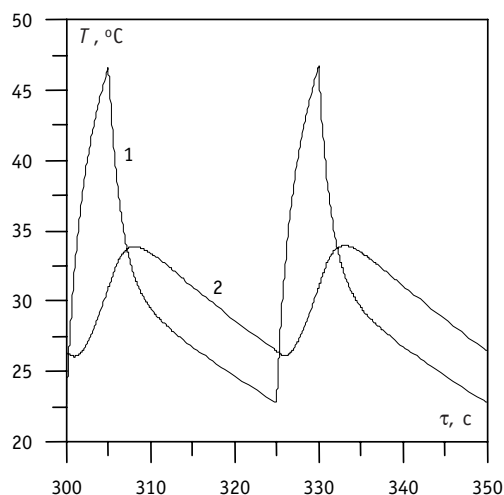


Рис. 2. Изменение температуры оболочки (1) и центра топлива (2) в квазистационарном режиме (расчет методом конечных элементов для твэла ВВЗР). Температура термостата $T_2 = 0^\circ\text{C}$

проводности и дают методику определения суммарной теплоемкости твэлов энергетических реакторов.

РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Геометрия задачи теплопроводности представлена на рис. 3. Будем полагать, что поле температур не зависит от z .

Обозначим $\Theta_0 = T_0 - T_2$ и $\Theta_1 = T_1 - T_2$ (T_2 – температура термостата). Нестационарное поле температуры в топливе $\Theta_1(r, \tau)$ и оболочке $\Theta_0(r, \tau)$ твэла описывается уравнениями

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = \lambda_1 \nabla^2 \Theta_1, \quad (1)$$

$$c_0 \rho_0 \frac{\partial \Theta_0}{\partial \tau} = \lambda_0 \nabla^2 \Theta_0 + q_v, \quad (2)$$

где c_1, ρ_1, λ_1 и c_0, ρ_0, λ_0 – теплоемкость, плотность, теплопроводность топлива и оболочки соответственно; q_v – объемная плотность тепловыделения

в оболочке. Граничное условие на внешней поверхности оболочки имеет вид

$$\lambda_0 \frac{\partial \Theta_0}{\partial r} = -\alpha_0 \Theta_0, \quad (3)$$

где α_0 – коэффициент теплоотдачи между поверхностью оболочки и термостатом. Условия на границе топливо-оболочка при идеальном контакте записываются как

$$\lambda_0 \frac{\partial \Theta_0}{\partial r} = \lambda_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial r}, \quad \Theta_0 = \Theta_1, \quad (4)$$

а при неидеальном контакте

$$\lambda_0 \frac{\partial \Theta_0}{\partial r} = \lambda_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial r} = -\alpha_1 (\Theta_0 - \Theta_1), \quad (5)$$

где α_1 – тепловая проводимость контакта между топливом и оболочкой. В центре топлива или на поверхности r_0 тепловой поток равен нулю. Начальные значения Θ_0 и Θ_1 равны нулю.

Интегрирование (1), (2) с весом $2\pi r$ по радиусу и использование условия изотермичности оболочки дает уравнение теплового баланса для единицы длины твэла

$$C_0 \frac{d\Theta_0}{d\tau} = -2\pi R \alpha_0 \Theta_0 - 2\pi R_m \lambda_1 \frac{\partial \Theta_1(R_m, \tau)}{\partial r} + W_1(\tau), \quad (6)$$

связывающее теплоемкость единицы длины оболочки твэла C_0 с параметрами теплового процесса. В равенстве (6) первое слагаемое в правой части – утечки тепла с единицы длины оболочки к термостату, второе слагаемое – поступление тепла в единицу длины оболочки от топлива, $W_1(\tau)$ – тепловыделение в единице длины оболочки, R – внешний радиус оболочки, R_m – радиус топлива. На участке квазилинейного изменения температуры допущение об изотермичности оболочки позволяет определить тепловой поток от топлива к оболочке. Рассмотрим случай топливной таблетки без центрального отверстия. Далее используется подход, предложенный в работе [3], где изменение температур задается полиномом. Представим Θ_0 и Θ_1 в виде

$$\begin{aligned} \Theta_0 &= b_0 + b_1 \tau + b_2 \tau^2, \\ \Theta_1 &= f_0(r) + f_1(r) \tau + f_2(r) \tau^2. \end{aligned} \quad (7)$$

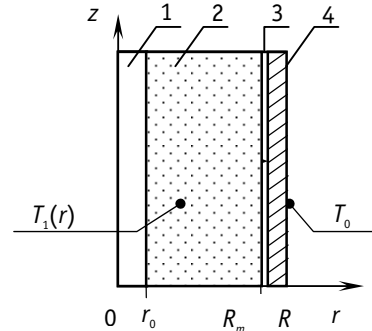


Рис. 3. Геометрия задачи:
1 – центральное отверстие топливной таблетки; 2 – топливная таблетка; 3 – зазор между топливом и оболочкой; 4 – оболочка твэла; T_0 – температура поверхности оболочки; T_1 – топлива

Функции $f_0(r)$, $f_1(r)$, $f_2(r)$ определяются из уравнений

$$\nabla^2 f_2 = 0, \nabla^2 f_1 = (2/a_1)f_2, \nabla^2 f_0 = (1/a_1)f_1$$

с граничными условиями

$$\frac{df_i}{dr} = 0, r=0; \quad \frac{df_i}{dr} = -\alpha_1(f_i - b_i), \quad i=0, 1, 2, r=R_m.$$

Для функции f_2 решение очевидно: $f_2 = b_2$, далее вычисляются f_1 и f_0 . Подстановка Θ_1 в (6) и сравнение коэффициентов при одинаковых степенях r дает на участке квазилинейного изменения температуры оболочки равенства

$$C_\Sigma = -\pi R \alpha_0 (b_1/b_2), \quad (8)$$

$$C_\Sigma = -2\pi R \alpha_0 (b_1/b_2) + C_1 R_m^2 (1+4/Bi) \cdot (b_1/b_2)/4a_1, \quad (9)$$

где C_Σ – теплоемкость единицы длины твэла; C_1 – теплоемкость единицы длины топлива; $Bi = \alpha_1 R_m / \lambda_1$. Следует отметить, что соотношение (8), в принципе, позволяет определить C_Σ без привлечения данных по теплопроводности топлива и тепловой проводимости контакта топливо-оболочка, однако погрешность результата будет большой, так как величина b_2 мала и входит в выражение (8) в степени минус единица. Таким образом, для определения суммарной теплоемкости твэла необходимо использовать соотношение (9) с привлечением данных по теплопроводности топлива и тепловой проводимости контакта топливо-оболочка.

ПРОВЕРКА РАСЧЕТНЫХ СООТНОШЕНИЙ

Для проверки соотношения (9) проводилось численное моделирование температурных полей в твэлах энергетических реакторов (ВВЭР, БН) методом конечных элементов. На модели твэла реактора ВВЭР с топливными таблетками из диоксида урана без центрального отверстия проведена экспериментальная проверка полученной методики.

Моделировались поля температур в твэле на квазистационарном участке нагрева. Теплопроводность топлива задавалась в интервале 2–5 Вт/(м·К), тепловая проводимость контакта топливо – оболочка $\alpha_1 = 1,4 \cdot 10^3$ Вт/(м²·К). Коэффициент теплоотдачи от поверхности оболочки к термостату α_0 задавался в интервале 50–200 Вт/(м²·К), величина объемного тепловыделения в оболочке $q_v = 5 \cdot 10^6$ Вт/м³.

По рассчитанным термограммам определялись b_0 , b_1 , b_2 , рассчитывалось C_Σ по соотношению (9) и сравнивалось с величиной C_Σ , которая вычислялась из исходных данных для численной модели. На рисунке 4а, б приведены относительные погрешности определения C_Σ по соотношению (9). Можно заключить, что относительная погрешность определения C_Σ по формуле (9) не превосходит 2% для твэлов реактора БН и 3–4 % – для ВВЭР. Анализ показывает, что погрешность опреде-

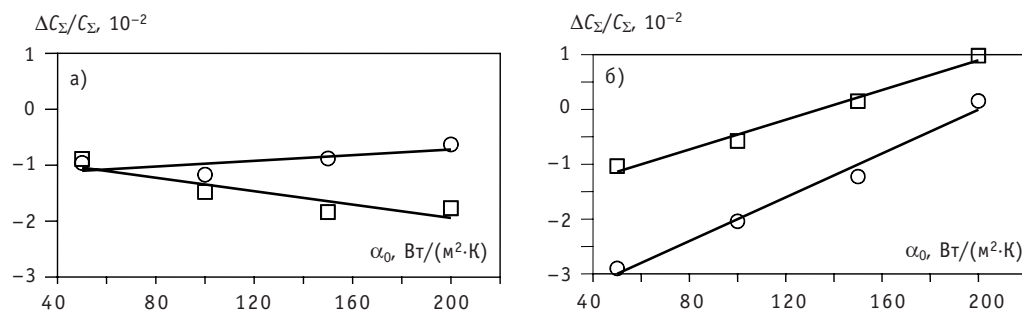


Рис. 4. Относительная погрешность определения C_Σ твэла БН и твэла ВВЭР (а, б): \circ – $\lambda_1 = 2$ Вт/(м·К); \square – $\lambda_1 = 5$ Вт/(м·К)

ления C_{Σ} для твэла реактора ВВЭР может быть уменьшена, если учесть небольшое отклонение температуры оболочки от изотермичности. В этом случае погрешность уменьшится до 2%.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТФС ТВЭЛОВ РЕАКТОРОВ БН

Методика определения ТФС твэлов реакторов БН состоит в комбинации двух измерений. В первом измерении твэл нагревается периодическими импульсами, выходит на квазистационарный режим. Измеряется мощность тепловыделения на оболочке, температура оболочки и термостата. По этим данным вычисляется коэффициент теплоотдачи от оболочки к термостату α_0 с использованием равенства

$$W_{\text{ср}} = 2\pi R \alpha_0 \Theta_{\text{ср}}, \quad (10)$$

где $W_{\text{ср}}$ и $\Theta_{\text{ср}}$ – средние за период нагрева мощность тепловыделения в единице длины оболочки и подогрев оболочки относительно термостата. На участке квазилинейного изменения температуры определяются параметры b_0 , b_1 , b_2 и рассчитывается в первом приближении теплоемкость единицы длины твэла по формуле

$$C_{\Sigma 1} = (W_{\text{ср}} / \Theta_{\text{ср}}) \cdot \frac{b_0}{b_1}. \quad (11)$$

Во втором измерении оболочку нагревают коротким импульсом тока. По термограмме находят характерные времена $\tau_{1/2}$ и $\tau_{1/4}$ и в первом приближении находят a_1 и Bi . Далее по формуле (9) уточняется значение $C_{\Sigma 2}$ и находят новые значения a_1 и Bi . Как правило, достаточно двух итераций. Следует пояснить, почему рассматриваются твэлы реакторов БН. Причиной является трудность реализации нагрева оболочки твэла реактора ВВЭР коротким импульсом тока. Создание периодического нагрева оболочек твэлов ВВЭР и БН не вызывает трудностей. Для твэлов ВВЭР просто реализуется нагрев импульсом тока длительностью 0,5–2 с и использование методики, предложенной в работе [4]. В этом случае метод периодического нагрева позволяет определить теплоотдачу от поверхности оболочки к термостату α_0 , а также дает простое соотношение, связывающее C_{Σ} с температуропроводностью топлива и тепловой проводимостью контакта топливо-оболочка. Далее должна следовать итерационная процедура определения теплофизических свойств твэла

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ

Измерения теплоемкости модельного твэла реактора ВВЭР по изложенной методике, были проведены на установке Импульс-П (рис. 5). Установка состоит из

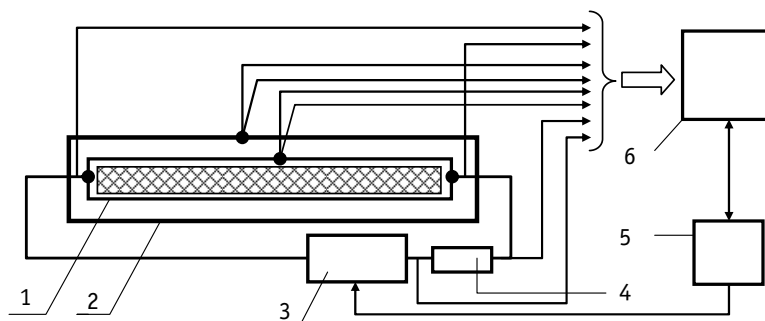


Рис. 5. Экспериментальная установка Импульс-П: 1 – твэл; 2 – термостат; 3 – управляемый источник напряжения; 4 – образцовое сопротивление; 5 – блок управления источником напряжения; 6 – ПК

исследуемого твэла, помещенного в термостат, управляемого источника напряжения, блока управления источником, персонального компьютера. На оболочку твэла подавались импульсы напряжения прямоугольной формы, заполненные квазисинусоидальным сигналом частотой 50 Гц. Задание параметров импульсов ($\tau_{\text{и}} = 1-10$ с; $T_{\text{и}} = 1-60$ с) осуществлялось программно с использованием блока управления и ПК. Сигналы термопар оболочки твэла и термостата, падения напряжений на оболочке твэла и образцовом сопротивлении фиксировались в памяти ПК.

Поскольку для определения свойств топливного сердечника необходимо знать теплоемкость оболочки, то измерения были начаты именно с этого и одновременно проверялась работа установки в целом.

На оболочку твэла реактора ВВЭР без топливного сердечника длиной 0,5 м подавался одиночный импульс или периодические импульсы и регистрировались изменение термоэдс термопары на оболочке во времени, падение напряжения на оболочке и образцовом резисторе. Вычислялась мощность тепловыделения.

Определение теплоемкости оболочки в режиме одиночных импульсов проводилось по соотношениям для калориметра с изотермической оболочкой, при этом можно было определить параметр $2\pi R\alpha_0$, характеризующий утечки тепла. В режиме периодических импульсов теплоемкость определялась по соотношению (11).

Результаты измерения теплоемкости оболочки твэла реактора ВВЭР (сплав Э-110) приведены на рис. 6. Независимо теплоемкость материала измерялась в калориметре с изотермической оболочкой (масса образца 3 г) в вакууме [5].

Сравнение полученных экспериментальных результатов с приведенными литературными данными показывает, что наши результаты с точностью в 2% совпадают с зависимостью, рекомендованной в [6] для чистого циркония. Превышение над данными для сплава Э-110 из справочника [7] составляет 4%. В измерениях теплоемкости топливного сердечника примем для теплоемкости оболочки $c = 0,253 + 0,151 \cdot 10^{-3} T$, кДж/(кг·К), $293 < T < 773$ К, как рекомендовано в [6]. Далее определялась суммарная теплоемкость модели твэла реактора ВВЭР, выполненной из оболочки (сплав Э-110) длиной 0,5 м и заполненной втулками диоксида урана без центрального отверстия. Модель заполнялась гелием при небольшом избыточном давлении. Перед сборкой оболочка и топливные втулки взвешивались. По результатам измерений, плотность втулок из диоксида урана составила $10,4$ г/см³. Полученные термограммы периодического нагрева модели твэла обрабатывались по формуле (9). Вычисления теплоемкости топливного сердечника (с использованием ранее измеренной теплоемкости оболочки) дали при температуре 340 К величину $c = 274$ Дж/(кг·К). Следует отметить, что полученная вели-

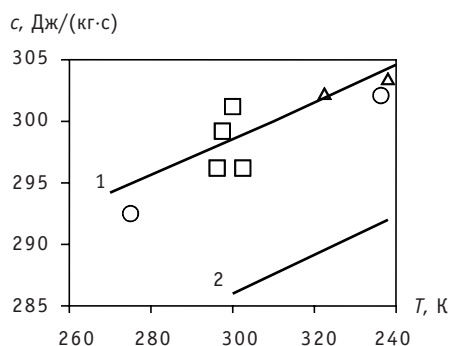


Рис. 6. Результаты измерений и литературные данные: 1 – [6]; 2 – [7]; ○ – измерения на калориметре с изотермической оболочкой; □ – измерения одиночными импульсами; △ – измерения периодическими импульсами

чина теплоемкости диоксида урана хорошо согласуется с данными, приведенными в работе [8] (отклонение не более 2%), однако лежит несколько выше (на 8%) рекомендованных МАТPRO значений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы получена методика определения ТФС твэлов энергетических реакторов. Проведено измерение теплоемкости методом периодического нагрева на модели твэла реактора ВВЭР при комнатных температурах. Предложенная методика может быть реализована для измерения теплофизических свойств твэлов с виброуплотненным топливом и адаптирована к условиям измерений в горячей камере.

Литература

1. Курина И.С., Попов В.В., Румянцев В.Н. Исследование свойств модифицированных оксидов с аномально высокой теплопроводностью/Тез. докл. XII Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ (7-10 окт. 2008 г. Москва, Россия). – С. 44.
2. Киселев Н.П., Корсун В.А., Макас В.И., Петровичев В.И. Импульсный метод измерения теплопроводности неэлектропроводных порошкообразных материалов и жидкостей//Вопросы теплофизики ядерных реакторов. – 1981. – Вып. 10. – С. 93-100.
3. Кокорев Л.С., Большаков В.И., Смирнов А.А. Автомодельное решение нестационарного уравнения теплопроводности при произвольных граничных условиях//Вопросы теплофизики ядерных реакторов. – 1977. – Вып. 7. – С. 23-25.
4. Леценко А.Ю. Теплофизические характеристики отработавших твэлов ВВЭР-1000 в диапазоне выгораний 40 – 65 МВт·сут/кг U/Автореферат дисс. на соискание ученой степени к.т.н. – Димитровград, 2006.
5. Деев В.И., Круглов А.Б., Куценко К.В., Лаврухин А.А., Харитонов В.С. Исследование теплофизических свойств полимерных композиционных материалов при низких температурах//Инженерная физика. – 2000. – № 4. – С. 62-66.
6. Тепло- и массообмен, теплотехнический эксперимент: Справочник/Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
7. Теплофизические свойства материалов ядерной техники/Под общ. ред. П.Л. Кириллова, 2-е издание, исправленное и дополненное. – М.: ИздАТ, 2007. – 200 с.
8. Тенишев А.В. Исследование влияния легирования и имитаторов продуктов деления на теплофизические свойства UO_2 для обоснования работоспособности твэлов при глубоких выгораниях/Автореферат дисс. на соискание ученой степени к.т.н. – Москва 2004.

Поступила в редакцию 11.03.2009

There are represented the results of calculation and experimental research of hydrodynamics in a contour of repeated compulsory circulation RBMK and behaviour of impurity during a stop of the block (decrease in power). Recommendations for an effective using of the given processes to decrease a concentration of impurity in volume of contour of repeated compulsory circulation, to lower a dose of radiation during repair work is developed.

УДК 621.039.534

Control of Flow Rate in Fuel Channel RBMK-type Reactor from Information about Coolant Activity \ A.M. Zagrebayev, S.V. Kostanbayev, N.V. Ovsyannikova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 8 pages, 5 illustrations. – References, 3 titles.

The paper presents the computational and measuring system for control of coolant flow rate in technological channels of RBMK-type reactors from experimental data about intensity of gamma-radiation emitted by ^{16}N isotope in light-water coolant. Also, the paper presents the following aspects of computational and measuring system: mathematical model of coolant activation process, numerical algorithm for determination of coolant flow rate in technological channels, structure and operation of the computational and measuring system, the results obtained in trial operation of the computational and measuring system at Kursk NPP Unit 1, applicability area and typical errors in determination of coolant flow rate.

УДК 621.039.548

Measurement of Thermal Properties of the Fuel Rods Power Nuclear Reactors by Method of Pulse Heating \ V.B. Kruglov, A.B. Kruglov, I.G. Pozdeeva, V.S. Kharitonov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 6 illustrations. – References, 8 titles.

In the work the method of definition of thermophysical properties of the fuel elements of power nuclear reactors such as heat conductivity, a thermal capacity of fuel and heat transfer factor between fuel and rod cover is offered. Results of check of a method of definition of a thermophysical capacity of the fuel rod elements reactor VVER are shown.

УДК 621.039.52:615.849.1

The MARS and TAPIRO Small Capacity Reactors for BNCT Applications \ Yu.A. Kurachenko, D.N. Moiseenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 4 tables, 5 illustrations. – References, 25 titles.

The advantages and disadvantages of two small capacity reactors: TAPIRO (Italy, existing now) and MARS (Russia, projectible) are analyzed for boron neutron capture therapy (BNCT) applications. Comparison of the installations is done for a set of characteristics, namely, core composition, maximal & average flux in a core, leakage spectrum etc. Special attention is focused on a comparison of the installations with respect to radiation and nuclear safety. The advantages of the MARS reactor are apparent here. The next batch of comparing characteristics was the beam quality rating relative to BNCT (accordingly to «in air» and «in phantom» criteria). Besides, patient protection at therapy session was analyzed by computation. A conclusion is drawn that relative to radiation & nuclear safety, overall dimensions & total mass and manufacturability as well, the projectible MARS reactor exceeds the existing TAPIRO one. As for BNCT applications, the MARS reactor is highly competitive with the TAPIRO. The sole (but indisputable) advantage of the TAPIRO facility is its real existence.

УДК 621.039.51

Updating of Procedure of Calculation of the Reactor-Converter Multicell Thermionic Fuel Element output Characteristics \ M.A. Polous; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 11 titles.