

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В СВИНЦОВОМ И УРАНОВОМ ОБРАЗЦАХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПРОТОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

А.А. Говердовский, Б.В. Кебадзе, Д.М. Ковалев, Р.Р. Чернов
ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Работа посвящена разработке и испытанию в лабораторных условиях и в экспериментах на ускорителе методики измерения энерговыделения в образцах из урана и свинца. Предложенная измерительная система обеспечивает надежное измерение температур образца при скорости ее изменения $\sim 0,1$ К в минуту. Полученные предварительные результаты по удельному энерговыделению в свинцовом и урановом образцах являются важными данными на пути решения проблем, связанных с оптимизацией теплоотвода от облучаемой мишени и дальнейшим развитием тематики ускорительно-управляемых систем.

Ключевые слова: ускорительно-управляемые системы, методика, свинец, уран, теплоотвод, энерговыделение.

Key words: ADS, procedure, lead, uranium, heat-removal, power-release.

В последнее время заметное внимание уделяется разработке ускорительно-управляемых систем, которые обладают свойством внутренней безопасности. Это обеспечивается тем, что активная зона принципиально находится в подкритическом состоянии, а генерация энергии в ней происходит за счет подвода к ней нейтронов от стороннего источника – мишени, облучаемой потоком высокоэнергетических нейтронов.

Нейтроны образуются при взаимодействии пучка протонов с тяжелыми ядрами свинца. При столкновении одного протона образуется примерно 20 нейтронов с высокой энергией. В свинце отсутствуют условия возникновения цепной ядерной реакции при любых энергиях иницирующих протонов из-за малости сечения деления. Число реакций с делением сохраняется в пределах 0.2–0.7% от числа всех неупругих взаимодействий для рассмотренных энергий протонов и размеров мишени.

Нейтроны, поступающие в зону с делящимся материалом, обеспечивают там значительное энерговыделение. В то же время выделение тепла вследствие ядерных процессов в небольшом объеме мишени является побочным явлением, поэтому требуется теплоотвод. По-видимому, принципиальных проблем на пути решения этой задачи нет. Технологическая осуществимость проекта кажется вполне

© А.А. Говердовский, Б.В. Кебадзе, Д.М. Ковалев, Р.Р. Чернов, 2012

реальной, т.к. опирается на уже имеющийся опыт, накопленный при создании различных установок.

Получение экспериментальных данных об энерговыделении в свинце имеет большое практическое значение. Разработка соответствующей методики позволит получить данные об энерговыделении и в других образцах. Чтобы достаточно детально рассмотреть этот вопрос, необходимо подробно изучить процесс энерговыделения в лабораторных условиях.

Наиболее эффективным способом измерения локального энерговыделения является калориметрический метод. Калориметрические исследования осуществляются путем регистрации изменения температуры с помощью датчиков (термопар), установленных в изолированных образцах с различными материалами.

При реализации калориметрического метода в данных условиях целесообразно обеспечить линейный рост температуры в образце с момента запуска пучка от ускорителя вплоть до достижения ею значимых величин (несколько градусов). Такая возможность обеспечивается массой образца и параметрами теплоизоляции. Схематическое изображение образца в контейнере приведено на рис. 1.

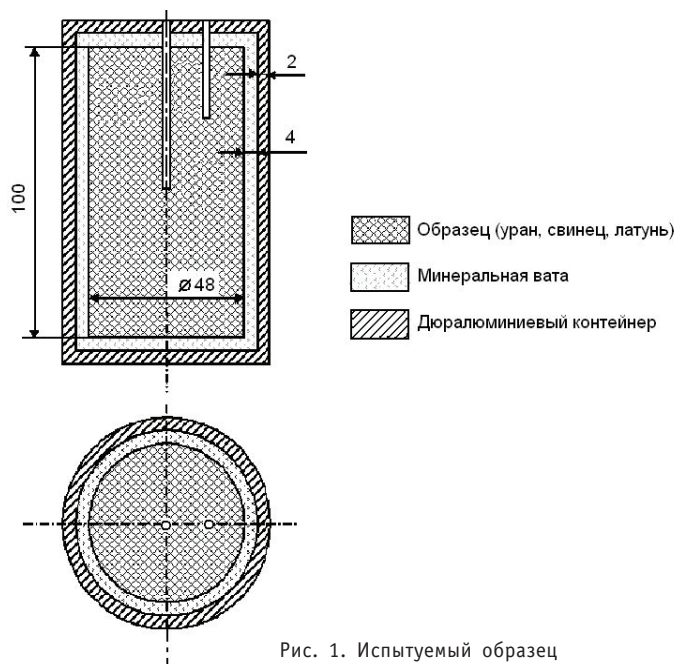


Рис. 1. Испытуемый образец

Рассчитаем постоянную времени калориметра, исходя из точечного приближения:

$$C_{\Sigma} \frac{dT}{dt} = Q - \alpha F(T - T_0), \quad (1)$$

где C_{Σ} [дж/К], T [К] — теплоемкость и температура образца соответственно; Q [Вт/м³] — энерговыделение в единицу времени в образце; α [Вт/(м²×К)] — коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; T_0 [К] — температура окружающей среды, которую будем считать постоянной.

Положим для упрощения $T_0 = 0$, тогда

$$C_{\Sigma} \frac{dT}{dt} = Q - \alpha FT, \quad (2)$$

$$T = \frac{Q}{\alpha F} \left(1 - e^{-\frac{\alpha F \tau}{C_{\Sigma}}} \right), \quad (3)$$

$$\tau \approx \frac{C_{\Sigma}}{\alpha F} \approx \frac{C_p \gamma V}{S \frac{\lambda}{\Delta}}. \quad (4)$$

Начальный темп роста температуры определяется соотношением энерговыделения и теплоемкости образца и, практически, не зависит от его размеров. Обеспечение значительной постоянной времени за счет увеличения размеров образца и толщины изоляции дает линейный рост температуры в течение более длительного времени и достижение ею значимых отклонений от исходного значения.

Для оценки эффективного коэффициента теплоотдачи от образца, заключенного в контейнер, учитываются термическое сопротивление изоляции между поверхностью образца и кожухом и коэффициент теплоотдачи с поверхности контейнера. Расчет последнего проведем согласно справочнику [1] с использованием критериальных соотношений:

$$Gr = g\beta\Delta T \frac{d^3}{\nu^2}, \quad (5)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (6)$$

$$\overline{Nu} = C(Gr \times Pr)^n \epsilon, \quad (7)$$

$$\overline{\alpha} = \frac{\overline{Nu} \times \lambda}{d_0}, \quad (8)$$

где Gr – число Грасгофа; β – температурный коэффициент объемного расширения; d [м] – характерный размер; ν [м²/с] – кинематическая вязкость; Pr – число Прандтля; a [м²/с] – температуропроводность; C , n и ϵ – коэффициенты условий теплоотдачи; λ [Вт/(м²×К)] – коэффициент теплопроводности.

Принимая за начальное значение $\alpha = 10$ Вт/(м²×К), методом итерации получаем значение коэффициента теплоотдачи, связанное с отводом тепла с поверхностью образца, а затем рассчитываем эффективный коэффициент теплоотдачи с учетом термического сопротивления изоляции:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\Delta}{\lambda}} = \frac{1}{\frac{1}{3,2} + \frac{0,004}{0,052}} = 3,2 \text{ Вт/(м}^2\text{×К)}.$$

Таблица 1

Исходные данные по свойствам материалов

	T, K	$\gamma, \text{ кг/м}^3 \times 10^3$	$C_p, \text{ Дж/(кг·град)}$	$\lambda, \text{ Вт/(м·град)}$	$\nu, \text{ м}^2/\text{с}$	$C_{\Sigma}, \text{ Дж/град}$	$\lambda, \text{ Вт/(м·град)}$, минеральный войлок $\gamma = 120 \text{ кг/м}^3$	$\tau, \text{ с}$
Латунь	300	8,93	381	106	$1,81 \cdot 10^{-4}$	615	0,052	5716
Уран	300	18,68	134	22,5	$1,81 \cdot 10^{-4}$	452,3	0,052	3952
Свинец	300	11,34	125	34,8	$1,81 \cdot 10^{-4}$	238,75	0,052	2219

Требования к термопреобразователям обусловлены необходимостью надежно и достоверно фиксировать малые ($\sim 0,1^\circ\text{C}$) изменения температуры. С точки зрения линейности и воспроизводимости характеристик, в том числе в условиях радиационных полей, предпочтительно использовать термопреобразователи типа хромель-алюмель. Применяемые термопреобразователи проходили метрологические испытания с использованием образцовых калибраторов КТ-500 и КТ-1100. Все испытуемые термопреобразователи соответствуют первому классу допуска по ГОСТ Р 8.585-01.

Для отработки измерительного комплекса проводились лабораторные эксперименты с имитацией внутреннего энерговыделения. Был изготовлен латунный образец стандартного размера со сквозным центральным отверстием $\varnothing 3,2$ мм, в который поместили пять последовательно соединенных миниатюрных резисторов номиналом 110 Ом, 0,25 Вт (рис. 2).

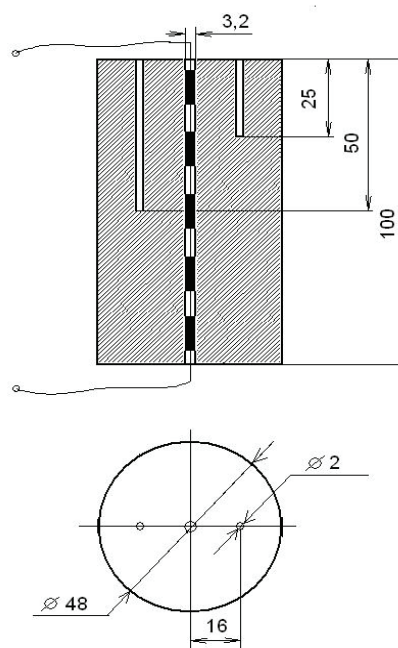


Рис. 2. Образец с внутренним энерговыделением

При подаче на эту цепочку от источника постоянного тока напряжения $U = 24$ В выделяется мощность $W \approx 1,05$ Вт, что при объеме образца $V \approx 180$ см³ соответствует удельному энерговыделению $w = 0,00575$ Вт/см³. Отверстия глубиной 25 и 50 мм с установленными в них термопарами заполнялись сплавом свинец-висмут.

Структурная схема измерительной системы, предназначенной для эксперимента с внутренним энерговыделением, представлена на рис. 3.

В качестве преобразователей сигнала термопар используются модули DSCA 47K-05C фирмы «DATA FORTH». Они имеют 3-портовую гальваническую развязку, что повышает помехоустойчивость. Точность данных модулей достаточно высока и составляет 0,08 % от диапазона, а стабильность имеет следующие значения: стабильность входного смещения $\pm 0,5$ мкВ/К, выходного смещения ± 20 ppm/К, ко-

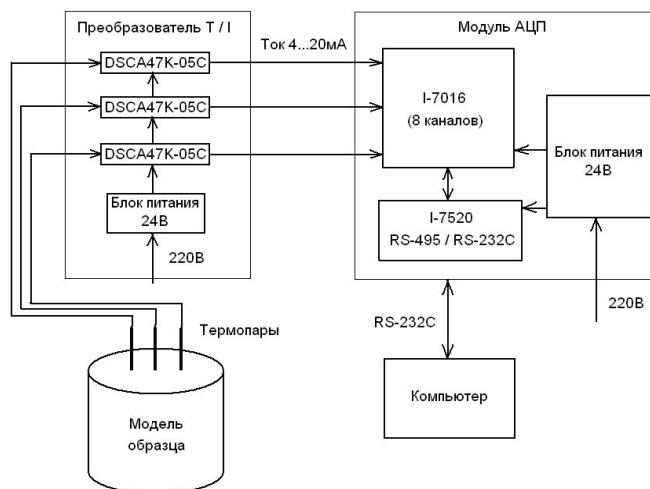


Рис. 3. Структурная схема измерительного канала модели с реализацией внутреннего энерговыделения

эффицента усиления ± 40 ppm/K. Выходной ток (4–20 мА) имеет линейную зависимость от температуры. Преобразованные затем в цифровой вид сигналы поступают на компьютер. Пример временной диаграммы изменения температуры при внутреннем энерговыделении $W \approx 1,05$ Вт показан на рис. 4. Ступенчатость графика объясняется разрядностью АЦП. Наблюдаемый на начальном линейном участке темп разогрева TR ($\approx 1^\circ\text{C}$ за 10 мин) согласуется с приближенной расчетной оценкой. Для теплоемкости C_Σ 615 Дж/град и энерговыделения $W = 1,05$ Вт темп $TR \approx 0,0017$ град/с ($\approx 1,02^\circ\text{C}$ за 10 мин).

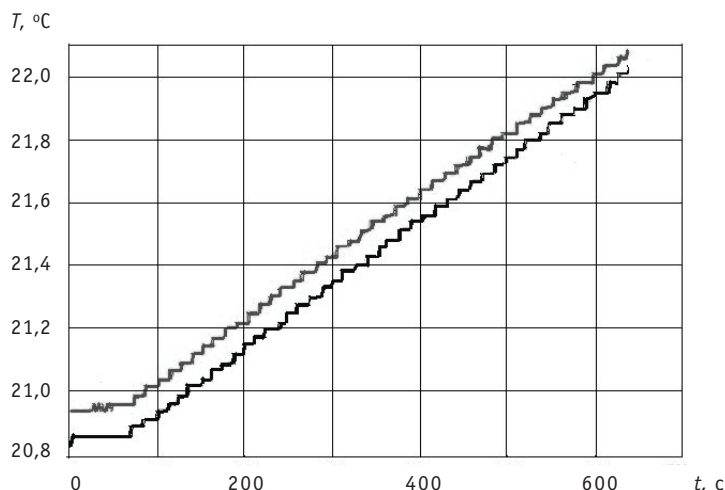


Рис. 4. График нагрева образца

После лабораторных испытаний были проведены эксперименты по определению энерговыделения в свинцовом образце на ускорителе ЛНФ (лаборатория нейтронной физики), г. Гатчина Ленинградской области. Подготовленные свинцовый и урановый образцы облучались пучком протонов с энергией 1 ГэВ и плотностью $\sim 1,5 \times 10^{11}$ протонов/см²·с на ускорителе ЛИЯФ. Пучок направлялся в торец образца. Время экспозиции для каждого из образцов не превышало 10 мин. Для обработки МНК использовались реализации длительностью 5–7 мин, что существенно меньше тепловой постоянной времени образцов. Темп роста температуры для свинцового образца $\sim 1,3$ К/мин, для U^{238} $\sim 3,5$ – $3,6$ К/мин.

Таблица 2

Характеристика образцов

	Свинцовый	Урановый
Удельная теплоемкость C_p , Дж/кг·град	125	134
Плотность γ , кг/м ³	$11,34 \cdot 10^3$	$18,68 \cdot 10^3$
Суммарная масса образца M_Σ , г	2020 ± 1	3213 ± 1
$m_{\text{термопары}}$, г	106	106
Масса заливки свинец-висмут $m_{\text{зал}}$, г	≈ 10	≈ 10
Реальная масса образца, г	$M_{\text{Рб}} = M_\Sigma - m_{\text{термопары}} - m_{\text{зал}} = 1910$	$M_{\text{У}} = M_\Sigma - m_{\text{термопары}} - m_{\text{зал}} = 3097$
Суммарная теплоемкость C_Σ , Дж/град	$M_{\text{Рб}} \cdot C_p = 1910 \cdot 125 \cdot 10^{-3} = 238,75$	$m \cdot C_p = V \cdot \gamma \cdot C_p = 430,58921$

Для образца U^{238} практически не наблюдается отклонений от линейности. Постоянная времени для свинцового образца примерно в два раза меньше, имеются небольшие, но видимые отклонения от линейности (рис. 5, 6). Графики роста температуры в образцах искусственно сдвинуты относительно друг друга примерно на один градус для более удобного их сравнения. Для наглядности нелинейности роста температуры уранового образца на рис. 7, 8 представлены графики разности температур между центральной и периферийной ТЭП.

С учетом слабой нелинейности возможна коррекция (линеаризация) графика температуры с использованием для этого случая свойств оператора звена первого порядка $f(p) = \frac{1}{1 + \tau p}$, где τ – постоянная времени.

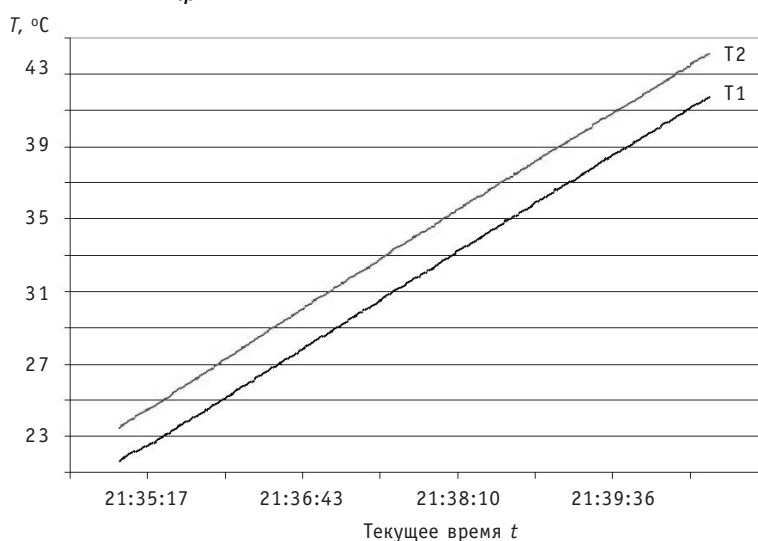


Рис. 5. Рост температуры в урановом образце: T1 – периферийная термопара; T2 – центральная термопара

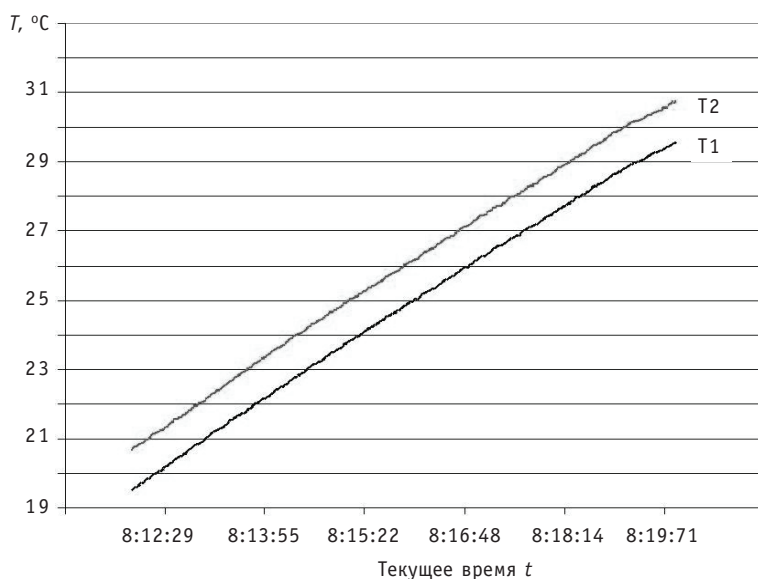


Рис. 6. Рост температуры в свинцовом образце: T1 – периферийная термопара; T2 – центральная термопара

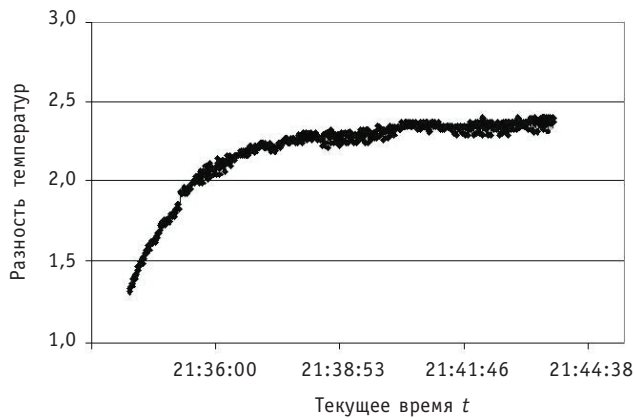


Рис. 7. Разность температур между показаниями центральной и периферийной ТЭП уранового образца

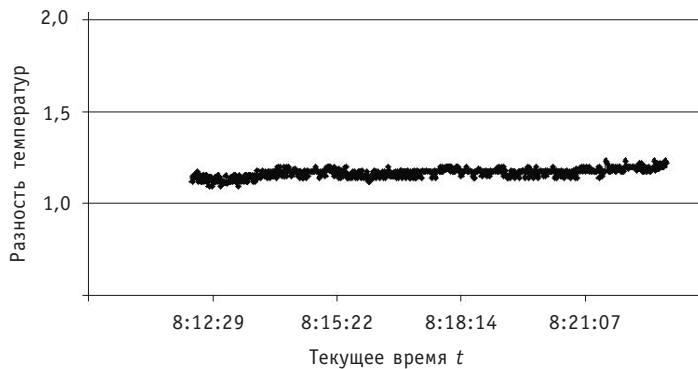


Рис. 8. Разность температур между показаниями центральной и периферийной ТЭП свинцового образца

$f(p) = \frac{1}{pT+1} \approx \frac{1}{pT} - \frac{1}{p^2T^2}$, где первый член соответствует чистому интегрированию. Добавление оператора $\frac{1}{\tau^2 p^2}$ позволяет приблизиться к идеальному интегрированию. В качестве первого приближения можно добавить к полученной реализации интеграл от нее, умноженный на $\frac{1}{\tau}$.

Учитывая, что при больших значениях τ отклонения от чистого интегрирования на начальном участке времени невелики, можно представить коррекцию экспериментальной зависимости температуры T в виде

$$T_{cor}(t) = T(t) + \frac{1}{\tau} \int_0^t T(t) dt. \tag{9}$$

В качестве примера линеаризации на рис. 9 изображен график роста температуры в свинцовом образце с добавлением соответствующей корректирующей надбавки.

Данные по энерговыделениям в образцах, рассчитанные с использованием табличных данных по теплоемкости материалов и измеренных значений темпа линейного роста температуры, приведены в табл. 3. Плотности свинца в твердом и жидком состоянии различаются ~ на 10% [2]. Соответственно, объемы твердого и жидкого образцов одинаковой массы различаются незначительно. Поэтому не

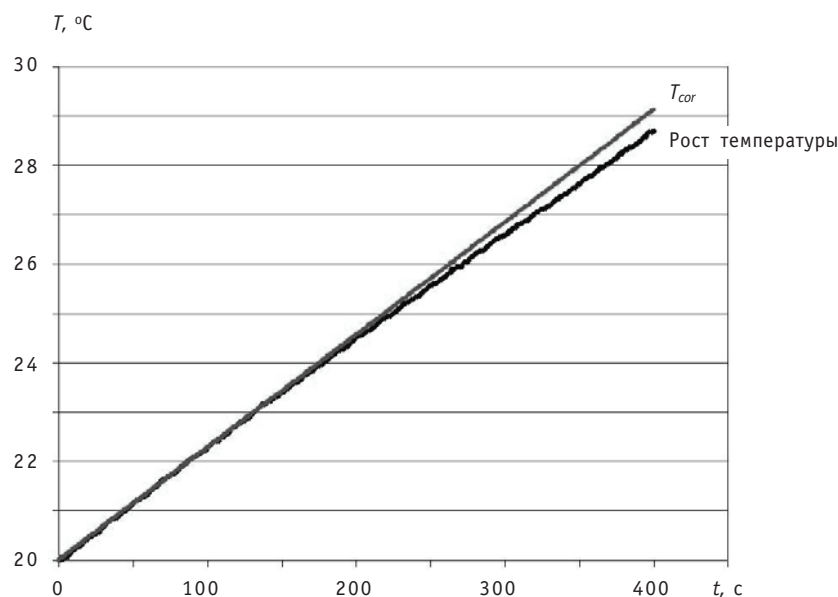


Рис. 9. Рост температуры в свинцовом образце + корректирующая надбавка

Таблица 3

Абсолютное и удельное энерговыделения в образцах

	Pb, m = 1920 г		U ²³⁸ , m = 3200 г	
	Абсолютное, Вт	Удельное, Вт/кг	Абсолютное, Вт	Удельное, Вт/кг
Центр	5,16	2,69	28,4	8,87
Периферия	5,13	2,67	27,8	8,69

ождается существенной зависимости удельного энерговыделения от фазового состояния образца.

При анализе данных экспериментов с облучением отмечено, что если для свинцового образца разность температур по центральной и периферийной ТЭП в течение всего опыта находится в пределах 0,1 К, то для образца урана она показывает рост в ходе эксперимента и достигает величины 1 К.

Указанные обстоятельства могут свидетельствовать о неоднородности энерговыделения в образце за счет деления ядер урана генерируемыми нейтронами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана и испытана в лабораторных условиях и экспериментально на ускорителе методика измерения энерговыделения в образцах материалов. Измерительная система обеспечивает надежное измерение температур образца при скорости ее изменения ~ 0,1 К в минуту.

2. Получены предварительные результаты по удельному энерговыделению в образцах из свинца и U²³⁸ при воздействии пучка протонов с энергией 1 ГэВ.

Литература

1. Григорьев В.А., Зорин В.М. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент/Справочник. – М.: Энергоиздат, 1982.
 2. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники/Справочник. – М.: Атомиздат, 1968.

Поступила в редакцию 21.10.2011

were compared with the experimental ones. The best approach for simulation of the two-phase flow drag with the tube bundle based on the empirical two-phase flow hydraulic resistance correlations was identified.

УДК 621.039.51

Experimental Determination of Power-Release in the Lead and Uranium Samples Irradiated by High-Energy Protons \A.A. Goverdovskiy, B.V. Keadze, D.M. Kovalev, R.R. Chernov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 3 tables, 9 illustrations. – References, 2 titles.

The paper describes the development, laboratory tests, and accelerator experiments of a measurement procedure of power-release in lead and uranium samples. The measurement procedure involved provides a reliable measurement of temperature of the sample at its rate of the change of 0,1 K per minute. The power-release data received in the lead and uranium sample are very important for tackling the problems of optimization of heat-removal from the irradiated target sample. The results obtained contributes to the development of ADS.

УДК 621.039.5

Hydrodynamics and Heat Transfer in Reactor Installation «MASTER» \S.L. Dorohovich, Yu.A. Kazanskiy, A.A. Kazantsev, S.V. Kovalchuk, A.V. Levchenko, V.A. Levchenko, Yu.S. Yurev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 13 pages, 2 tables, 10 illustrations. – References, 6 titles.

The paper is concerned with results of calculation investigations of heat and hydrodynamic processes in reactor installation «MASTER». Designing and testing calculations using CFD-code «KANAL» were performed.

УДК 621.039.58: 536.423

Verification of TECH-M and KORSAR/GP Computer Codes on the Basis of Experimental Results Obtained on Large-scale Test Facility GE2M-PG \A.V. Morozov, O.V. Remizov, D.S. Kalyakin, V.I. Asyunin, V.I. Schekoldin, S.I. Zaitsev, M.O. Zakutaev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 11 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 8 titles.

The paper presents the results of calculations of the experiments conducted at the GE2M-PG test facility in SSC RF-IPPE. These experiments simulate the operation of steam generator during the cooling of the core of the “NPP-2006” VVER reactor by the joint action of passive safety systems HA-2 and PHRS in case of accidents with loss of primary coolant. The purpose of the work was to conduct a post test calculations and verification of computer codes TECH-M and KORSAR/GP in terms of modeling of heat transfer processes in a steam generator model at low heat fluxes in the presence of noncondensable gases, and without them. As a result of verification it is possible to conclude about the ability of computer codes to reproduce the phenomenon of non-condensable gases distribution, accumulation and their effects on heat transfer in a steam generator tube bundle.

УДК 621.039.534

Calculation of Heat Transfer at the Seven Heated Rod Assembly upon Supercritical Fluid Parameters \I.A. Chusov, A.S. Shelegov, V.I. Slobodchuk, V.F. Ukraintsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 9 illustrations. – References, 6 titles.

The results of calculation analysis of experiments on thermal hydraulic of the seven fuel pin assembly under supercritical coolant parameters are presented. Calculations were done in accordance with experimental condition and results of SSC RF IPPE on modeling coolant freon-12. Comparison between experimental and calculation results was carried out. Possible ways of improvement of calculation technique were discussed.