

ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SCALE: ВОПРОСЫ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

А.В. Егоров*, С.Н. Филимонов*, В.В. Артисюк*, А.Н. Шмелев**

**Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*

***Московский инженерно-физический институт (государственный университет),
г. Москва*



Настоящая статья имеет целью верификацию лицензионного программного комплекса SCALE 5, поставленного в ИАТЭ для учебных целей в соответствии с соглашением между ИАТЭ и RSICC (Radiation Safety Information Computational Center, Национальная лаборатория «Oak Ridge», США). Проведенная верификация ориентирована на фундаментальные вопросы ядерной безопасности, связанные с анализом критичности. Были проведены расчеты на критичность классических урановых и плутониевых экспериментов (GODIVA, JEZEBEL) и гетерогенных сферических экспериментальных сборок, ориентированных на уточнение критических масс трансурановых изотопов (^{244}Cm , ^{237}Np , ^{238}Pu), проведен анализ чувствительности полученных расчетных результатов к ядерным данным. На основании анализа чувствительности предложена модель проведения эксперимента с ^{234}U для уточнения его критической массы.

ВВЕДЕНИЕ

Критическая масса – одно из важнейших свойств делящихся нуклидов. Определение ее значения необходимо для задач разработки перспективных видов топлива и решения проблемы нераспространения ядерных материалов. Эксперименты по уточнению критических масс первоначально проводились только для ^{235}U и ^{239}Pu , как оружейных материалов. Но с ростом накопления трансурановых элементов возникает необходимость определения их критической массы. С середины прошлого столетия проводились эксперименты по уточнению критической массы ^{244}Cm , ^{237}Np , ^{238}Pu и некоторых других элементов [1].

За последнюю декаду в области расчета критичности и анализа безопасности широкое распространение получил программный комплекс SCALE 5 (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation), разработанный и поддерживаемый в Oak Ridge National Laboratory (Национальная лаборатория «Оук Ридж», США) [2]. По существу SCALE объединяет ранее независимо распространявшиеся проблемно-ориентированные программные коды (KENO, ORIGEN и другие); по терминологии, принятой в SCALE – **функциональные модули**. Иерархия SCALE 5 построена таким образом, что для решения определенной задачи разрабатывается последовательность подключения функциональных модулей. Эта последовательность формируется и управляется стандартизованными **контрольными модулями**. Напри-

мер, расчет на критичность сборки со сложной геометрией производится контрольным модулем CSAS 6 (Criticality Safety Analysis Sequence), который последовательно подключает следующие функциональные модули:

- 1) BONAMI – создание библиотеки сечений для области неразрешенных резонансов;
- 2) NITAWL-III – создание библиотеки сечений для области разрешенных резонансов;
- 3) XSDRNPM – усреднение сечений по составляющим сборку элементарным геометрическим подзонам;
- 4) KENO-VI – расчет коэффициента размножения нейтронов методом Монте-Карло.

В случае необходимости анализа чувствительности критичности к ядерным данным, в перечень добавляется функциональный модуль SAMS (Sensitivity Analysis Module for SCALE), подключаемый после отработки KENO. В этом случае пользователю SCALE предлагается использовать контрольный модуль TSUNAMI [3].

Полный список контрольных модулей приведен в табл. 1. Как видно из перечня модулей, программный комплекс SCALE 5 позволяет исследовать широкий спектр проблем, связанных с расчетом критичности, радиационной защиты, выгорания топлива и другие задачи из области физики ядерных реакторов.

В данной работе был задействован контрольный модуль TSUNAMI для апробации комплекса SCALE 5 на расчете критическихборок, среди которых:

- классические критические эксперименты GODIVA, JEZEBEL [4];
- эксперименты с замещением (центральная зона сферической сборки JEZEBEL замещается исследуемым материалом) [5];
- нептуниевая сферическая сборка, окруженная последовательными слоями высокообогащенного урана [6].

Таблица 1

Контрольные модули программного комплекса SCALE

Название	Назначение контрольного модуля
CSAS	Проведение анализа критичности
CSAS6	Проведение анализа критичности
SMORES	Расчет максимального значения эффективного коэффициента размножения k_{eff} или минимальной критической массы одномерной ядерной системы
TSUNAMI-1D	Расчет чувствительности в расчетах критичности
TSUNAMI-3D	Расчет чувствительности в расчетах критичности в трехмерной системе
STARBUCS	Расчет критичности с использованием анализа выгорания
ORIGEN-ARP	Анализ выгорания и отработавшего топлива
SAS1	Одномерный анализ радиационной защиты
SAS2	Одномерный анализ одновременно и выгорания, и радиационной защиты
SAS3	Анализ радиационной защиты методом Монте-Карло
SAS4	Анализ радиационной защиты методом Монте-Карло
HTAS1	Двумерный анализ переноса тепла в контейнере, для перевозки и хранения отработанного топлива
QADS	Многомерный анализ точечного ядра
TRIRON	Двумерный анализ характеристик отработанного ядерного топлива

РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКИХ СФЕР

Классические критические эксперименты

Критические эксперименты с высокообогащенным металлическим делящимся материалом в сферической геометрии есть смысл относить к классическим экспериментам, во-первых, с точки зрения хронологии, а во-вторых, с точки зрения простоты конфигурации. Известно, что на сферической сборке GODIVA из высокообогащенного урана проверялись основные константы для анализа развития цепной реакции в ядерном взрывном устройстве. Сферическая геометрия, а иными словами сферическая симметрия, облегчает моделирование процесса пространственного переноса нейтронов и представляется наиболее удобной и часто используемой для проверки соответствующих программных кодов.

Изотопный состав и размеры критических сборок GODIVA и JEZEBEL, используемых для верификации программного комплекса SCALE, представлены в табл. 2. GODIVA представляет собой сборку, содержащую высокообогащенный уран при радиусе сферы 8,741 см, JEZEBEL – плутониевая сборка с радиусом 6.385 см. Расчетные результаты, представленные в табл. 2, с точностью ~0.3% соответствуют условию критичности (экспериментальное значение эффективного коэффициента размножения нейтронов считается равным единице).

Таблица 2

Изотопный состав и расчетный коэффициент размножения нейтронов критических сборок*

Сборка	GODIVA		JEZEBEL		Dirty JEZEBEL	
	Изотоп	Концентрация, $\times 10^{24}/\text{см}^3$	Изотоп	Концентрация, $\times 10^{24}/\text{см}^3$	Изотоп	Концентрация, $\times 10^{24}/\text{см}^3$
Материал	^{235}U	0.045000	^{239}Pu	0.037050	^{239}Pu	0.02993400
	^{238}U	0.002498	^{240}Pu	0.001751	^{240}Pu	0.00787540
	^{234}U	0.000492	^{241}Pu	0.000117	^{241}Pu	0.00121460
			Ga	0.001375	^{242}Pu	0.00015672
					Ga	0.00137220
Расчетный k_{eff}	0.99831 \pm 0.00095		0.99672 \pm 0.00093		0.9992 \pm 0.00087	

* – изотопный состав сборок взят из работы [4].

Важным параметром для развития цепной реакции в подобных конфигурациях является время жизни мгновенных нейтронов, однако расчетные данные для них не столь широко известны. Это явилось стимулом провести соответствующие расчеты в рамках данной работы. Комплекс KENO в качестве стандартной выдачи наряду с коэффициентом размножения нейтронов имеет характеристику «lifetime», содержащую данные о времени жизни мгновенных нейтронов. На рис. 1 представлены экспериментальные и расчетные характеристики «lifetime» для различных критических сфер. Экспериментальные данные были взяты из работы [7].

Из рис. 1 видно, что в широком диапазоне обогащения урана, расхождение результатов находится в интервале 5–10%.

Эксперименты с замещением

Эксперименты с замещением проводились на рубеже 60-х годов и получили название по принципу размещения делящихся материалов. Их целью являлась оценка критических масс редких в то время делящихся нуклидов, таких как ^{238}Pu , ^{244}Cm и других, имеющееся количество которых не позволяло изготовить из них

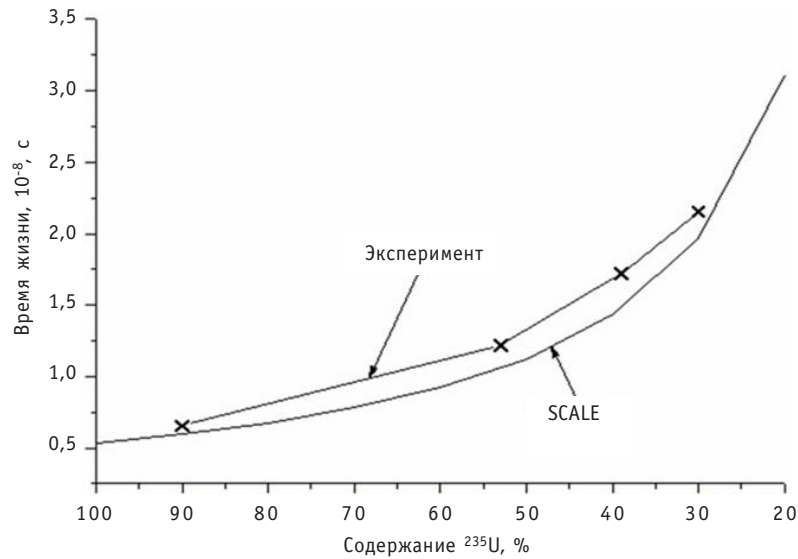


Рис. 1. Время жизни нейтронов в зависимости от обогащения урана для критических сфер из урана (экспериментальные данные взяты из [7])

полномасштабную критическую сборку. Суть экспериментов заключалась в замещении материала центральной зоны известных сферических критических сборок (таких как JEZEBEL [5]) на вакуум или на исследуемый материал и по экспериментально измеренному коэффициенту размножения нейтронов оценить соответствующую реактивность исследуемого (замещающего) i -го нуклида

$$\Delta k(i)_{\text{eff}} = \frac{(k_i - k_{\text{void}})}{(\beta_{\text{eff}} \times m_i)}. \quad (1)$$

Вводится сечение производства нейтронов, представляемое в виде усредненной по спектру разности

$$\sigma_{pr} = \overline{(\nu - 1)\sigma_f} - \overline{\sigma_c}, \quad (2)$$

где ν – число нейтронов на одно деление, σ_f и σ_c – микроскопические сечения деления и захвата соответственно.

Считая, что все характеристики ^{239}Pu (в случае JEZEBEL [4]) известны, определяется сечение производства изучаемого элемента

$$\frac{\Delta k(i)_{\text{eff}}}{\Delta k(j)_{\text{eff}}} = \frac{\sigma_{pr}(i)}{\sigma_{pr}(j)}. \quad (3)$$

Таким образом, из эксперимента согласно формуле (2) получают $\sigma_{pr}(i)$, используемую для нахождения критического радиуса по формуле, выводимой из уравнения Больцмана

$$\left(r_c + \frac{0.71}{\Sigma_{pr} + \Sigma_{tr}} \right) \Sigma_{tr} = \tan \frac{r_c (\Sigma_{pr} + \Sigma_{tr}) + 0.71}{\pi}, \quad (4)$$

причем транспортное сечение исследуемого материала берется таким же, как для ^{239}Pu (или ^{235}U). При заданной плотности исследуемого материала его критическая масса получается автоматически. В данной работе с помощью SCALE и MCNP проведен анализ эксперимента по оценке критической массы ^{244}Cm и ^{238}Pu [5]. В табл. 3 приведены экспериментальные и расчетные значения Δk . Полученные по SCALE 5 эти характеристики заметно хуже коррелируют с экспериментом по срав-

Таблица 3

Экспериментальные и расчетные значения Δk

Нуклид	Экспериментальное значение Δk	Расчетные значения Δk			
		MCNP (ENDF/B-V)*	MCNP (ENDF/B-VI)	SCALE	ONEDANT*
^{244}Cm	5.23	5.32	5.15	7.64	5.98
^{238}Pu	5.77	5.52	5.52	7.86	6.78

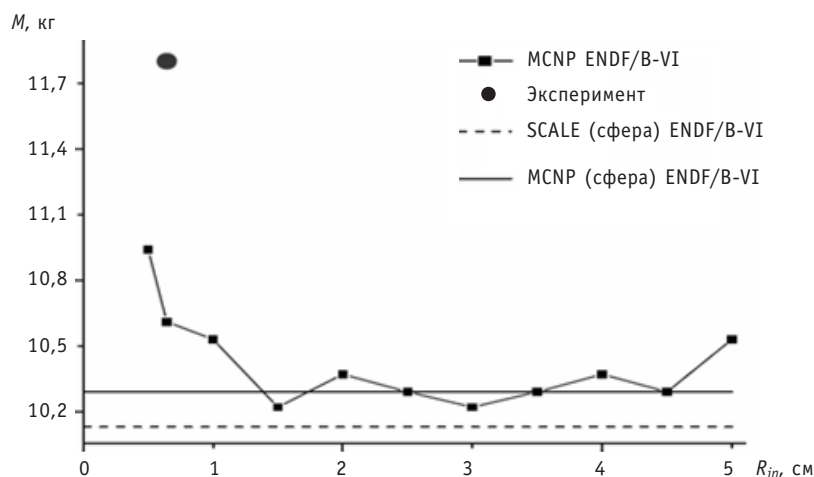
* – данные взяты из работы [5].

нению с результатами расчетов по MCNP[8], выполненных в рамках представленной работы.

Интерес к экспериментам с замещением в данной статье обусловлен так же тем, что до сих пор не существует полномасштабных экспериментов для трансуранов, аналогично GODIVA и JEZEBEL.

В последнюю декаду появилось множество публикаций с оценками критических масс широкого спектра тяжелых нуклидов, включая трансплутониевые элементы, основанные на чисто расчетном моделировании нейтронно-физических процессов в гомогенных сферах [9]. Имеющаяся разница в оценках в основном обсуждается по отношению к используемым кодам или к библиотекам используемых данных. Интересно отметить, что согласно расчетам критическая масса ^{238}Pu оказывается заметно меньше, чем для ^{239}Pu : 8.24 против 10.26 кг для плотности 19.6 г/см^3 [10]. Хотя в экспериментах с замещением отмечается, что их критические массы приблизительно одинаковы [5]. Тот же тезис об одинаковости критических масс был положен в основу обсуждения материального барьера против нераспространения в статье Марка [11]. Рис. 2 дает представление об оценках критических масс, полученных на основе

- непосредственно эксперимента с замещением (отдельно выделенная точка, соответствующая радиусу вставки из эксперимента);
- моделирования эксперимента с помощью MCNP (критическая масса приводится в виде зависимости от радиуса вставки, принятого в качестве параметра);
- прямого расчетного определения критических масс сферы без отражателя с помощью различных программ (сплошные линии).

Рис. 2. Оценка критической массы ^{238}Pu (экспериментальное значение взято из [5])

Анализ чувствительности

При разработке перспективных ядерных реакторов представляется важным определить тип нуклида, вид реакции и энергетический диапазон нейтронов, которые оказывают наибольшее влияние на характеристики их безопасности. Определение этих характеристик необходимо для формирования требований к точности соответствующих ядерных данных. Программный комплекс SCALE позволяет решать данные задачи на основе линейной теории возмущений первого порядка, реализуемого с помощью контрольного модуля TSUNAMI-3D, блок-схема которого изображена на рис. 3.

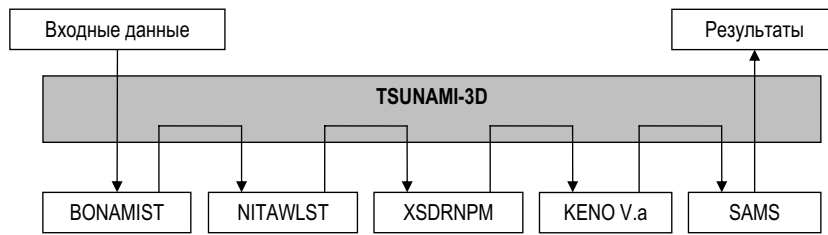


Рис. 3. Порядок следования данных по функциональному модулю TSUNAMI-3D

Функциональный модуль SAMS предназначен для оценки коэффициентов чувствительности и погрешности данных для каждого нуклида (i), реакции (j), геометрической подзоны (k) в групповом представлении (g) согласно уравнению

$$\left(S_{k, \Sigma_{j,g}^i} \right)_{total} \equiv \left(S_{k, \Sigma_{j,g}^i} \right)_{explicit} + \left(S_{k, \Sigma_{j,g}^i} \right)_{implicit}, \quad (5)$$

в котором правая часть представляет собой сумму явного (explicit) и неявного (implicit) коэффициентов чувствительности, определяемых выражениями

$$S_{k, \Sigma_{j,g}^i(r)} \equiv \frac{\Sigma_{j,g}^i(r)}{k} \frac{\partial k}{\partial \Sigma_{j,g}^i(r)}, \quad S_{k, \omega_i} \equiv \frac{\omega_i}{\Sigma_{j,g}^i} \frac{\partial \Sigma_{j,g}^i}{\partial \omega_i}, \quad (6)$$

где k – эффективный коэффициент размножения нейтронов; $\Sigma_{j,g}^i$ – макроскопическое сечение j -ой реакции, изотопа i , для энергетической группы g ; ω – параметр изменения (плотность, геометрия и другие параметры, оказывающие влияние на макроскопическое сечение) для анализа неявного коэффициента чувствительности.

В настоящей статье в качестве тестовой была выбрана модель, предложенная в работе [3], представляющая собой критическую сферу радиусом 38.5 см, моделирующую экспериментальную критическую сборку в виде гомогенного прямоугольного параллелепипеда, состоящего из UF_4 (с обогащением по ^{235}U 2%) и парафина. Соотношение водорода к ^{235}U составляет 293.9:1. Размеры экспериментальной модели 56.22×56.22×122.47 см.

Для тестовой задачи результаты расчетов коэффициентов чувствительности k_{eff} к ядерным данным водорода и урана-238 сведены в табл. 4. Прямой расчет коэффициента чувствительности производился следующим образом:

$$S = \frac{\gamma}{k} \cdot \frac{\partial k}{\partial \gamma} = \frac{\gamma}{k} \cdot \frac{k_{\gamma^+} + k_{\gamma^-}}{\gamma^+ - \gamma^-}, \quad (7)$$

где k – коэффициент размножения нейтронов; γ – параметр изменения (в данном случае это плотность).

Таблица 4

Сводная таблица по коэффициентам чувствительности

Изотоп	Реакция	Прямой расчет	TSUNAMI-3D
^1H	Total	$2.26 \cdot 10^{-1}$	$2.43 \cdot 10^{-1} \pm 6.19 \cdot 10^{-3}$
^1H	Scatter		$3.43 \cdot 10^{-1} \pm 6.17 \cdot 10^{-3}$
^1H	Elastic		$3.43 \cdot 10^{-1} \pm 6.17 \cdot 10^{-3}$
^1H	Capture		$-1.00 \cdot 10^{-1} \pm 4.93 \cdot 10^{-5}$
^1H	n, γ		$-1.00 \cdot 10^{-1} \pm 4.93 \cdot 10^{-5}$
^{235}U	Total	$2.57 \cdot 10^{-1}$	$2.60 \cdot 10^{-1} \pm 3.80 \cdot 10^{-4}$
^{235}U	Scatter		$5.39 \cdot 10^{-4} \pm 2.94 \cdot 10^{-6}$
^{235}U	Elastic		$3.57 \cdot 10^{-4} \pm 1.91 \cdot 10^{-6}$
^{235}U	n, n'		$1.74 \cdot 10^{-4} \pm 1.86 \cdot 10^{-6}$
^{235}U	n, 2n		$1.11 \cdot 10^{-5} \pm 6.15 \cdot 10^{-8}$
^{235}U	Fission		$3.70 \cdot 10^{-1} \pm 3.42 \cdot 10^{-4}$
^{235}U	Capture		$-1.11 \cdot 10^{-1} \pm 4.94 \cdot 10^{-5}$
^{235}U	n, γ		$-1.11 \cdot 10^{-1} \pm 4.94 \cdot 10^{-5}$

В отличие от прямых расчетов отклика на возмущение SAMS позволяет дифференцировать вклад в коэффициенты чувствительности отдельных реакций, как показано в табл. 4.

Коэффициенты чувствительности, получаемые с помощью TSUNAMI-3D, используются для получения интегральных индексов, среди которых

$$E_{sum} = E_f + E_c + E_s$$

$$E_f = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{g=1}^G S_{f,g}^{a,i} \cdot S_{f,g}^{e,i}, E_c = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{g=1}^G S_{c,g}^{a,i} \cdot S_{c,g}^{e,i}, E_s = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{g=1}^G S_{s,g}^{a,i} \cdot S_{s,g}^{e,i}, \quad (8)$$

где S – параметр, определенный согласно формуле (6); f , c и s – реакции деления, захват и рассеяние соответственно; a и e – материалы; M – нормировочный множитель

$$M = \sum_x \left(\sum_{i=1}^N \sum_{g=1}^G (S_{x,g}^{a,i})^2 \sum_{i=1}^N \sum_{g=1}^G (S_{x,g}^{e,i})^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

По интегральным индексам можно производить сравнение между моделями и, если интегральные индексы превышают значение 0.8 [12], то можно говорить о схожести рассматриваемых моделей. Получение интегральных индексов и их сравнение производится с помощью функционального модуля TSUNAMI-IP.

Нептуниевый эксперимент

В 2003 г. был проведен эксперимент с ^{237}Np (рис. 4). Он значительно отличается от экспериментов с замещением тем, что масса вставки была не несколько граммов, а несколько килограммов (~6 кг). Изотопный состав эксперимента на нептунии представлен в табл. 5. Данный эксперимент интересен и тем, что в отличие от урана и плутония у нептуния нет других изотопов, а его критическая масса (~70 кг) меньше, чем у урана с 20-процентным обогащением по ^{235}U , который является важным критерием при оценке нераспространения.

Для упрощенной модели нептуниевого эксперимента было произведено сравнение по интегральным индексам с голой критической сферой из чистого ^{237}Np

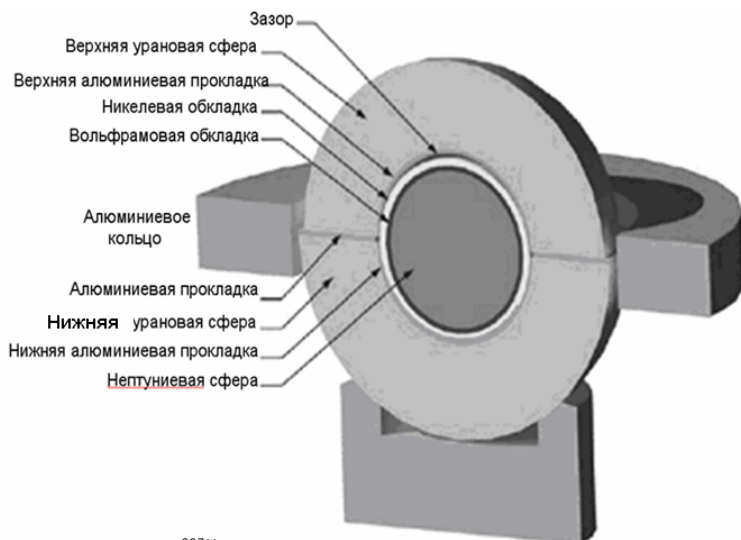


Рис. 4. Схема эксперимента с ^{237}Np

Таблица 5

Изотопный состав эксперимента на непунии

Изотоп	Плотность ($\times 10^{24}/\text{см}^3$)
Нептуниевая сфера	
^{237}Np	$5.09626 \cdot 10^{-2}$
^{233}U	$1.8577 \cdot 10^{-6}$
^{234}U	$2.9633 \cdot 10^{-7}$
^{235}U	$1.4047 \cdot 10^{-5}$
^{236}U	$7.8349 \cdot 10^{-8}$
^{238}U	$1.5626 \cdot 10^{-6}$
^{238}Pu	$8.2340 \cdot 10^{-7}$
^{239}Pu	$1.6271 \cdot 10^{-5}$
^{240}Pu	$1.1619 \cdot 10^{-6}$
^{241}Pu	$3.1166 \cdot 10^{-8}$
^{242}Pu	$1.6032 \cdot 10^{-7}$
^{241}Am	$3.3375 \cdot 10^{-7}$
^{243}Am	$9.1575 \cdot 10^{-5}$
Урановая сфера	
^{234}U	$4.8767 \cdot 10^{-4}$
^{235}U	$4.4349 \cdot 10^{-2}$
^{236}U	$2.2281 \cdot 10^{-4}$
^{238}U	$2.5147 \cdot 10^{-3}$

Таблица 6

Значение интегральных индексов

Интегральный индекс	Экспериментальная сборка*	Критическая сфера
E_{sum}	1	0.8089
C_k	1	0.9894

* – значение равно единице, т.к. происходило сравнение эксперимента самого с собой.

(табл. 6). Сравнение показало хорошее согласование (интегральные индексы были больше 0.8) между расчетной моделью (6 кг нептуния с обкладкой из высокообогащенного урана) и критической нептуниевой сферой без отражателя.

Планирование эксперимента по ^{234}U

Изотоп ^{238}Pu (период полураспада 87 лет) распадается в ^{234}U , способность к делению которого до сих пор не вызвала интереса. Однако предварительные расчеты показывают, что его критическая масса без отражателя намного меньше, чем у урана с обогащением 20% и примерно равна 150 кг. Таким образом, логика развития ядерной энергетики неизбежно приведет к необходимости защиты ^{234}U от распространения.

На рис. 5 приведены микроскопические сечения изотопов урана, взятых из библиотеки ENDF/B VI [13]. Как видно из рисунка, в области быстрых энергий нейтронов макроскопические сечения деления и неупругого рассеяния ^{234}U сравнимы с сечением ^{235}U .

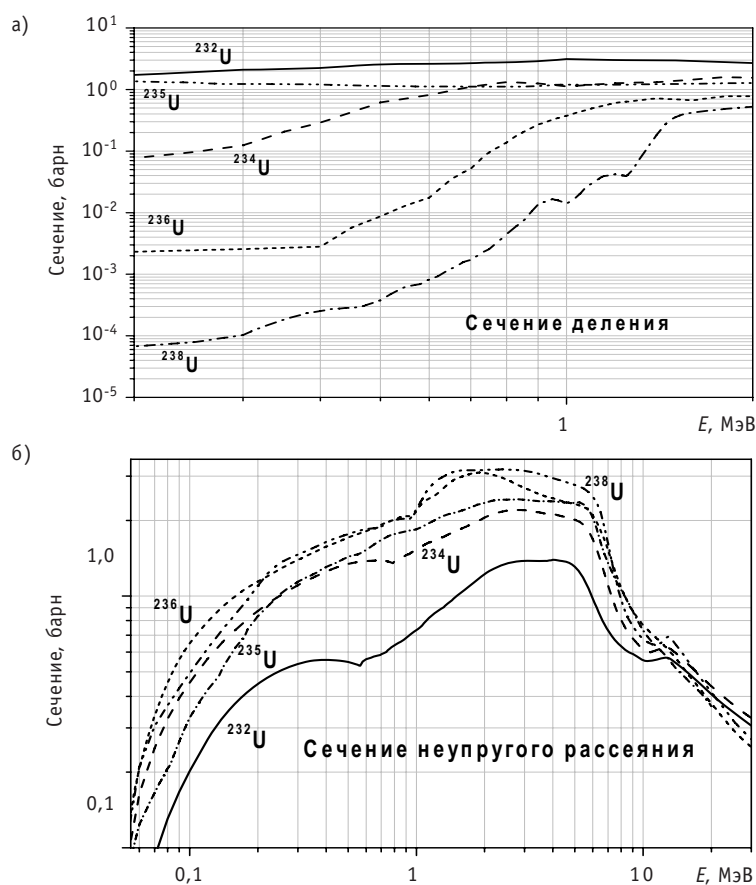


Рис. 5. Микроскопические сечения изотопов урана

Пользуясь логикой сравнения эксперимента с ^{237}Np и критической нептуниевой сферой без отражателя, в данной статье проводится оценка минимальной массы ^{234}U , необходимой для постановки эксперимента по оценке его критмассы. В качестве обкладки рассмотрен уран с изотопным составом, соответствующим эксперименту с нептунием (табл. 5). На рис. 6 представлена зависимость крити-

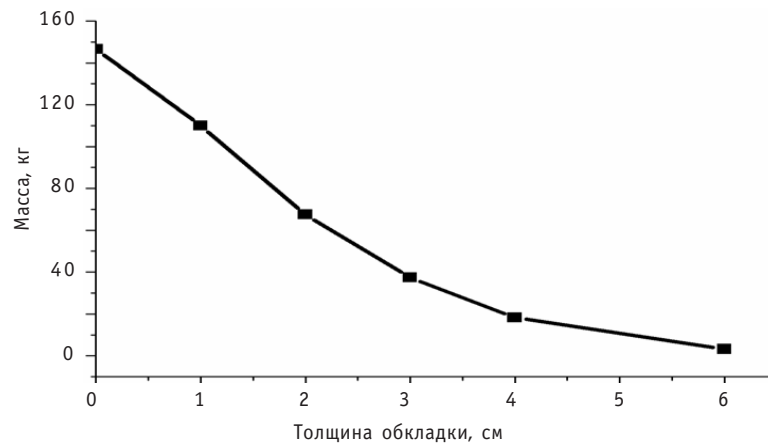


Рис. 6. Зависимость массы ^{234}U в критической сборке от толщины обкладки

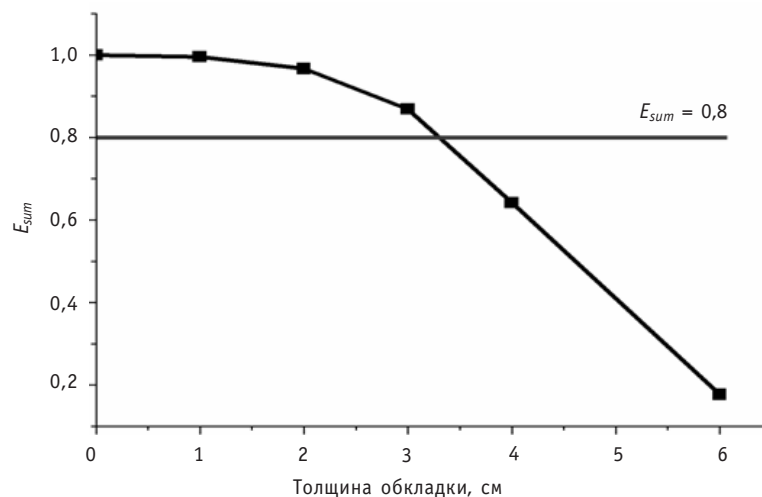


Рис. 7. Зависимость интегрального индекса E_{sum} от толщины обкладки

ческой массы ^{234}U от толщины обкладки. Для определения минимальной массы ^{234}U с обкладкой, которая хорошо согласуется со сферой из ^{234}U без отражателя проведено вычисление интегральных индексов (рис. 7). Как видно из рис. 6 и 7 минимальная масса ^{234}U с интегральными индексами более 0,8 составляет 30 кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье была проведена верификация лицензионного программного комплекса SCALE на критических экспериментах. Сравнение эффективного коэффициента размножения нейтронов критических сборок JEZEBEL и GODIVA, рассчитанного при помощи SCALE, с экспериментальными данными показало хорошее соответствие результатов, погрешность составила 0.3%. При использовании программного комплекса SCALE для моделирования экспериментов с замещением было установлено плохое соответствие между расчетными и экспериментальными данными. Это может быть обусловлено различием используемого с-распределения в транспортных кодах SCALE (KENO) и MCNP [5].

Так же была проведена верификация программного комплекса SCALE для расчета коэффициентов чувствительности, позволяющая (в отличие от прямого расчета) дифференцировать вклад в коэффициенты чувствительности отдельных ре-

акций. Проведенный анализ чувствительности нептуниевого эксперимента с вычислением интегральных индексов показал хорошее сравнение эксперимента с голой нептуниевой сферой без отражателя и с использованием интегральных индексов; проведено планирование эксперимента по уточнению критической массы ^{234}U , в результате которого была установлена минимальная критическая масса для проведения эксперимента.

Литература

1. *Loaiza D., Gerhman D.* End of an Era for the Los Alamos experiments facility: history of critical assemblies and experiment (1946-2003)//Annals of nuclear energy (2006).
2. SCALE-5, SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, RSICC, CCC-7252.
3. *Rearden T.B.* TSUNAMI-3D: Control module for three-dimensional cross-section sensitivity and uncertainty analysis for criticality, ORNL/TM-2005/39.
4. Intercomparisons of Calculation Made for GODIVA and JEZEBEL//JEFF Report 16, NEA/OECD (1999).
5. *Brewer R.W.* Plutonium-238 and plutonium-239 replacement measurements performed using JEZEBEL//NEA/NSC/DOC/(95)03/VII.
6. *Loaiza D.* Neptunium-237 sphere reflected by hemispherical shells of highly enriched uranium//NEA/NSC/DOC/(95)02/VII.
7. *Wimett T.F., Orndoff J.D.* Applications of GODIVA II Neutron Pulses/UN International Conference «Atom for Peace», Geneva, p/419 (1957).
8. *Briesmeister J.F.* MCNP – A General Monte-Carlo N-Particle Transport Code. LA-12625-M, (1993).
9. Wright R.Q., Jordan W.C., Westfall R.M. Critical Masses of Bare Metal Spheres Using SCALE/XSDRN//Transaction of ANS, 2000 summer meeting.
10. *Artisyuk V.V., Saito M. et al.* Proliferation Resistance Issues of Protected Plutonium Production/Proc. of Consultancy Meeting on Protected Plutonium Production (PPP-Project) (19-20 June, 2003, IAEA Headquarters, Vienna).
11. *Mark J.* Explosive properties of reactor grade plutonium//Science&Global Security, 4, 111 (1993).
12. *Broadhead L., Rearden B.T., Hopper C.M.* Sensitivity- and uncertainty-based criticality safety validation techniques//Nuclear science and engineering: 146, 340366~2004.
13. Взято с <http://www-nds.iaea.org/>.

Поступила в редакцию 5.07.2007

УДК 621.039.58

The Automated Ultrasonic Device of Removal of Residual Pressure in Welded connections of the atomic power station \A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.G. Kalenishin, A.I. Romantsov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 7 pages, 7 illustrations. – References – 9 titles.

The method of removal residual pressure is submitted by influence of ultrasound a wave on welded connection during welding. Advantage of the submitted method before traditional methods is shown. The description of the automated ultrasonic device of removal of the residual pressure moving synchronously with the welding automatic device is given.

УДК 539:551.508

Correction of Data on Radionuclide Contents in the Atmospheric Boundary Layer as Inferred from the Measurements of Natural Radionuclide Contents \M.V. Propisnova, V.M. Kim; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 4 pages, 2 illustrations. – References – 18 titles.

Presented is a method used for correction of radio nuclide volumetric activities in the atmospheric boundary layer based on the measurements of ^7Be volumetric activity made at the neighboring observation sites.

УДК 621.039.51:004

Verification of SCALE 5 code package: Nuclear Safety \A.V. Egorov, S.N. Filimonov, V.V. Artisyuk, A.N. Shmelev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 11 pages, 7 illustrations. – References – 13 titles.

The purpose of present paper is verification of licensed computer code package SCALE 5, used in INPE for criticality safety and burnup calculations. This verification oriented on fundamental problems of nuclear safety, constrained with criticality analysis. Criticality calculations of classical uranium and plutonium experiments (GODIVA, JEZEBEL) and heterogeneous spherical assembly for accurate definition of critical mass of transuranics (^{244}Cm , ^{237}Np , ^{238}Pu) has been done. Also sensitivity analysis of obtained results for nuclear data was presented. On the basis of sensitivity and uncertainly analysis suggested model for experiment with ^{234}U for specification its critical mass.

УДК 621.039.548

Creation of Neutron-Physical Conditions in the MIR Reactor Suitable for Testing VVER Fuel Rods under Local Accidental Conditions \V.V. Kalygin, I.V. Kiseleva, A.P. Malkov, V.N. Shulimov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 8 pages, 1 table, 3 illustrations. – References – 13 titles.

Considered are issues of creation of conditions for safe testing of VVER fuel rods in the MIR reactor core under conditions characteristic of the LOCA accidents. The design of experimental devices was defined, core configuration and position of control rods were chosen so that the required parameters can be reached at a minimum reactor power and safety of the experiments can be provided. Data on the reactor testing results are presented.

УДК 621.039.548

Testing of VVER Fuel Rods in the MIR Reactor under Power Ramping Conditions \A.V. Burukin, A.F. Grachev, V.V. Kalygin, A.B. Ovchinnikov, V.P. Smirnov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 8 pages, 2 tables, 7 illustrations. – References – 9 titles.

The testing methodology of standard and refabricated VVER fuel rods in the loop facility of research reactor MIR is considered at different fuel burnups under power ramping conditions. Taking account of the analysis of main requirements to such tests, methodical approaches to the tests were presented including peculiar features of the reactor core configuration and provision of a fast power increase. Summarized data on the performed in-pile experiments, where the above methodology was used, and results of post-irradiation material science experiments are presented.