

ПОДКРИТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ ТЕРАПИИ: РАСЧЕТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЧКОВ

Ю.А. Кураченко

Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск



Описана расчетная технология применения комбинированных методик для нейтронных пучков нового класса облучающих установок. Применительно к задачам нейтронозахватной терапии получены «*in air*» и «*in phantom*» характеристики пучков. Показано, что новые установки, сочетающие безопасность и простоту технологии изготовления и эксплуатации, по качеству пучков практически не уступают существующим и проектируемым реакторным установкам для нейтронозахватной терапии.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] предложен новый класс ядерно- и радиационно безопасных нейтронных облучающих установок, основанных на глубоко подкритических сборках ($k_{eff} \leq 0.90$), которые «подсвечиваются» ускорителями заряженных частиц. В настоящей работе пучок одной из предложенных подкритических сборок (ПКС), использующей реакцию ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ при энергии дейтонов 16 МэВ, исследован на соответствие критериям качества [2] для нейтронозахватной терапии (НЗТ). Как показано в [3, 2], «вторичные» критерии «*in air*» для композиций относительно небольшой оптической толщины могут быть рассчитаны методом Монте-Карло с использованием оценки «поток в детекторе». Но «первичные» [2] критерии «*in phantom*», требующие расчета транспорта излучений в ткани фантома, могут быть получены только посредством численного решения уравнения переноса с использованием комбинированных методик [4]. Эти методики объединяют программы расчета методом Монте-Карло [5, 6] и методом дискретных ординат [7] для обеспечения адекватного моделирования транспорта излучений от источника по каналу вывода к облучаемому объекту. Следует подчеркнуть, что для рассматриваемых установок применение оценки «поток в детекторе» по программе MCNP дает недостаточно надежные результаты из-за наличия большого объема рассеивателя (~ 20 т свинца), что показано в [8]. Из этого следует, что результаты, получаемые с помощью программы MCNP, должны быть верифицированы расчетом по независимой методике.

РАСЧЕТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Решение задачи определения характеристик «*in air*» и «*in phantom*» выполнено в такой последовательности:

© Ю.А. Кураченко, 2009

- расчет энергоуглового распределения нейтронов и фотонов реакции ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ с помощью программы MCNPX [6];
- применение полученного распределения в качестве источника в расчетах характеристик «*in air*» параллельно по программам MCNP [5] и КАСКАД [7];
- получение характеристик «*in phantom*» независимыми расчетами по программам MCNP и КАСКАД.

Применение известной отечественной 2D-программы КАСКАД стало возможным на основании осевой симметрии модели установки (рис. 1), при этом коническая часть коллимационной системы моделировалась цилиндрическими кольцами достаточно малых размеров ($\Delta r, \Delta z \sim 0.5$ см). На рисунке 1 представлен один из вариантов оптимизированного блока вывода [1] с цилиндрическим фантомом¹ на выходе ($\varnothing \times h = 30 \times 20$ см²).

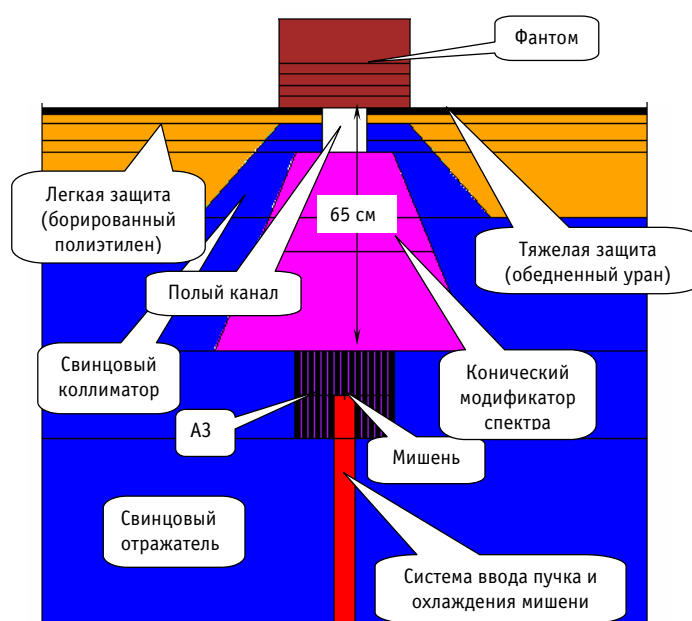


Рис. 1. Осевое сечение основной расчетной модели

Интегральные характеристики нейтронов и фотонов источника, полученные с помощью программы MCNPX, представлены на рис. 2, 3. В последующих расчетах характеристик пучка по программам MCNP и КАСКАД использовались, естественно, дифференциальные по углу и энергии данные источника с шагом по угловой переменной 5° . Энергетическая зависимость нейтронов источника в дальнейших расчетах по программе MCNP представлена 30 группами равной (по лентаргии) ширины в диапазоне 0.001–15 МэВ. В расчетах по программе КАСКАД использовалось групповое представление библиотеки БНАБ 78/80 [10]: 28 энергетических групп для нейтронов и 15 групп для фотонов.

Спектры $S(E)$ на рис. 2, 3 представлены в одинаковой нормировке

$$\int_0^\infty S(E) dE = 1, \quad (1)$$

поэтому необходимо отметить, что абсолютные значения выхода нейтронов и

¹ Состав: четырехкомпонентный фантом ткани МКРЕ [9] плотностью 1.0 г/см³, принятый международным сообществом для однозначного сопоставления моделей и результатов.

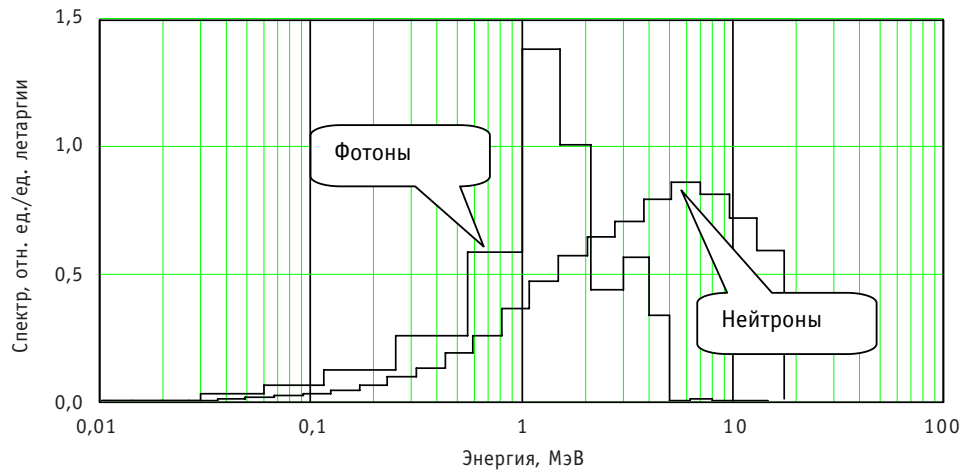


Рис. 2. Интегральные по углу энергетические спектры выхода реакции ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$

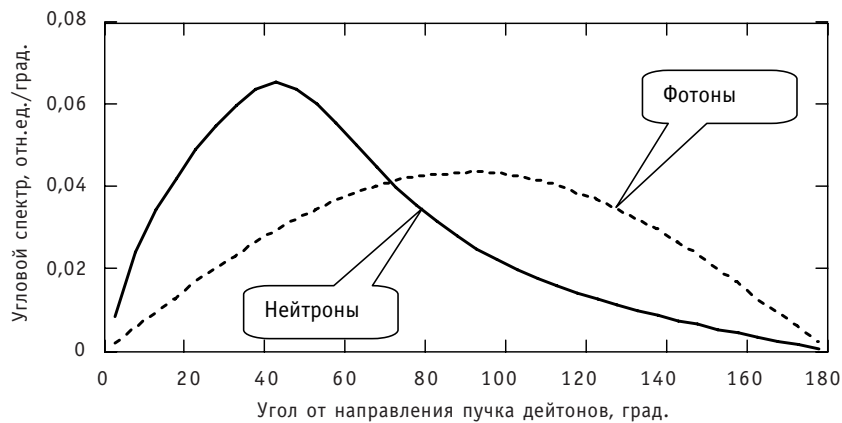


Рис. 3. Интегральные по энергии угловые спектры выхода реакции ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$

фотонов различаются существенно: $5.82 \cdot 10^{-3}$ и $2.27 \cdot 10^{-6}$ част./дейтон соответственно. При этом различаются и средние энергии продуктов реакции: 4.43 МэВ (нейтроны) и 1.21 МэВ (фотоны). Учитывая представленные характеристики выхода продуктов реакции, а также то, что блок вывода пучка содержит большое количество тяжелого материала (рис. 1), в дальнейших расчетах по программе MCNP фотоны «поджигающей» реакции не учитывались. В расчетах по программе КАСКАД фотоны источника учитывались, но анализ окончательных результатов (как «*in air*», так и «*in phantom*») показал их пренебрежимо малый вклад.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Характеристики «*in air*»

На рисунке 4 представлены спектральные распределения нейтронов, полученные с помощью двух программ, а в табл. 1 приведены основные характеристики «*in air*» [2]. Для сопоставления приведены также данные для пучка проектируемой медицинской реакторной установки (РУ) «МАРС» [3], блок вывода которого представлен на рис. 5.

Данные (рис. 4) свидетельствуют о практическом совпадении всех трех спектров в важнейшей для НЗТ области промежуточных нейтронов. Различия в спектрах при $E > 0.2$ МэВ для ПКС могут быть следствием а) гомогенизации активной

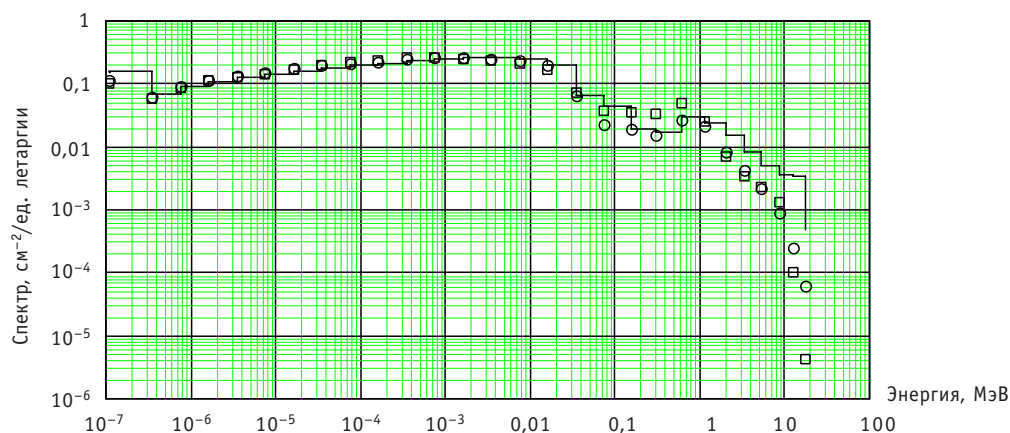


Рис. 4. Спектральные характеристики нейтронов на выходе канала (каждый спектр нормирован на свой полный флюенс): — – MCNP; ○ – KASKAD; □ – РУ «МАРС»

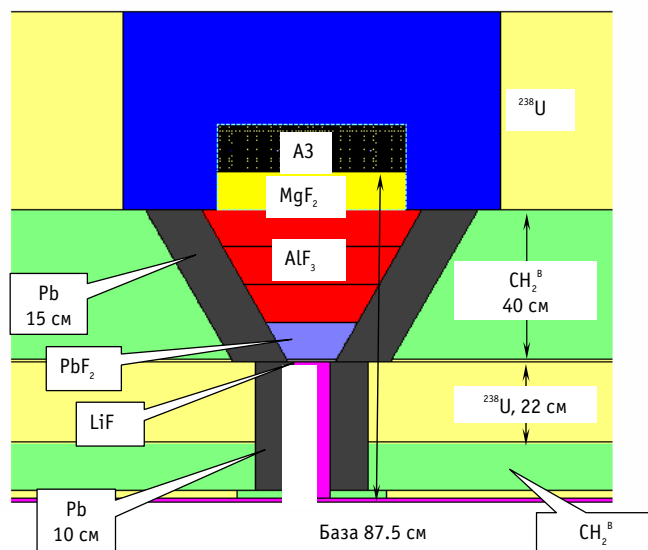


Рис. 5. Осевое сечение блока вывода пучка РУ «МАРС»

Таблица 1

Характеристики «in air» пучка для НЗТ

	$\Phi_{epi}^{epi}, 10^9$ см ² с ⁻¹	$E_{aver},$ МэВ	D_{tr} сГр/мин	$D/\Phi_{epi}^{epi}, 10^{-11}$ сГр·см ²	$D_{fast}/\Phi_{epi}^{epi}, 10^{-11}$ сГр·см ²	J_{epi}/Φ_{epi}
Желательные значения	≥ 1	–	0	$< 2 - 5$	$< 2 - 5$	≥ 0.7
KASKAD	0.987	0.0269	2.93	4.95	18.4	0.71
MCNP	1.01	0.0489	3.52	5.80	24.1	0.77
РУ «МАРС»	0.553	0.0337	2.13	6.42	14.6	0.77

зоны в расчетах по программе KASKAD и b) проблемной ориентированности библиотеки БНАБ (расчет реакторов деления и их защиты). В этой связи следует отметить, что средняя энергия нейтронов деления 1.98 МэВ (деление ^{235}U тепловыми нейтронами), а средняя энергия нейтронов реакции $^9\text{Be}(d,n)^{10}\text{B}$ – 4.43 МэВ. Отли-

чие спектров ПКС от спектра РУ «МАРС», кроме того, обусловлено различием коллимационных систем блока вывода для этих двух установок. В частности, суммарная толщина модификатора спектра для РУ «МАРС» на 5 см больше, чем для ПКС. Кроме того, различаются материалы отражателей и защиты и общие габариты блоков вывода пучков. В целом излучение на выходе канала ПКС более «жесткое», чем на выходе РУ «МАРС». Это обусловлено не только различием источников для двух сопоставляемых установок, но и меньшими габаритами ПКС в направлении пучка, что необходимо при обеспечении должной защиты от излучений [1], для удержания требуемой интенсивности эпитеплового пучка и, соответственно, приемлемого времени экспозиции.

В таблице 1 представлены плотности потока эпитепловых нейтронов на выходе пучка, средние энергии нейтронов, мощности доз гамма-излучения, а также отношения дозы гамма-излучения и дозы быстрых нейтронов к эпитепловому потоку. Отношения «вредных» доз к эпитепловому потоку характеризуют, в известной степени, лучевую нагрузку на здоровую ткань. В последнем столбце таблицы представлено отношение «ток-поток» для эпитепловых нейтронов, характеризующее направленность пучка и, тем самым, проникающую способность «полезных» нейтронов. В этой связи следует отметить, что расчетные оценки деформации углового распределения в ткани показывают, что направленность пучка быстро «размывается» при транспорте в ткани, поэтому различие J_{epi}/Φ_{epi} в диапазоне 0.7–1.0 на входе пучка («*in air*») несущественно начиная с небольших глубин в ткани (1.5–2 см).

В целом характеристики пучка ПКС «*in air*», как свидетельствуют данные табл. 1, вполне удовлетворительно согласуются для двух примененных расчетных методов и не уступают характеристикам пучка РУ «МАРС». Следует отметить, что в полной мере критериям «*in air*», сформулированным как «желательные» в первой строке табл. 1, не удовлетворяют пучки ни одной из установок – как существующей, так и проектируемой.

Характеристики «*in phantom*»

Достаточно подробно критерии пучка «*in phantom*» описаны в [2], поэтому здесь кратко укажем только те из них, которые далее сопоставляются:

- *предельная глубина «выигрыша»* AD^2 – глубина x в ткани, на которой доза в опухоли становится равной максимальной дозе в ткани: $D_{tumor}(x) = D_{tissue}^{max}$; именно до этой глубины применение технологии НЗТ является эффективным;
- «*выигрыш*» AR^3 – отношение интегралов по глубине ткани, характеризующее степень «вредного» воздействия на здоровую ткань,

$$AR = \int_0^{AD} D_{tumor}(x) dx \bigg/ \int_0^{AD} D_{tissue}(x) dx; \quad (2)$$

- *мощность дозы* в опухоли на предельной глубине «выигрыша» $ADDR^4$ – $D_{tumor}(AD)$; это «клинический» критерий, определяющий время необходимой экспозиции, – чем больше $ADDR$, тем меньше это время при прочих равных;
- *мощность фоновой дозы* в здоровой ткани на один нейтрон (без «борной» составляющей) BD^5 ; этот критерий характеризует роль «не нейтронозахватных» компонент дозы, и чем он меньше, тем эффективнее НЗТ;

² Advantage Depth

³ Advantage Ratio

⁴ Advantage Depth Dose Rate

⁵ Background Dose

⁶ Therapeutic Ratio

• *терапевтическое отношение* TR^6 – отношение «полезной» дозы в опухоли на глубине x к максимальной «вредной» дозе в ткани на оси пучка:

$$TR(x) = \frac{D_{tumor}(x)}{D_{tissue}^{max}}. \quad (3)$$

В таблице 2 представлены первые четыре из описанных выше характеристик «*in phantom*» пучков для НЗТ некоторых действующих и проектируемых реакторов в сопоставлении с данными для предлагаемой установки с ПКС. Начинает таблицу эталонный для НЗТ пучок на реакторе с конвертером тепловых нейтронов (КТН), затем следуют два пучка, применяемых для НЗТ. Пучок на реакторе TAPIRO находится на стадии предклинических исследований. Более подробная информация об этих пучках в [2].

Таблица 2

Характеристики существующих и проектируемых пучков для НЗТ

Реактор	MIT США	Studsvik AB Швеция	Espoo Финл.	TAPIRO Италия	РУ«МАРС»	ПКС
Мощность, МВт	5	1	0.25	0.005	0.010	0.001
$\Phi_{epi}, 10^9 \text{ см}^{-1} \text{ с}^{-1}$	4.2	1.4	1.1	0.8	0.55	1.0
AD , см	9.7	8.4	9.0	9.4	7.9	8.3
AR	5.0	4.9	5.8		5.2	4.9
$ADDR$, сГр-экв. /мин	172	67	45	32	33	43

Из представленных в табл. 2 данных следует, что качество пучка ПКС для задач НЗТ практически не уступает качеству пучков существующих и проектируемых реакторов. Исключением является пучок реактора MIT [11], который из-за наличия КТН существенно выделяется из всех по критерию $ADDR$. Но следует отметить, что по совокупности характеристик (мощность установки, безопасность эксплуатации, габариты и т.д.) ПКС находится вне конкуренции.

В таблице 3 приведена пространственная зависимость критерия BD для РУ «МАРС» и ПКС; эталонный пучок представлен одним значением на неуказанной глубине. Представленные в таблице данные свидетельствуют, что и по данному критерию пучок ПКС не уступает эталонному пучку MIT на глубинах в ткани, наиболее значимых для НЗТ.

Представляет известный интерес пространственное распределение компонент дозы, приведенное, в частности, в [2] для ниши экспериментальных устройств реактора ВВРц, пучок которой по своим характеристикам практически не уступа-

Таблица 3

Отношение фоновой мощности дозы в ткани к плотности полного потока нейтронов (BD , Гр-экв. $\text{см}^2/\text{нейтрон}$)

Установка	Глубина в ткани, см			
	2	4	6	8
MIT	$2.8 \cdot 10^{-12}$			
РУ «МАРС»	$1.43 \cdot 10^{-12}$	$1.63 \cdot 10^{-12}$	$2.14 \cdot 10^{-12}$	$3.27 \cdot 10^{-12}$
ПКС	$1.74 \cdot 10^{-12}$	$1.98 \cdot 10^{-12}$	$2.53 \cdot 10^{-12}$	$3.50 \cdot 10^{-12}$

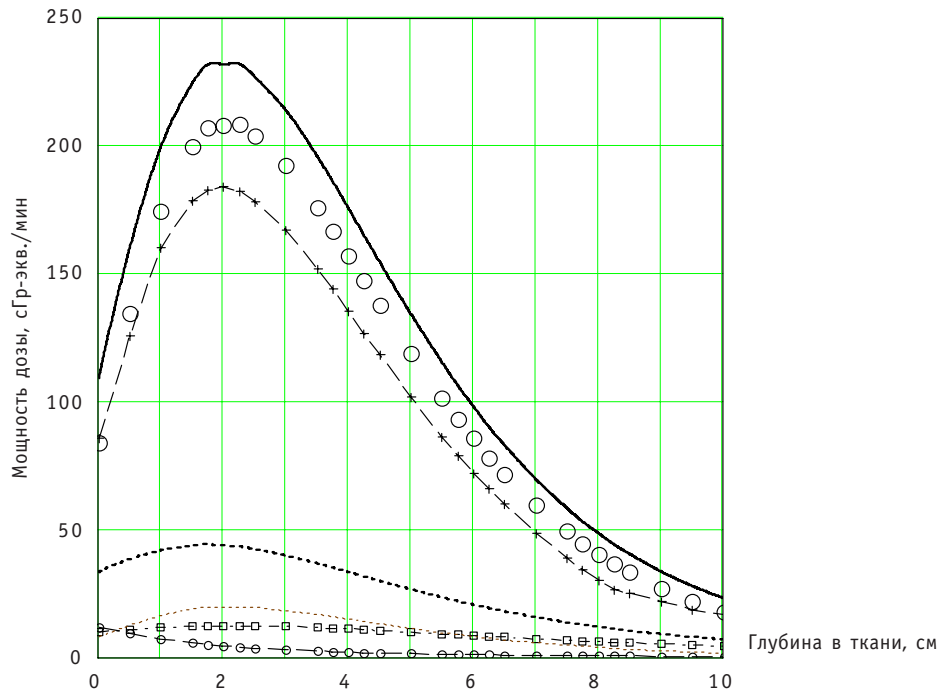


Рис. 6. Мощности доз в опухоли и ткани и их компоненты для пучка ПКС. Для сопоставления представлено распределение дозы в опухоли для пучка РУ «МАРС»: ———— — доза в опухоли; - - - - - доза в ткани; ○○○ — доза быстрых нейтронов; ■■■ — доза гамма-излучения; ○○○ — борная составляющая дозы в опухоли; - - - - - борная составляющая дозы в ткани; +++ — доза в опухоли (РУ «МАРС»)



Рис. 7. Терапевтическое отношение в зависимости от глубины в ткани: ———— — расчет по программе КАСКАД; ○○○ — расчет по программе MCNP; ■■■ — РУ «МАРС»; ○○○ — эталонный пучок реактора МИТ

ет эталонному. На рисунке 6 представлены компоненты мощности дозы в опухоли и ткани для пучка ПКС в сопоставлении с дозой в опухоли для пучка РУ «МАРС». Из представленных данных видно, что в полном соответствии с характеристиками «*in air*» доза в опухоли, создаваемая пучком ПКС, больше дозы, создаваемой пучком РУ «МАРС». Но пространственное распределение этих доз подобно, что свидетельствует о достаточной близости спектральных и пространственных распределений излучений в ткани, формируемых коллимационными системами и прилегающей защитой от излучений обоих пучков.

На рисунке 7 представлена, пожалуй, наиболее информативная характеристика «*in phantom*» – терапевтическое отношение. Данные рис. 6 свидетельствуют о том, что и по терапевтическому отношению пучок ПКС не уступает пучку специализированной медицинской РУ «МАРС» и достаточно близок по этой характеристике к эталонному значению пучка МП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчетные технологии, развитые и примененные для получения функционалов полей излучений установок нового класса, показали состоятельность. Отметим особенности этих технологий и их применения.

1. Единственный тип оценки, который может быть результативно применен при решении данных задач глубокого проникновения по программам MCNPX/MCNP, – оценка «потока в детекторе». Эта оценка в данном случае при наличии больших габаритов и масс рассеивателей (~ 20 т свинца) не является надежной. В частности, решение имеет медленную и немонотонную сходимость и т.п.

2. Применение программы решения уравнения переноса методом дискретных ординат (КАСКАД) также вызывает сомнения в надежности получаемых результатов. Прежде всего геометрическая модель установки для расчетов по программе КАСКАД отличается от «точной» модели, принятой в расчетах методом Монте-Карло: а) активная зона установки в расчетах по 2D-программе КАСКАД с необходимостью гомогенизировалась и б) конический коллиматор установки в расчетах по программе КАСКАД моделировался набором ступенчатых цилиндрических колец.

Отметим, что гомогенизация компактной и резко гетерогенной активной зоны с высокой плотностью материала оказывает сильное влияние даже на ее интегральные характеристики. Так, если для «точной» геометрии расчет по программе MCNP дает $k_{eff} \approx 0.90$, то для гомогенизированной активной зоны это уже $k_{eff} \approx 0.93$; расчет же по программе КАСКАД дает $k_{eff} \approx 0.96$. Такие расхождения с неизбежностью порождают сомнения в надежности результатов.

Применяемая в расчетах по программе КАСКАД библиотека БНАБ ориентирована на расчет реакторов и их защиты. Но спектральное распределение излучений в реакторных установках (особенно в активной зоне и ее ближней окрестности) резко отличается от спектра нейтронов источника в ПКС (рис. 2).

3. Расчетные исследования позволили снять сомнения в надежности получаемых результатов: данные, полученные по описанным двум методикам, согласуются вполне удовлетворительно. В дополнение к приведенным выше результатам расчетов укажем, что значения полного потока нейтронов на выходе пучка ПКС, полученные с помощью программ MCNP и КАСКАД, различаются лишь на ~ 6.5%.

4. Специфика переноса излучений в ПКС потребовала применения достаточно густых пространственных и угловых сеток в расчетах по программе КАСКАД. Так, типичное разбиение содержало сетку ~ 1500 угловых направлений по полярному углу, причем эта сетка была резко сгущена в направлении пучка.

Что же касается собственно характеристик новых облучающих систем, то результаты расчетных исследований, часть которых приведена в работе, позволили сделать вывод о вполне приемлемом качестве оптимизированных пучков ПКС применительно к задачам НЗТ. При этом предложенные установки обладают очевидными преимуществами:

- абсолютная ядерная и радиационная безопасность;
- простота сооружения и эксплуатации;
- малая загрузка топлива (1.5–1.8 кг ^{235}U при обогащении 17%);
- отсутствие системы СУЗ;
- отсутствие системы охлаждения;
- отсутствие движущихся частей установки;
- изготовление из существующих конструктивных элементов и материалов, испытанных длительной практикой;
- относительно малые габариты.

Литература

1. Кураченко Ю.А., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Подкритические системы для нейтронозахватной терапии // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – №3. – С. 47-56.
2. Кураченко Ю.А., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Критерии качества нейтронных пучков для лучевой терапии // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – №1. – С. 139-149.
3. Кураченко Ю.А., Казанский Ю.А., Левченко А.В., Матусевич Е.С. Вывод нейтронных пучков и защита медицинского реактора «МАРС» // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – №4. – С. 36-48.
4. Кураченко Ю.А. Расчетные технологии для реакторных пучков медицинского назначения // Альманах клинической медицины, т. XVII, Часть 1. – М.: МОНИКИ – 2008. – С. 346-349.
5. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Volume I: Overview and Theory. *Authors:* X-5 Monte Carlo Team/ LA-UR-03-1987. April 24, 2003.
6. MCNPX Users Manual Version 2.4.0. *Authors:* MCNPX Publishing Team/ LA-CP-02-408. September 2002.
7. Voloschenko A.M., Shwetsov A.V. The KASKAD-1 Two-Dimensional Discrete Ordinates Nodal Transport Code/Proceedings of International Topical Meeting on Advances in Mathematics, Computations and Reactor Physics (Pittsburgh, USA, April 28 – May 2). V. 5. – P. 30.3 4-1. 1991.
8. Кураченко Ю.А. Оптимизация блока вывода реакторного пучка для лучевой терапии // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – №1. – С. 129-138.
9. Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues. ICRU Report 46; 1992.
10. Абагян Л.П., Базазянц Н.О., Николаев М.Н. и др. Групповые константы для расчета реакторов и защиты. Справочник – М.: Энергоиздат, 1981.
11. Zamenhof R.G., Clement S.D., Harling O.K., Brenner J.F., Wazer D.E., Madoc-Jones H., Yanch J.C. Monte Carlo Based Dosimetry and Treatment Planning for Neutron Capture Therapy of Brain Tumors, In: Proceedings of an International Workshop on Neutron Beam Design, Development, and Performance for Neutron Capture Therapy, Harling O.H., Bernard J.A., Zamenhof R.G., (eds.), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, (March 29-31, 1989).

Поступила в редакцию 03.11.2008

The paper presents the results of experimental investigation of changes in physical characteristics of the SM reactor core in the course of its conversion to new fuel with the increased content of U-235 in a fuel rod. The methodical peculiarities of the experiments are described. The functional dependences and values of the temperature and power coefficients of reactivity have been determined as well as the effectiveness and calibration characteristics of the control rods and reactivity effects when reloading the fuel assemblies. The performed micro-runs have been analyzed in terms of the feasibility of the reactor with pilot fuel assemblies. Data have been obtained to introduce changes into the reactor design documents and to revise the safety analysis. Based on the obtained results, the recommendations have been made on the possibility to use the new pilot fuel assemblies as standard ones.

УДК 621.039.52:615.849.1

Subcritical Systems for Neutron Therapy: Simulation Techniques & Performance Criteria \Yu.A. Kurachenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 3 tables, 7 illustrations. – References, 11 titles.

Simulation techniques based on combined transport codes application to new neutron facilities beams are proposed. «In air» & «in phantom» characteristics of the facilities are optimized for the neutron capture therapy. It is displayed that new facilities provide absolute safety, simplicity of technology and exploiting; they are highly competitive with these existing and designing ones for the neutron capture therapy.

УДК 621.039.553.34

Status of Study on Heat Transfer in Fuel Pin Bundles and Some Problems of Liquid-Metal Cooling \A.V. Zhukov, J.A. Kuzina, A.P. Sorokin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 14 pages, 1 table, 11 illustrations. – References, 28 titles.

Data on heat transfer and temperature fields of fuel pins in triangular and square lattices with liquid-metal cooling are systematized. Necessity of detailed additional studies for square pin lattices is emphasized.

УДК 621.039.51:536.248.2

The generalize of Experimental Data on the Critical Heat Flux in the Clusters with Triangular Disposition of Rods \A.A. Ivashkevitch; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 6 pages, 2 tables. – References, 18 titles.

The correlation for the critical heat flux in form $q_{кр} = x_{bx} L_k$ in the uniformly heated clusters with the triangular disposition of the rods is obtained. As compared with the early suggested correlations the proposed correlation generalizes the experimental data in the more broad diapasons of the regime parameters and with smaller standard deviation.

УДК 621.039.58:532.529.5

Experimental Study of Non-equilibrium Thermal-hydraulic Processes in a Passive VVER Core Reflooding System \A.V. Morozov, O.V. Remizov, A.A. Tsyganok; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 5 titles.

The paper presents the results of experimental investigations of the interaction between saturated steam and cold water at its flowing out from a vertical tube of the passive VVER core reflooding system from the second-stage hydroaccumulators. A physical model of the process of water outflow into countercurrent saturated steam flow in a vertical blanked-off tube with a variable level has been proposed. The semi-empirical correlation has been obtained for calculating the time of discharge from vertical blanked-off tubes.

УДК 621.039.58:536.423

Experimental Measurement of the Thermal Capacity of the VVER Steam Generator Model in Condensation Mode in the Event of the Beyond Design Basis Accident \A.V. Morozov, O.V. Remizov, A.A. Tsyganok, D.S. Kalyakin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 7 illustrations. – References, 4 titles.

The experimental measurement of the thermal capacity of the VVER steam generator model in