

УДК 615.47

О.О. Новожилова, А.Г. Мелузов, Н.Л. Иванова

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ В МЕДИЦИНСКОЙ ПРАКТИКЕ

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассмотрены принципиальные возможности использования в медицинской практике ядерного реактора, как специализированного инструмента для проведения лучевой терапии. Приводятся физические характеристики одного из перспективных видов лучевой терапии – нейтронно-захватной. Представлен обзор зарубежных и отечественных ядерных установок и проектов, предназначенных для данной цели. Сформулированы базовые требования к ядерной установке как специализированному медицинскому инструменту.

Ключевые слова: ядерный реактор, лучевая терапия, нейтронно-захватная терапия.

Одной из проблем современной клинической медицины является борьба с онкологическими заболеваниями. Наряду с традиционными способами лечения в настоящее время перспективным направлением представляется нейтронная терапия, обладающая высокой эффективностью за счет более выраженного повреждающего действия раковых клеток по сравнению с электронами, рентгеновским и γ -излучением.

Нейтронная терапия подразделяется на два вида: нейтронно-захватная (НЗТ) и терапия быстрыми нейтронами или нейтронно-соударная (НСТ).

Идея НЗТ была сформулирована в 1936 году после открытия нейтрона. Ее физические основы просты и элегантны. Это бинарная система, использующая два отдельных компонента для создания терапевтического эффекта. Каждый компонент в отдельности не обладает противоопухолевыми свойствами, но их комбинация производит высокий летальный эффект. Первый компонент – нетоксичный, нерадиоактивный изотоп, обладающий большим сечением поглощения нейтронов (сотни тысячи барн), который селективно накапливается или вводится в опухолевые ткани, например, изотопы бор-10, гадолиний-64 и кадмий-113 (в эксперименте). Второй – пучок плотноионизирующего излучения необходимой геометрической формы и спектрального состава (медленные нейтроны). Таким образом, достигается прицельное (таргетное) уничтожение опухолевых и сохранение здоровых клеток.

В результате поглощения нейтрона изотопом бора-10 образуется возбужденное ядро бора-11, которое за 10^{-12} секунды распадается на ядро лития-7 и альфа-частицу, разлетающиеся с большой энергией. В 6 % случаев их суммарная энергия 2,8 МэВ, а в 94 % – 2,3 МэВ, поскольку 0,48 МэВ выносится гамма-квантом. Эти заряженные частицы быстро тормозятся: ядро лития на длине 5 мкм, альфа частица на 7 мкм. Поскольку размер клетки порядка 10–12 мкм, то 80 % энергии ядерной реакции выделяется именно в той клетке, которая содержала ядро бора, которое поглотило нейтрон. Терапевтический эффект при этом достигается в основном за счет разрыва одной или двух спиралей нитей ДНК заряженными продуктами ядерных реакций медленных нейтронов с изотопом бора-10 (рис. 1).

Если оставить проблему доставки дозообразующих ^{10}B -содержащих препаратов к опухоли, то следующим шагом является создание интенсивного источника нейтронов, желательного различных энергий для проведения разных типов терапии. Нейтроны можно получать в результате реакций деления в ядерном реакторе или в теле мишени ускорительно-управляемой системы.

В настоящее время для нейтронной терапии используются медицинские пучки нейтронов, получаемые на многоцелевых исследовательских реакторах. Поэтому представляется целесообразным создание специализированного медицинского реактора с пучком нейтронов заданных параметров как медицинского инструмента, с возможностью расположения его непосредственно в клинике.

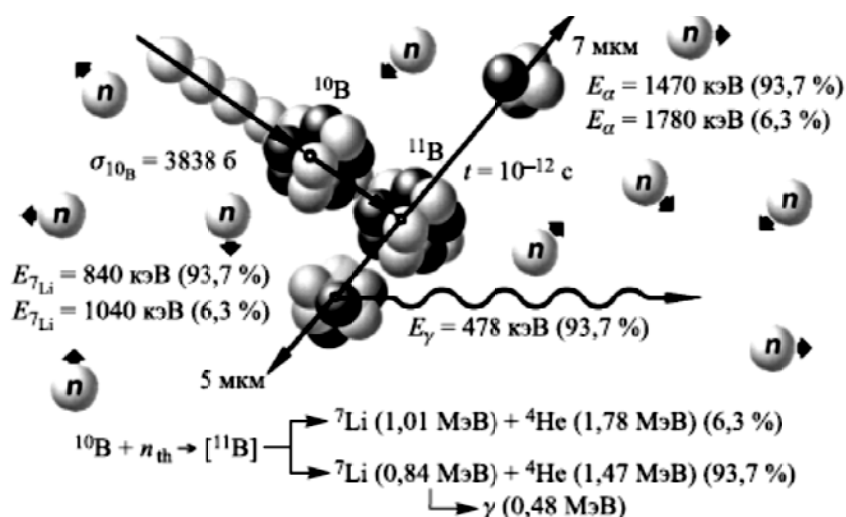


Рис. 1. Схема и характеристики продуктов ядерной реакции

Минимально допустимый набор основных характеристик терапевтических пучков промежуточных нейтронов представлен в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики “in air” пучков нейтронов, предназначенных для НЗТ

	$\Phi_{tot}/\Phi_{epi} \times 10^9, \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	«Загрязнение» пучка				J_{epi}/Φ_{epi}	Средняя энергия, МэВ
		$\Phi_{fast}/\Phi_{tot}, \%$ $\times 100$	$\Phi_{th}/\Phi_{tot}, \%$ $\times 100$	$D_{\gamma}/\Phi_{epi}, \text{ сГр} \cdot \text{см}^2 \times 10^{-11}$	$D_{fast}/\Phi_{epi}, \text{ сГр} \cdot \text{см}^2 \times 10^{-11}$		
Парадигма НЗТ	≥ 1	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	$< (2 - 5)$	$< (2 - 5)$	$\geq 0,7$	
MITR (США)	4,2/?			1,3	4,3	0,84	
ТАПИРО (Италия)	1,1/0,80	6	20	6,74	4,25	0,81	0,0087
МАРС (Россия)	1,5/1,0	13	6	6,14	11,8	0,75	0,036

Эталонным для проведения НЗТ считается пучок, получаемый на исследовательском реакторе Массачусетского технологического университета (рис. 2). Это реактор бакового типа, мощностью 6 МВт, охлаждаемый легкой водой и использующий в качестве отражателя тяжелую воду. Топливом служит высокообогащенное урановое топливо в виде уран-алюминиевой металлокерамики с алюминиевой оболочкой. Максимальная температура теплоносителя 55 °С.

Следующим является исследовательский реактор ТАПИРО (Италия) (рис. 3). Это быстрый реактор максимальной мощностью 5 кВт, охлаждаемый гелием. Топливом служит гомогенное высокообогащенное уран-молибденовое топливо, выполненное в виде цилиндра радиусом 6 см и высотой 11 см с цилиндрическим медным отражателем (толщиной 30 см) и сферической борированной бетонной защитой (толщиной 170 см). Каналы различных размеров и с различными спектрами нейтронов распределены вокруг сердечника. В большую тепловую колонну (2 м³) могут устанавливаться сменные экспериментальные сборки для проведения различных исследований. При максимальной мощности 5 кВт самый высокий поток $4,0 \cdot 10^{12} \text{ н/см}^2/\text{с}$ ($8,0 \cdot 10^{11} \text{ н/см}^2/\text{с}$ с энергией $E > 1,35 \text{ МэВ}$) доступен в середине сердечника через диаметральный канал.

У него имелся один существенный недостаток: «шибер», дающий поле квадратной формы с размерами 12×12 см и 20×20 см, что существенно превышает размеры любой опухоли. Но на нем предложено и проведено несколько сеансов НЗТ на органах, извлеченных из тела пациента (печень), что также в будущем может оказаться очень перспективным.

НЗТ было основной деятельностью в течение нескольких лет, однако из-за проблем финансирования и разрешений для терапии пациентов эта деятельность была закрыта.

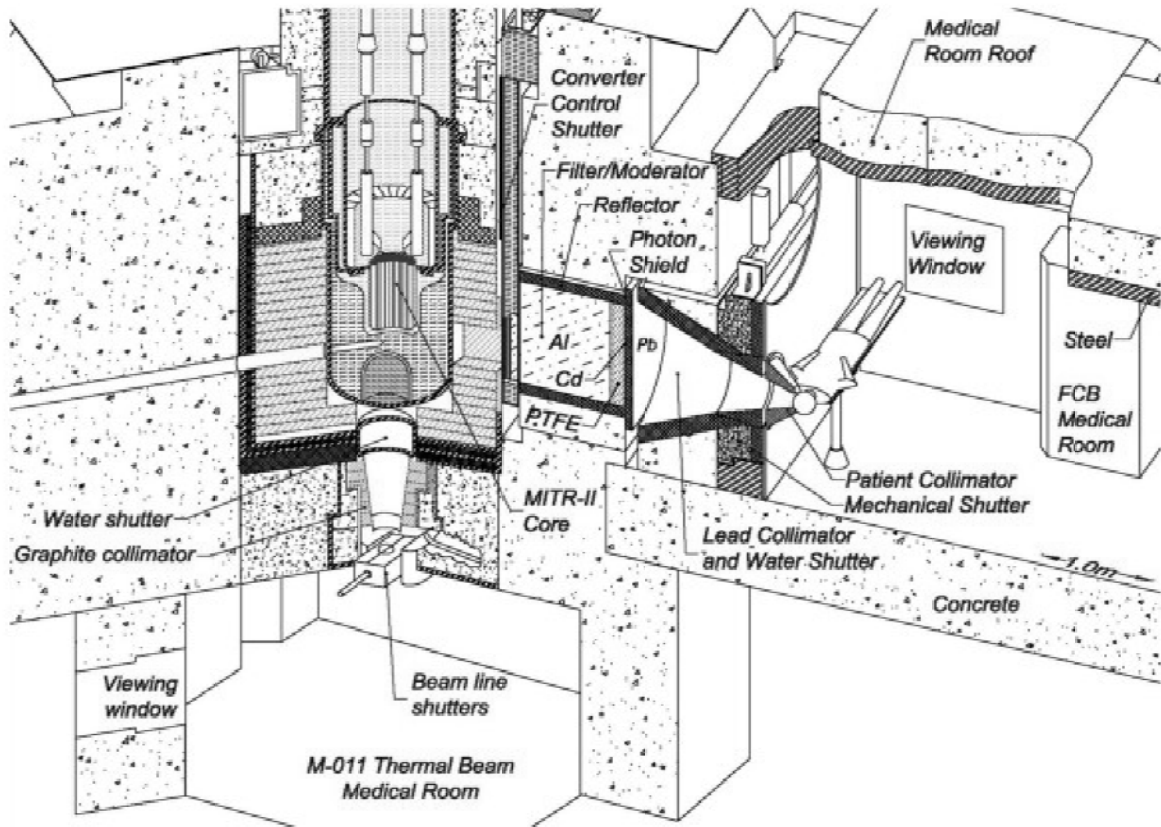


Рис. 2. Принципиальная схема исследовательского реактора Массачусетского технологического института

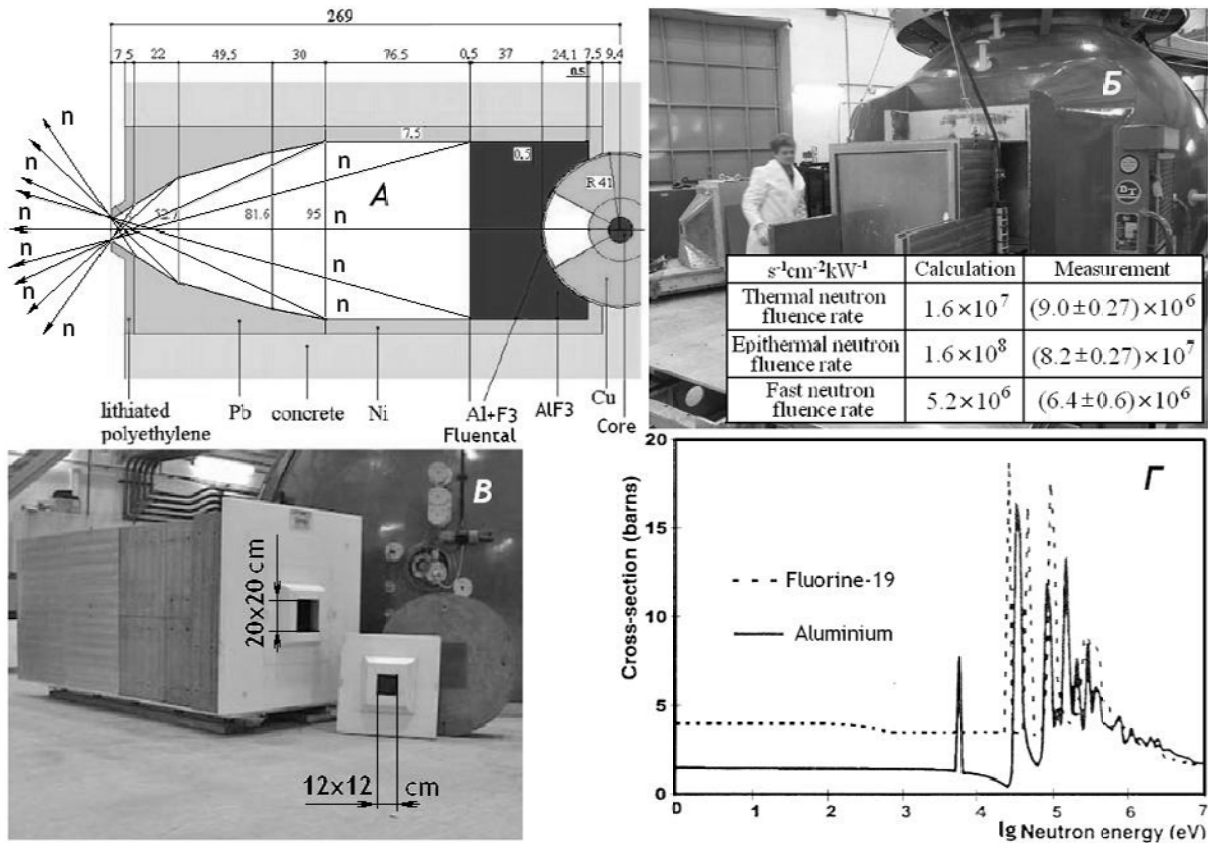
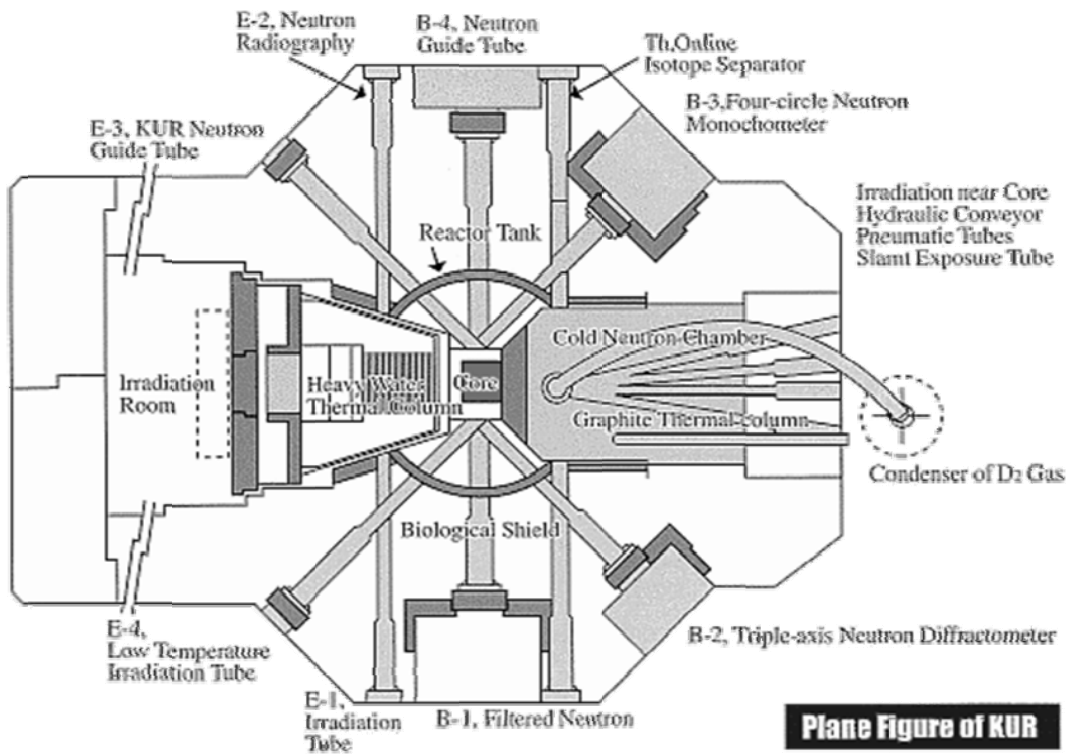
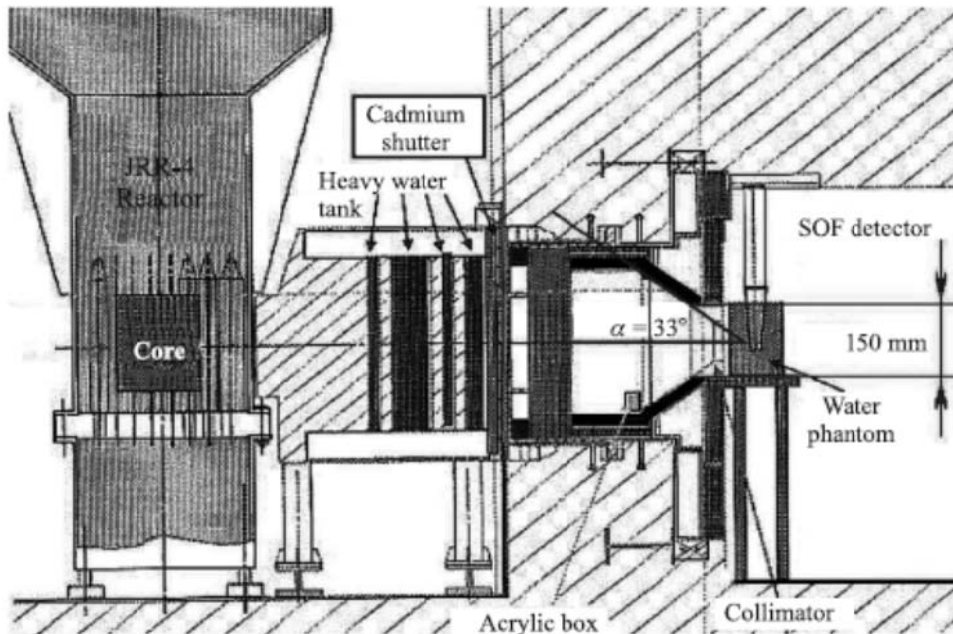


Рис. 3. Исследовательский реактор TAPIRO (Италия)

Самое большое количество пациентов, подвергшихся НЗТ, наблюдается в Японии, где функционировало два исследовательских реактора с терапевтическими пучками для НЗТ, например, реакторы университета Киото и JRR4 (Агентство атомной энергии) (рис. 4).



a)



JRR-4	1999–2006	3.5 MW thermal mode	$1.9 \cdot 10^9$
		Epithermal mode	$2.6 \cdot 10^9$
		Mix mode	$2.9 \cdot 10^9$
		$J_n \text{ epith} / \Phi_n \text{ epith}$	0.71

b)

Рис. 4. Исследовательские реакторы KURRI (a) и JRR4 (b) применявшиеся для целей нейтронно-захватной терапии

В России разрабатывается проект реактора МАРС (медицинский америциевый реактор солевой). Это реактор с топливом на основе ^{242m}Am для нейтронной терапии. Общие характеристики следующие: тепловая мощность не выше 10 кВт, плотность потока нейтронов в месте расположения пациента не менее $1 \cdot 10^9$ н/см²с, отношение дозовых нагрузок по гамма-излучению и нейтронам не более 0,2. Реактор представляет собой цилиндрический объем, в котором помещено топливо – водный раствор $\text{Am}_2(\text{SO}_4)_3$ и теплоноситель – вода. Топливо и теплоноситель конструктивно разделены между собой. Теплообмен осуществляется путем естественной циркуляции. Система управляющих стержней расположена в бериллиевом отражателе. Масса америция (100% ^{242m}Am) составляет около 19 г, что обеспечивает в холодном состоянии реактора $K_{\text{эфф}} = 1,02$. При выбранной конструкции реактора температура топлива не превышает 80°C, а максимальная температура воды в контуре естественной циркуляции не превышает 60°C. Пучок нейтронов выводится с торца активной зоны реактора. Для формирования и фильтрации пучка нейтронов, для снижения потока гамма-излучения используется фильтр. Плотность потока нейтронов на выходе пучка составляет $3 \cdot 10^9$ н/см²с (рис. 5).

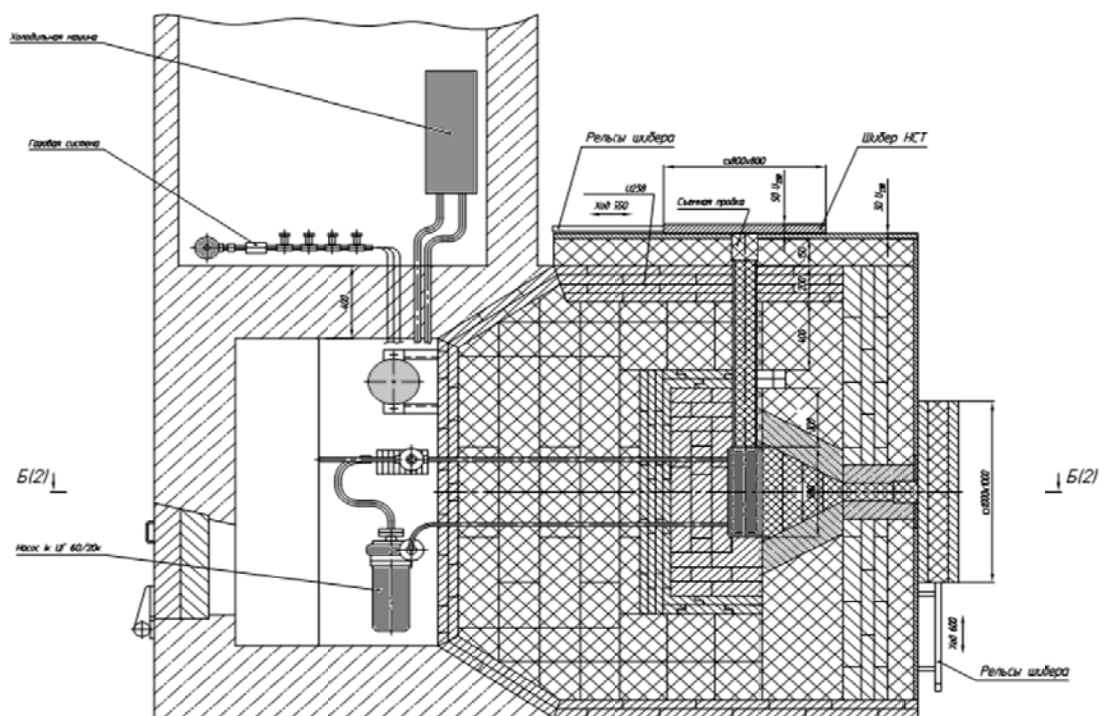


Рис. 5. Конструкция РУ МАРС

Таким образом, стоит задача создания реактора, на котором можно было бы создавать терапевтические пучки нейтронов и проводить лечение по принципу НЗТ. И, как показывает опыт, на данном реакторе должны быть предусмотрены как минимум два канала для терапевтических пучков и плюс каналы диагностического и исследовательского характера.

Если мы будем говорить о специализированном реакторе, то какими характеристиками он должен обладать, если считать, что пучок удовлетворяет всем медицинским требованиям? В первую очередь, реактор должен быть безопасным, поскольку речь идет об установке в медицинском центре, в крупном городе с миллионным населением. Любые запроектные аварии с тяжелыми последствиями должны быть исключены. Реактор должен обладать внутренне присущей безопасностью. Отсюда вытекает и простота в управлении, так как в идеале управлять им должен небольшой штат инженеров, который сможет позволить себе крупный медицинский центр (2-3 человека).

Для обеспечения нераспространения делящего материала, во-первых, в качестве топлива должен применяться низкообогащенный или природный уран, рабочая кампания должна

быть рассчитана на 10-15 лет. Во-вторых, конструкция реактора должна предусматривать возможность смены целиком корпуса реактора со всем технологическим оборудованием первого контура (концепция одноразового блока, который просто меняется). На заводе по переработке ОЯТ этот блок вскрывается и из него извлекается активная зона.

Так как реактор устанавливается непосредственно в медицинском центре, то он должен иметь приемлемые массогабаритные характеристики. И кроме того, они должны обеспечивать возможность его транспортировки железнодорожным, а в идеале – автомобильным транспортом. Для обеспечения данного требования можно рассмотреть концепции энергетических реакторов малой мощности: Гиперион (США), Свеча (Япония), СВБР, КЛТ (Россия).

Медицинский реактор может работать в старт-стопном режиме, и тогда процедура его подготовки и запуска не должна превышать нескольких часов: либо же это круглосуточная работа с «активным» и «спящим» режимами.

Таким образом, можно сформулировать базовые требования к ядерному реактору как специализированному медицинскому инструменту: оптимальная характеристика получаемого нейтронного пучка, несколько каналов вывода нейтронного пучка (с различными характеристиками для разных целей), безопасность и экологичность, удобство и простота эксплуатации, экономическая привлекательность и возможность установки на действующей площадке крупного медицинского центра.

Библиографический список

1. Довбня, А.Н. Нейтроны против рака / А.Н. Довбня, Э.Л. Купленников, С.С. Кандыбей, В.В. Красильников // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2014. – Т. 45. – Вып. 5-6.
2. Левченко, В.А. Основные характеристики америциевого реактора для нейтронной терапии. Реактор «МАРС» / В.А. Левченко [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2003. – №3.
3. Борисов, Г.И. Теоретические и экспериментальные физические методы нейтронно-захватной терапии // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2011. – Т. 42. – Вып. 5.
4. Кураченко Ю.А. МАРС и ТАПИРО: реакторы малой мощности для нейтронозахватной терапии / Ю.А. Кураченко, Д.Н. Моисеенко // Ядерная энергетика. – 2010. – № 1. – С. 153-163.
5. Harling, O.K. Fission reactor based epithermal neutron irradiation facilities for routine clinical application in BNCT – Hatanaka memorial lecture // Applied Radiation and Isotopes. 67 (7–8): S7–11. doi:10.1016/j.apradiso.2009.03.095.
6. Мусабаева, Л.И. Нейтронная терапия на циклотроне У-120. К 30-летию применений нейтронной терапии – обзор результатов научных исследований / Л.И. Мусабаева [и др.] // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2013. – Т. 58. – №2.
7. Кураченко, Ю.А. Критерии качества нейтронных пучков для лучевой терапии / Ю.А. Кураченко, Ю.А. Казанский, Е.С. Матусевич // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – №1.

Дата поступления
в редакцию 21.04.2017

O.O. Novozhilova, A.G. Meluzov, N.L. Ivanova

ANALYSIS OF APPLICATION OF NUCLEAR REACTORS IN MEDICAL PRACTICE

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

Purpose: analysis of the possibility of using nuclear facilities for medical purposes, in particular for radiation therapy

Design/methodology/approach: analytical review of the use of nuclear facilities for neutron capture therapy.

Results: presented the physical characteristics of neutron capture therapy as one of the advanced methods of radiotherapy. Formulated the basic requirements for a nuclear installation as a specialized medical instrument.

Key words: nuclear reactor, radiation therapy, neutron capture therapy.