

7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.
8. Александров О.Е. Идеальная центрифуга. — Журн. техн. физики, 2000, № 9, с. 24—29.
9. Александров О.Е. Применение метода усреднения по радиусу для описания диффузии в газовой центрифуге при неоднородном потоке циркуляции. — Атомная энергия, 1999, т. 86, вып. 3, с. 210—215.
10. Основы теории газовых центрифуг. Инф. бюлл. по материалам зарубежной печати. Сокр. пер. с англ.: Advances in Nucl. Sci. Technol., 1972, v. 6, p. 105—173. М.: Атомиздат, 1973. 51 с.

Поступила в Редакцию 25.10.01

УДК 621.039.573

КОНТРОЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РАСПЛАВА ДЕЛЯЩЕГОСЯ МАТЕРИАЛА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ ИГР С ПОМОЩЬЮ МАЛОГАБАРИТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ НЕЙТРОНОВ

*Горин Н.В., Кандиев Я.З., Щербина А.Н. (РФЯЦ — ВНИИТФ), Жотабаев Ж.Р.,
Казьмин Ю.М., Пахниц В.А. (ИАЭ НЯЦ Республики Казахстан),
Васильев А.П., Малинкин В.М. (НИКИЭТ), Павшук В.А.,
Никипорец Ю.Г. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

Исследовательский реактор ИГР [1] является в настоящее время одним из лучших для изучения поведения ТВС энергетических реакторов при моделировании тяжелых аварий — флюенс тепловых нейтронов в экспериментальном канале диаметром 220, высотой около 1400 мм достигает $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. При проведении экспериментов, связанных с плавлением макетов ТВС, необходимо определять пространственно-временное распределение компонентов расплава. Основные трудности связаны с высокой температурой расплава 2500—3000 °С, уровнем нейтронного и γ -излучения в экспериментальном канале и наличием в измерительном контейнере теплоносителя, который делает невозможным использование оптических методов наблюдения.

Для контроля за перемещением небольшой массы расплавленного диоксида урана обогащением 4—20% в центральном экспериментальном канале ИГР могут использоваться внутризонные малогабаритные камеры деления или комптоновские эмиссионные детекторы нейтронов. Оптимально расположив несколько камер по высоте канала, прокалибровав их соответствующим образом и регистрируя сигналы, которые пропорциональны потоку тепловых нейтронов, можно изучать процессы перемещения расплава. Экстремум сигнала камеры соответствует его прохождению мимо детектора, амплитуда содержит информацию о массе. Методику экспериментального изучения поведения расплава целесообразно предварительно отработать на простых модельных экспериментах, без нагрева модели до высокой температуры и без использования деющихся материалов.

Для этого необходимо изготовить макетные элементы из парафина с добавлением борной кислоты. Размеры каждого макетного элемента соответствуют размерам реального твэла, концентрация борной кислоты подбирается расчетным путем так, чтобы сборка макетных элементов моделировала ТВС в отношении поглощения и отражения тепловых нейтронов, экранировки внутренних слоев наружными и распределения энерговыделения. Поглощение тепловых нейтронов при делении ядра урана имитируется захватом нейтрона ядром бора. При делении образуются вторичные нейтроны, они имеют высокую энергию и, следовательно, малое сечение взаимодействия с ^{235}U . Энерговыделение в диоксиде урана будет определяться делением ^{235}U , в парафине с борной кислотой — радиационным захватом нейтронов ядрами бора. Естественно, что динамика перемещения реального и макетного расплава будет отличаться, тем не менее подобие процесса перемещения будет обеспечено, если будут совпадать число поглощенных нейтронов и форма распределения поглощенных нейтронов и энерговыделения по объему сборки.

В статье показано, что, по меньшей мере, для одной из возможных макетных конфигураций перечисленные условия выполняются. Можно предположить, что они будут выполняться и для большинства реальных конфигураций и при более высокой температуре.

Сборка макетных элементов в экспериментальном канале ИГР может быть расплавлена за счет радиационного разогрева нейтронами [2]. Относительно низкая температура плавления парафина и простота изготовления макетных элементов позволяют многократно проводить такие эксперименты и использовать оптические методы наблюдения за поведением расплава. Анализ результатов экспериментов позволит оптимизировать число детекторов и их расположение, разработать требования к калибровке и сформулировать алгоритм обработки сигналов для описания поведения расплава.

В рамках настоящей работы не обсуждаются технологические вопросы: конструкция и изготовление многосекционных камер деления, чувствительность детекторов, подвод электропитания и вывод сигналов, условия охлаждения, компенсация влияния температуры детектора на его чувствительность и др.

Расчет нейтронно-физических характеристик сборок проведен по программе ПРИЗМА Д [3] с системой констант БАС [4] и по программе MCNP [5] с системой констант ENDF-B6. Обе программы и их константы верифицированы применительно к характеристикам импульсного уран-графитового реактора ИГР [6—8]. В частности, доказана возможность их использования для прогноза возмущений трехмерного распределения нейтронного поля при перемещении поглощающего материала по экспериментальному каналу [9]. Приведем результаты расчетов по программе ПРИЗМА Д. Для гомогенизированной и реальной конфигураций ТВС показано, что погрешность, связанная с упрощениями расчетов из-за гомогенизации, не превышает 10%. В расчетах использована упрощенная конфигурация активной зоны ИГР [7, 9]: ее кубическая форма заменена цилиндрической, отсутствуют блочная структура кладки активной зоны, стержни управления и водяной бак. Для понимания физических процессов в уран-графитовом реакторе при облучении макетных элементов и реальных твэлов такое упрощение, скорее всего, допустимо.

765 4321

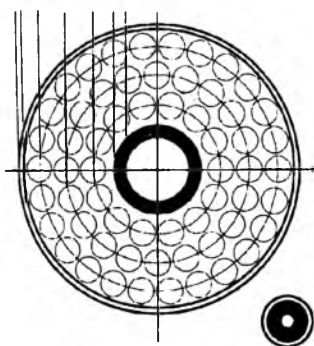


Рис. 1. Поперечное сечение сборки по радиусу 1 (1), 1,5 (2), 2,2 (3), 3,1 (4), 4 (5), 4,6 (6), 5,1 см (7) и одного твэла радиусом 0,366 см

Расчетная схема макетной ТВС выбрана произвольно. В ней задано 60 твэлов, помещенных в графитовый контейнер (рис. 1). Центр сборки совмещен с геометрическим центром активной зоны. В расчетах задано, что все твэлы расположены вокруг центральной трубы контейнера тремя слоями по радиусу: 2,2, 3,1 и 4 см. Принято, что каждый реальный твэл изготовлен из диоксида урана плотностью $10,7 \text{ г/см}^3$, обогащением 4%. Наружный радиус твэла $0,366 \text{ см}$, высота 50 см , радиус внутреннего канала $0,1 \text{ см}$, внутренний радиус стальной оболочки $0,375 \text{ см}$, толщина $0,01 \text{ см}$. Каждый макетный элемент изготовлен из смеси парафина с борной кислотой различной концентрации и имеет плотность $0,9 \text{ г/см}^3$. Проведено несколько расчетов в целях выбора оптимальной концентрации борной кислоты для макетных твэлов. Наружный радиус элемента $0,366$, высота 50 см , внутренний канал и оболочка отсутствуют. Результаты расчетов нормированы на одно деление в активной зоне реактора.

В каждом расчете вычисляли число нейтронов, выходящих из активной зоны в экспериментальный канал, попадающих в контур сборки, поглощающихся в сборке, отраженных от сборки. Нашли распределение числа делений и потерь энергии нейтронами и γ -квантами в слоях твэлов и макетных элементов — внутреннем, среднем и наружном и по высоте сборки. Результаты для диоксида урана и макетов с концент-

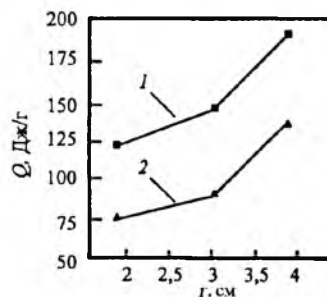
рацией борной кислоты 1,31 кг/кг парафина представлены на рис. 2 (энерговыведение в твэле необходимо умножить на 3) и на рис. 3. Для диоксида урана отдельно показано число делений и число актов радиационного захвата нейтронов.

Анализ результатов расчетов показал, что реальная ТВС моделируется сборкой макетных элементов по числу поглощенных нейтронов и их распределению по объему. Вклад нейтронов и γ -квантов в радиационный разогрев чистого парафина примерно одинаков. Добавление к парафину борной кислоты приводит к определяющей роли нейтронов в радиационном разогреве смеси. Распределение энерговыведения по высоте сборки почти постоянно.

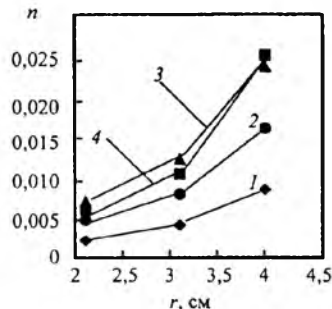
Проведено математическое моделирование эксперимента с изменением конфигурации макетных элементов в контейнере, расположенном в экспериментальном канале ИГР, вычислены сигналы чувствительных секций малогабаритных многосекционных камер деления. Расчеты проведены по программе ПРИЗМА Д с получением коррелированных результатов в многовариантных задачах [10]. Конфигурация из 60 твэлов, расположенных в три слоя, была упрощена и заменена на три коаксиальных цилиндра. Масса цилиндра равнялась суммарной массе макетных элементов в соответствующем слое.

Расчеты проведены для девяти расчетных конфигураций. В исходном состоянии (рис. 4, конфигурация № 1) плавление и изменение формы еще не начались. В промежуточной конфигурации № 5 расплавлен наружный и частично средний слой, внутренний слой сохранил форму. В конечной конфигурации № 9 расплавлены все макетные элементы, расплав собран в нижней части контейнера. Сборка макетных элементов может быть доведена до плавления нейтронами при энерговыведении меньше 1 ГДж. В расчетах заданы семь промежуточных конфигураций, образующихся на этапах плавления макетных элементов и стекания расплава. Конфигурации заданы в предположении, что процесс плавления будет иметь осевую симметрию и начнется с наружного слоя, после чего начнет плавиться средний и уже затем внутренний слой. Последовательность оплавления и конфигурации расплава выбраны без количественного анализа динамики плавления, поэтому в реальном эксперименте, скорее всего, будет иная картина плавления, хотя некоторые этапы процесса могут быть похожими. В расчетных конфигурациях заданы детекторы тепловых нейтронов — многосекционные делительные камеры, расположенные по оси, внутри и снаружи сборки. На рис. 4 показаны только камеры деления, расположенные по оси сборки внутри центральной трубы контейнера, но при анализе результатов учитывали камеры, расположенные внутри сборки и у ее наружной боковой поверхности. Независимые чувствительные секции всех камер одинаково пронумерованы в направлении сверху вниз от № 1 до 10. Все секции камер в расчетах заполнены ^{235}U плотностью 0,01 г/см³.

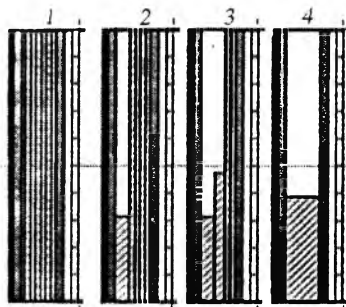
Каждая промежуточная расчетная конфигурация соответствует одному из этапов процесса плавления сборки в численном эксперименте, и ее порядковый номер может в первом приближении рассматриваться как параметр, пропорциональный времени.



Р и с. 2. Распределение энерговыведения по слоям твэла (1) и его макета (2)



Р и с. 3. Число нейтронов, поглощенных в слоях твэла и его макета: 1 — диоксид, захват; 2 — диоксид, деление; 3 — диоксид, всего; 4 — парафин



Р и с. 4. Конфигурации сборки элементов по четырем стадиям процесса оплавления

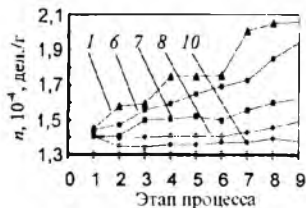


Рис. 5. Число делений в секциях наружного детектора на различных этапах процесса

материала из внешнего слоя в верхней части сборки вызывает повышение сигнала камеры до 15%. Такое же увеличение сигнала вызывает уход 60—80 см³ материала среднего слоя, максимальный скачок сигнала наблюдается тогда, когда весь окружающий поглотитель покидает уровень этих секций. Аналогичного увеличения сигнала секций камеры следует ожидать при перемещении таких же объемов расплава облученного диоксида урана. Методика описания поведения расплава, скорее всего, будет работоспособна при выполнении двух условий: модель предполагает, что плавление начинается от наружных слоев к внутренним, скорость нагрева такова, что масса расплава успевает стекать вниз без блокировки сечения ТВС.

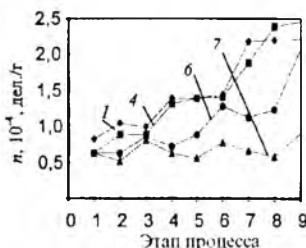


Рис. 6. Число делений в секциях осевого детектора на различных этапах процесса

При интенсивности потока тепловых нейтронов в экспериментальном канале более $10^{14} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ необходимо использовать комптоновские эмиссионные детекторы. Для более точного определения момента прохождения расплава мимо детектора следует использовать чувствительную секцию в виде части кольца, охватывающего контейнер со сборкой. В результате станет возможным увеличить чувствительность секции и одновременно повысить чувствительность по отношению к вертикальному перемещению поглотителя. Естественно, что такая схема измерений возможна лишь при осевой симметрии.

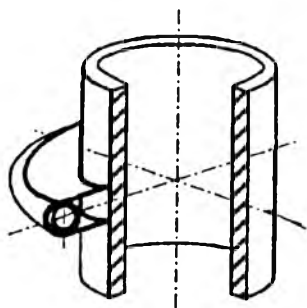


Рис. 7. Расположение камеры делений в виде части кольца с кадмиевым коллиматором возле боковой поверхности ампулы

На рис. 5 представлены результаты расчета числа делений в чувствительных секциях наружных камер деления на различных этапах процесса плавления. Это означает, что на рис. 5 по сути представлены осциллограммы, которые могут быть получены от секций наружной камеры в эксперименте. Анализ таких осциллограмм показывает, что верхние секции сильно реагируют на изменение формы. Видны ступеньки, увеличивающиеся по мере перемещения вниз макетного материала, сначала его наружных слоев, затем и внутренних. Уход 80—100 см³ макетного

материала из внешнего слоя в верхней части сборки вызывает повышение сигнала камеры до 15%. Такое же увеличение сигнала вызывает уход 60—80 см³ материала среднего слоя, максимальный скачок сигнала наблюдается тогда, когда весь окружающий поглотитель покидает уровень этих секций. Аналогичного увеличения сигнала секций камеры следует ожидать при перемещении таких же объемов расплава облученного диоксида урана. Методика описания поведения расплава, скорее всего, будет работоспособна при выполнении двух условий: модель предполагает, что плавление начинается от наружных слоев к внутренним, скорость нагрева такова, что масса расплава успевает стекать вниз без блокировки сечения ТВС.

Средние секции (№ 6 и 7) реагируют слабее, сигналы от нижних секций камеры № 8 и 10 даже уменьшаются на этапах № 2 и 3 вследствие увеличения массы поглотителя в нижней части ампулы. Аналогичный вид имеют осциллограммы многосекционного детектора, расположенного по оси сборки внутри центральной трубы контейнера. Амплитуда сигналов значительно выше (рис. б), и такое размещение детекторов предпочтительнее.

Приведенные математические осциллограммы показывают, что сигналы многосекционных камер делений содержат достаточную информацию о перемещении массы расплава.

При интенсивности потока тепловых нейтронов в экспериментальном канале более $10^{14} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ необходимо использовать комптоновские эмиссионные детекторы. Для более точного определения момента прохождения расплава мимо детектора следует использовать чувствительную секцию в виде части кольца, охватывающего контейнер со сборкой. В результате станет возможным увеличить чувствительность секции и одновременно повысить чувствительность по отношению к вертикальному перемещению поглотителя. Естественно, что такая схема измерений возможна лишь при осевой симметрии.

Для иллюстрации проведена серия расчетов числа делений в кольцевом детекторе для ампулы диаметром 8 см, длиной 1 м, внутри которой перемещается шагами поглотитель концентрацией 18,2 г/л [10]. Пока граница поглотителя была далеко от детектора, перемещение составляло 10 см, при приближении границы к детектору перемещение уменьшалось до 5 см и затем даже до 1 см. Часть расчетной конфигурации вблизи уровня детектора представлена на рис. 7. В расчетах использованы три типа детекторов — свободный, с кадмиевым коллиматором и детектор, окруженный со всех сторон кадмием. На рис. 7 изображено расположение относительно ампулы единичного детектора с коллиматором, но в многовариантных расчетах по программе ПРИЗМА Д три детектора были размещены в одном

месте в центре ампулы. Кривая 1 на рис. 8 — сигнал детектора без коллиматора, который регистрирует все тепловые и надтепловые нейтроны, 2 — сигнал детектора с коллиматором, регистрирующим в основном попадающие в его створ нейтроны и надтепловые нейтроны, проходящие сквозь кадмий, 3 — разность между сигналом детектора с коллиматором и детектора, окруженного со всех сторон кадмием, т.е. только тепловые нейтроны, прошедшие в створ коллиматора. Видно, что использование коллиматора позволяет гораздо точнее определять момент времени прохождения границы поглотителя. Положение границы может быть определено с погрешностью 2—3 см, однако с существенным уменьшением амплитуды сигнала, поэтому при постановке эксперимента необходимо выбирать между чувствительностью детектора и точностью определения момента времени.



Р и с. 8. Изменение сигнала детектора

На точность моделирования процесса будут влиять многие особенности ИГР. Так, на абсолютное значение и интенсивность энерговыделения в реальной ТВС будут влиять эффекты просветления и изменения спектра нейтронов в экспериментальном канале. На профиль энерговыделения будет влиять эффект изменения распределения числа делений по высоте канала и эффекты возмущения нейтронного поля вследствие перемещения стержней СУЗ. Изменение времени жизни нейтронов окажет влияние на скорость ввода энергии в протяженных образцах, радиационный разогрев материалов повлияет на температурные деформации и внесет погрешности при измерении температуры расплава и элементов конструкции. Часть перечисленных эффектов уже исследована в экспериментах [2, 7, 11, 12]. Расчетно-экспериментальные исследования продолжаются, и особенности физических характеристик ИГР могут быть учтены при разработке методики эксперимента.

Таким образом, в отношении влияния на характеристики нейтронного поля в экспериментальном канале ИГР сборку твэлов, содержащих делящийся материал, можно моделировать макетными элементами, изготовленными из парафина с борной кислотой. В экспериментах с такими макетными сборками может быть отработана методика контроля за поведением расплава по показаниям малогабаритных детекторов нейтронов. В дальнейшем методику следует уточнить применительно к экспериментам с реальными ТВС. Выполненная в рамках настоящей работы первая серия расчетов показывает возможность получения информации о перемещении массы расплава с помощью детекторов тепловых нейтронов. В дальнейших расчетах следует учесть влияние температуры топлива ИГР и расплава диоксида урана и исследовать влияние физических особенностей реактора на сигналы детекторов.

Настоящая работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курчатov И.В., Фейнберг С.М., Доллежалъ Н.А. и др. Импульсный графитовый реактор ИГР. — Атомная энергия, 1964, т. 17, вып. 6, с. 463—474.
2. Горин Н.В., Кандиев Я.З., Ульянов А.И. и др. Измерение температуры радиационного разогрева конструкционных материалов излучением ИГР. — Там же, 2001, т. 90, вып. 1, с. 17—21.
3. Arnautova M.A., Kandiev Ya.Z., Lukhminsky B.E., Malishkin G.N. Monte-Carlo simulation in nuclear geophysics. Incomparision of the PRIZMA Monte-Carlo program and benchmark experiments. — Nucl. Geophys., 1993, v. 7, № 3, p. 407—418.
4. Васильев А.П., Кандиев Я.З., Читайкин В.И. Расчеты некоторых опытов на системах из урана-235 и урана-238 со спектральными нейтронными константами БАС. — В кн.: Нейтронная физика, 1984, т. 2, с. 119—123.
5. Oak Ridge National Laboratory. RSIC computer code collection, MCNP-4A. Monte-Carlo N-Particle Transport Code System, Contributed by Los Alamos National Laboratory. Los Alamos, New Mexico.

6. Васильев А.П., Горин Н.В., Кандиев Я.З. и др. Верификация методик расчета характеристик импульсного графитового реактора. — Атомная энергия, 1996, т. 80, вып. 3, с. 150—153.
7. Васильев А.П., Горин Н.В., Кандиев Я.З. и др. Исследование трехмерного нейтронного поля в активной зоне ИГР. — Там же, 1997, т. 82, вып. 6, с. 407—413.
8. Горин Н.В., Кандиев Я.З., Козыбаев Р.М. и др. Эффект «просветления» уран-графитового топлива ИГР. — Там же, 1998, т. 85, вып. 5, с. 419—422.
9. Горин Н.В., Кандиев Я.З., Козыбаев Р.М. и др. Исследование нейтронного поля в центральном канале ИГР при движении поглотителя нейтронов. — Там же, 1998, т. 85, вып. 6, с. 474—476.
10. Горин Н.В., Кандиев Я.З., Казьмин Ю.М. Расчетное исследование физических процессов в ИГР по программе ПРИЗМА Д. — Там же, 2000, т. 88, вып. 2, с. 83—88.
11. Горин Н.В., Кандиев Я.З., Литвин В.И. Расчетно-экспериментальное исследование особенностей спектра нейтронов ИГР. — Там же, 2000, т. 89, вып. 3, с. 233—237.
12. Горин Н.В., Кандиев Я.З., Кашаева Е.А. и др. Особенности поля тепловых нейтронов в экспериментальном канале ИГР. — Там же, 2001, т. 90, вып. 4, с. 251—256.

Поступила в Редакцию 25.07.01

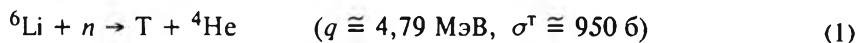
УДК 621.039.55; 539.107.5

ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ${}^6\text{LiD}$ -КОНВЕРТЕРА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В НЕЙТРОНЫ ЭНЕРГИЕЙ 14 МЭВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ РЕАКТОРА ИВВ-2М

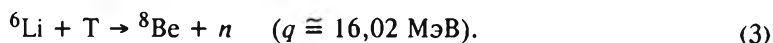
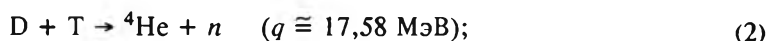
*Зуев Ю.Н., Кулинич Ю.А., Ларцев В.Д., Стрельцов С.И., Чернухин Ю.И.
(РФЯЦ — ВНИИТФ), Менькин Л.И., Полосухин Б.Г., Токарев В.И.,
Митрофанов С.Ю. (СФ НИКИЭТа)*

Для проведения полномасштабных исследований по радиационному материаловедению для термоядерного синтеза необходимы источники нейтронов энергией 14 МэВ с параметрами, которые невозможно достичь на имеющихся установках: в рабочем объеме $V \cong 0,5$ л они должны обеспечивать плотность потока нейтронов энергией 14 МэВ $\varphi \geq 10^{14} \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ (см., например, исследования [1]). В настоящее время рассматривается несколько проектов установок такого класса, в частности, международной установки IFMIF [1]. Однако реализация проекта потребует больших финансовых затрат и времени. Поэтому еще долго будет актуальным поиск возможностей проведения отдельных исследований по радиационному материаловедению с использованием имеющихся источников нейтронов.

В этой связи представляет интерес предложение [2] о применении твердотельного ${}^6\text{LiD}$ -конвертера для преобразования тепловых нейтронов в канале высокопоточного реактора ИВВ-2М [3] в быстрые нейтроны энергией 14 МэВ в результате $(n\alpha)$ -реакций на ядрах ${}^6\text{Li}$ с образованием быстрых ядер трития ($\epsilon_0 \cong 2,74$ МэВ)



и последующих реакций синтеза ядер трития с ядрами дейтерия и ${}^6\text{Li}$



Впервые на возможность такого конвертирования нейтронов было указано в работе [4], затем более подробно она была изучена в работах [5—7]. Обзор работ по этому направлению приведен в исследованиях [8].

Согласно принятому [8] определению эффективность ${}^6\text{LiD}$ -конвертера тепловых нейтронов в нейтроны энергией 14 МэВ характеризуется отношением скоростей гене-