

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ РЕАКТОРА TRIGA

Ю.А. Коровин, А.А. Травлеев

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



Использование исследовательского реактора с топливом TRIGA для проведения экспериментов, предложенных в проекте TRADE, предполагает проведение детального анализа нейтронно-физических характеристик АЗ TRIGA. Особенность реактора TRIGA заключается в наличии в составе топлива замедлителя (водорода); это приводит к появлению сильной отрицательной обратной связи реактивности по температуре топлива. При этом водород находится в составе гидрида циркония, и большое влияние на спектр тепловых нейтронов в топливе оказывает связь атомов водорода с соседними атомами в гидриде циркония.

На основе расчета коэффициента размножения в топливной ячейке TRIGA с использованием двух различных методов учета теплового движения, заложенных в код MCNP, в данной работе показана необходимость учета связи атомов замедлителя в некоторых материалах, используемых в реакторе TRIGA. Проведен обзор оцененных ядерных данных, описывающих рассеяние тепловых нейтронов на воде и гидриде циркония. Выявлены отличия в сечениях, приведенных в различных библиотеках оцененных данных, и показано влияние этих отличий на расчет коэффициента размножения.

ВВЕДЕНИЕ

В работе проведен анализ возможности применения кода MCNP [1] для расчета нейтронно-физических характеристик реактора TRIGA [2], в частности, для моделирования транспорта медленных нейтронов. Необходимость проведения детального анализа нейтронно-физических характеристик реактора TRIGA вызвана подготовкой к экспериментам TRADE [3], которые планируются на исследовательском реакторе TRIGA (Италия). В проекте TRADE будут проведены нейтронно-физические расчеты на современном уровне с учетом опыта, накопленного за время эксплуатации этого типа реакторов во всем мире. Кроме того, следует отметить повышение интереса к возможности использования гидрида циркония в различных инновационных проектах, например, в реакторе для медицинских целей, рассмотренном в [4].

Различия между рассеянием на свободном и связанном атомах водорода проявляются в изменении как полного сечения взаимодействия, так и дважды дифференциального сечения, которое описывает распределение кинетических параметров (энергии и направления) рассеянного нейтрона. Это влияет на спектр нейтронов и, как следствие, на коэффициент размножения. Кроме этого, изменяются динамичес-

кие характеристики реактора, т.к. время замедления нейтронов деления будет различно для свободного и связанного водорода. На начальной стадии проекта TRADE в ряде работ была сделана попытка описать существующую конфигурацию АЗ реактора TRIGA в рамках кода MCNP. Было отмечено различие между рассчитанными параметрами и доступными экспериментальными данными (в частности, для коэффициента размножения) [5].

В данной работе показана необходимость учета связи атомов замедлителя в некоторых материалах, используемых в реакторе TRIGA. Проведен обзор оцененных ядерных данных, описывающих рассеяние тепловых нейтронов на водороде в составе гидрида циркония и воды.

Расчеты проводятся на простой модели топливной ячейки (твэла, окруженный замедлителем), в которой отражены только основные особенности АЗ TRIGA – наличие гидрида циркония в топливе, обогащение топлива и наличие воды вокруг твэла.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ В КОДЕ MCNP

Транспорт медленных нейтронов с энергиями ниже нескольких эВ зависит от теплового движения атомов среды. Можно выделить две составляющих этой зависимости.

Во-первых, полное сечение взаимодействия нейтрона с ядром зависит от скорости теплового движения ядра. Для этого вводится понятие эффективного сечения для данной температуры материала. Эффективное сечение определяется таким образом, чтобы дать такую же скорость реакции для покоящегося ядра, как и скорость реакции, рассчитанную для действительного сечения с учетом движения ядра. При этом для учета влияния температуры среды вместо моделирования движения ядра используется заранее рассчитанное эффективное сечение, что позволяет упростить расчеты. Как показано, например, в [6], эффективное сечение отличается от действительного при энергиях нейтрона ниже некоторой энергии, пропорциональной температуре среды и обратно пропорциональной массе ядра, а также в области резонансов. Изменение эффективного сечения с температурой среды получило название доплеровского уширения. Для учета этого эффекта в коде MCNP используются библиотеки констант, подготовленные для различных температур.

Во-вторых, движение ядра приводит к изменению кинетических параметров рассеянного нейтрона. Следует отметить, что доплеровское уширение позволяет учесть изменение только полного сечения реакции, поэтому изменение кинетических характеристик рассеянного нейтрона должно быть учтено отдельно. В коде MCNP реализованы две возможности учета теплового движения атомов. Один метод состоит в использовании модели свободного газа. Перед расчетом кинематики взаимодействия нейтрона с ядром определяются скорость и направление движения рассеивающего ядра. Скорость ядра выбирается случайным образом в соответствии с распределением Максвелла для заданной во входном файле температуры; эта температура может отличаться от температуры, для которой подготовлены библиотеки констант. Другой способ учета теплового движения атомов состоит в использовании специальных библиотек, в которых указаны распределения по энергиям и направлениям рассеянного нейтрона – матрицы рассеяния. Эти библиотеки могут быть подготовлены на основе оцененных данных, в которых учтено влияние молекулярной или кристаллической связи рассеивающего ядра с соседними атомами. Использование матриц рассеяния в программе MCNP задается с помощью карты «mt», соответствующей материалу, в котором используется замедлитель.

Формат матриц рассеяния, используемых в MCNP, позволяет описывать два типа взаимодействий медленного нейтрона с ядром – тепловое упругое и тепловое неупругое рассеяние. При тепловом неупругом рассеянии изменяются энергия и направление движения нейтрона, при тепловом упругом рассеянии изменяется только направление движения.

ВЛИЯНИЕ МЕЖАТОМНОЙ СВЯЗИ НА КОЭФФИЦИЕНТ РАЗМНОЖЕНИЯ

Прежде чем исследовать существующие оцененные данные для рассеяния медленных нейтронов, следует определить, насколько необходимо использование таких данных в расчетах, и влияет ли учет межатомных связей на такие интегральные характеристики как, например, коэффициент размножения нейтронов.

Были проведены расчеты коэффициента размножения для модели топливной ячейки, близкой по составу к топливной ячейке реактора TRIGA. В реакторе TRIGA используется ряд материалов, рассеяние нейтронов на которых зависит от межатомного взаимодействия. Это гидрид циркония, расположенный непосредственно в топливе, вода, которая служит теплоносителем и окружает твэлы, а также графит, который использован в боковом и торцевых отражателях. Графит не используется непосредственно в АЗ и модель стандартной топливной ячейки не позволила бы исследовать влияние связи ядер углерода в кристаллической решетке графита. Поэтому была выбрана топливная ячейка, которая представляет не только активную часть твэла, но также учитывает область, находящуюся над твэлом, где расположен торцевой отражатель. Схема модели топливной ячейки показана на рис. 1.

На внешней боковой цилиндрической поверхности, а также на нижней торцевой поверхности используется условие отражения нейтронов. В верхней части модели расположен слой воды толщиной 50 см. Радиус топлива составляет 1.865 см, высота – 38 см. Толщина торцевого отражателя – 8.75 см. Толщина бокового слоя воды составляет 0.48 см, и выбрана таким образом, чтобы отношение объема топлива к объему воды в данной модели соответствовало отношению, усредненному по всей АЗ реактора.

Для описанной модели топливной ячейки были проведены несколько расчетов коэффициента размножения. В первом расчете использовалось приближение свободного газа для всех материалов. В последующих расчетах для одного из материалов – гидрида циркония, воды, или графита – использовались матрицы рассеяния, позволяющие учесть межатомное взаимодействие. В последнем расчете использовались матрицы рассеяния для всех трех материалов. Результаты этих расчетов представлены в табл. 1.

Все значения коэффициента размножения в таблице имеют статистическую погрешность 8×10^{-4} при доверительном интервале 95%. В соответствии с полученными результатами, наибольшее влияние на коэффициент размножения оказывает связь водорода в составе гидрида циркония. Заметно также влияние связи водорода в молекуле воды. Использование матрицы рассеяния для циркония в составе гидрида циркония и для углерода в составе графита не приводит к заметному изменению коэффициента размножения. Однако следует отметить, что вклад тепловых данных для углерода может быть больше при расчете полной модели АЗ, т.к. в модели топливной ячейки боковой отра-



Рис. 1. Схема модели топливной ячейки реактора TRIGA (одна четвертая часть симметрии)

Таблица 1

Коэффициент размножения в топливной ячейке TRIGA, рассчитанный в приближении свободного газа и с использованием матриц рассеяния для гидрида циркония, воды и графита

Описание модели	Коэффициент размножения нейтронов
Приближение свободного газа для всех материалов	1.2796
Матрица рассеяния для углерода в составе графита	1.2795
Матрица рассеяния для водорода в составе воды	1.2831
Матрица рассеяния для водорода в составе гидрида циркония	1.2408
Матрица рассеяния для циркония в составе гидрида циркония	1.2798
Использование матриц рассеяния для гидрида циркония, воды и графита	1.2436

жатель не представлен. В приведенных расчетах были использованы матрицы рассеяния из библиотеки *tmccs*, распространяемой с программой MCNP и подготовленной более десяти лет назад. В описании новой версии MCNP указывается, что были подготовлены новые файлы данных, и был обнаружен ряд различий с более ранними. Поскольку новая версия MCNP все еще недоступна в европейских странах, возникает необходимость в самостоятельной подготовке файлов данных, содержащих матрицы рассеяния на основе новых оценок. На основе полученных в этом параграфе результатов в следующей части проведен обзор новых оцененных данных для рассеяния на водороде в составе гидрида циркония и в составе воды.

ОБЗОР ОЦЕНЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОПИСАНИЯ РАССЕЯНИЯ МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ

Описание матриц рассеяния для воды и гидрида циркония можно найти в библиотеке оцененных данных ENDF/B-VI. В настоящее время доступны две оценки. Первая оценка [7], основанная на физической модели, разработанной General Atomics (GA), получена в 1989 г. путем переформатирования предыдущей версии данных в формат *endf-6*. При этом были сделаны небольшие изменения, чтобы подогнать сечения связанного атома к сечениям на свободном ядре, определенным в библиотеке ENDF/B-VI. Другая оценка [8] получена в 1995 г. с помощью процедуры LEAPR, входящей в состав кода NJOY. Эта оценка также основана на физической модели GA. Использование кода LEAPR позволило расширить область значений передаваемой энергии и импульса, для которых определяется матрица рассеяния $S(a,b)$. Кроме того, полные сечения были нормированы таким образом, чтобы соответствовать сечениям на свободном ядре из ENDF/B-VI.

В отличие от библиотеки ENDF/B-VI, в европейской библиотеке оцененных данных JEFF3.0 данные для гидрида циркония не приведены. Матрица рассеяния для воды представлена в оценке [9]. Эта оценка взята из предыдущей версии библиотеки JEFF2.2 и также основана на физических моделях GA.

Сравнение описанных выше оценок проводится в два этапа. На первом этапе на основе оцененных данных были подготовлены тепловые файлы в формате ACE (A Compact ENDF – формат данных для использования в MCNP) с помощью кода NJOY[6], и проведено сравнение полных сечений. На втором этапе полученные матрицы рас-

сеяния используются для расчета коэффициента размножения в топливной ячейке реактора TRIGA, и сравниваются результаты этих расчетов.

Подготовка данных в формате ACE

Данные в формате ACE были подготовлены с помощью кода NJOY, версия 99.81m. Наряду со специальными данными, описывающими рассеяние тепловых нейтронов, при подготовке файлов данных в формате ACE были использованы оцененные файлы данных общего назначения ENDF/B-VI.5.

Сравнение сечений

Сечения рассеяния медленных нейтронов, подготовленные на основе различных оценок, совпадают за исключением нескольких случаев рассмотренных ниже. Сечение теплового упругого рассеяния на ядре циркония в составе гидрида циркония показано на рис. 2. Сплошной линией представлены данные из библиотеки тепловых данных tmccs, распространяемой с кодом MCNP-4C. Штриховая линия соответствует данным из оценки [7], штрих-пунктирная – оценке [8]. Видно значительное отличие данных, полученных на основе оценки [7]. Причем сечения теплового неупругого рассеяния на цирконии в различных оценках совпадают. Следует отметить, что более ранние данные, подготовленные для MCNP, хорошо согласуются с данными оценки 1995 г. Сечение теплового неупругого рассеяния на водороде в составе воды показано на рис. 3. Отличие данных, основанных на оценке из библиотеки JEFF3.0, от остальных проявляется при энергии нейтрона ниже 3×10^{-3} эВ.

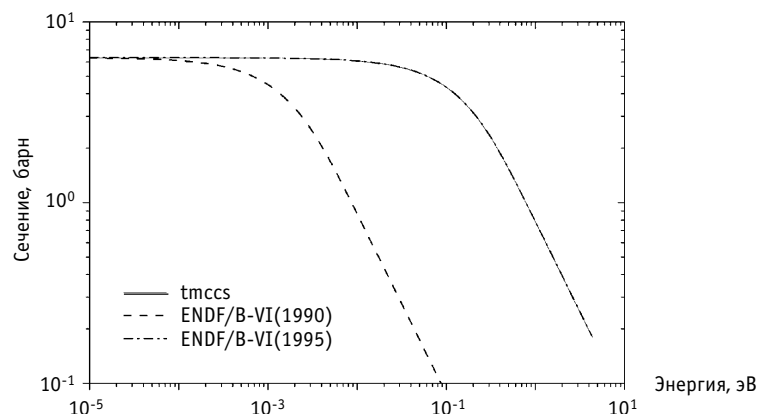


Рис. 2. Сечение теплового упругого рассеяния на ядре циркония в составе гидрида циркония

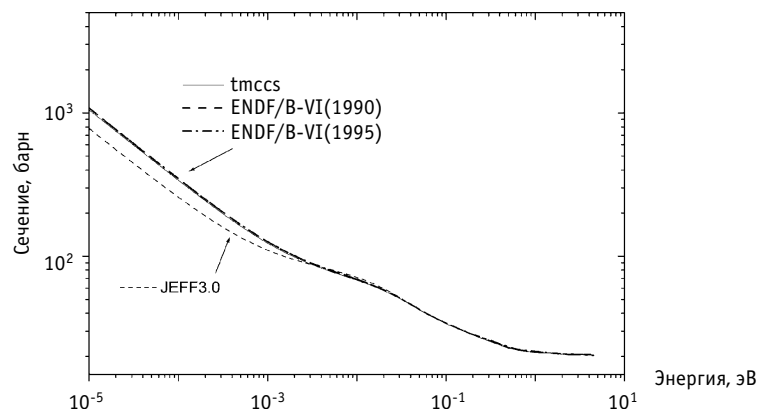


Рис. 3. Сечение теплового неупругого рассеяния на ядре водорода в составе молекулы воды

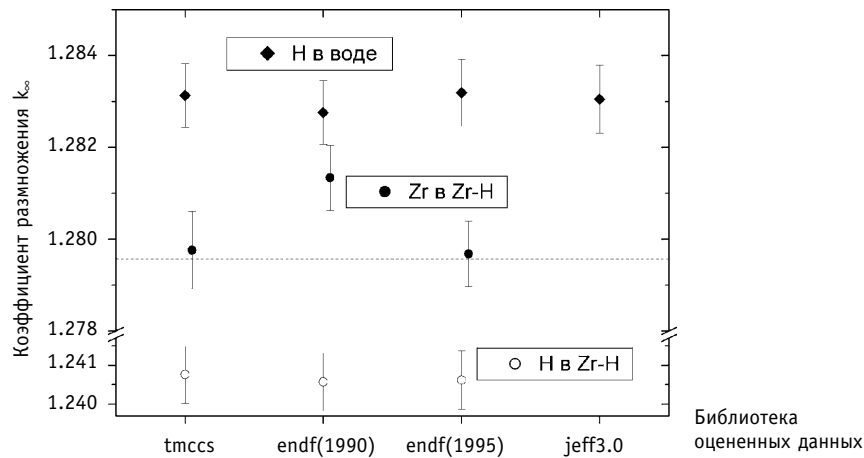


Рис. 4. Коэффициент размножения в топливной ячейке, рассчитанный с использованием матриц рассеяния, взятых из различных библиотек; горизонтальной прерывистой линией показано значение коэффициента размножения, полученного в приближении свободного газа для всех материалов

Влияние различий в оценках на значение коэффициента размножения

Различия в сечениях, указанные выше, приводят к различиям в коэффициенте размножения. Была проведена серия расчетов коэффициента размножения нейтронов в топливной ячейке, представленной выше. В каждом расчете матрицы рассеяния, основанные на доступных оценках, применялись только для одного из материалов. Это позволило определить, влияют ли различия в сечениях, указанные в предыдущем параграфе, на значение коэффициента размножения. Результаты расчетов приведены на рис. 4. По вертикальной оси отложены значения коэффициента размножения. Различному положению на горизонтальной оси отвечают различные оценки. Форма точек соответствует материалу, для которого использовались тепловые данные. Горизонтальной штриховой линией отмечено значение коэффициента размножения, полученного в приближении свободного газа для всех материалов. Значения коэффициента размножения для библиотеки tmccs совпадают с данными, которые приведены в табл. 1.

Как следует из представленных результатов, различие в сечении теплового упругого рассеяния на цирконии в составе гидрида циркония (рис. 2) для оценки [7], приводит к заметному изменению коэффициента размножения. Различия в сечении для водорода в составе воды, показанные на рис. 3, наоборот, не влияют на коэффициент размножения — значения, полученные для всех библиотек, находятся в пределах статистической погрешности.

ВЫВОДЫ

Данная работа является подготовительным этапом для проведения детального нейтронно-физического анализа реактора TRIGA. Основное внимание уделено анализу рассеяния тепловых нейтронов на водороде в составе гидрида циркония, т.к. наличие именно этого материала обеспечивает основной вклад в отрицательный коэффициент реактивности по температуре топлива.

На примере расчета коэффициента размножения нейтронов для модели топливной ячейки была показана необходимость использования специальных матриц рассеяния, позволяющих учитывать межатомное взаимодействие рассеивающего центра с соседними атомами. Этот результат можно встретить, например, в [10], где приводится сравнение экспериментальных данных, полученных на реакторе с топливом

TRIGA, с рассчитанными значениями. В настоящей работе эффект использования тепловых данных оценен по отдельности для воды и гидрида циркония, и как следует из приведенных результатов, в первом случае наблюдается повышение коэффициента размножения, а в случае использования тепловых данных для гидрида циркония наблюдается падение коэффициента размножения. Учет связи атомов углерода в кристаллической решетке графита не приводит к заметному изменению коэффициента размножения. Однако этот результат получен для модели, которая не учитывает боковой отражатель АЗ, поэтому эффект для полной модели АЗ может быть значительнее. В области энергий 10^{-3} – 10^{-1} эВ основным процессом взаимодействия нейтрона с углеродом в кристаллической решетке графита является тепловое упругое рассеяние, при котором нейтрон, эффективно взаимодействуя со всей кристаллической решеткой, не изменяет своей энергии, что приводит к ухудшению замедления нейтронов по сравнению с моделью свободного газа, и к более жесткому спектру нейтронов, которые возвращаются из отражателя в АЗ.

Был проведен обзор файлов оцененных данных для взаимодействия медленных нейтронов с водой и гидридом циркония. Из сравнения сечений следует, что данные из различных источников совпадают за исключением данных для рассеяния на ядре циркония в составе гидрида циркония и для водорода в составе воды. Однако последнее различие не влияет на расчет коэффициента размножения в модели топливной ячейки, характеризующей топливо TRIGA. Для дальнейших исследований на основе проведенного анализа рекомендуется использование данных из оценки [8].

Литература

1. Briesmeister, J.F. (Editor) MCNP4C – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Los Alamos National Laboratory report, LA-13709-M, 2000
2. Cal Foundations of TRIGA, General Atomic, August 27, 1958
3. Monti S., Salvatores M, Cacuci D.G. et al «TRADE: A Full Experimental Validation of the ADS Concept in a European Perspective», AccApp'03 "Accelerator Applications in a Nuclear Renaissance" – San Diego, California – June 1-5, 2003.
4. Левченко В.А., Белугин В.А., Казанский Ю.А. и др. Основные характеристики америциевого реактора для нейтронной терапии. Реактор МАРС//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2003. – № 3. – С. 72-80.
5. Burgio N., Santagata A. «Monte-Carlo model of the TRIGA mark II reactor of ENEA Casaccia: Simulation of the late configuration 38» TRADE PH1 ME 008 0
6. MacFarlane R.E., Muir D.W. The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 91
7. Koppel J.U. et all ENDF/B-VI thermal data file, evaluation: December 1969, Rev: 21.02.1990
8. MacFarlane R.E. ENDF/B-VI thermal data file, evaluation: April 1995, Rev: 25.04.1995
9. Keinert J. JEFF3.0 thermal data file, evaluation: January 1984, release April 2002
10. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2003 Edition

Поступила в редакцию 15.03.2004

Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 4 pages, 4 illustration, 1 table. – References 4 titles.

Ultrasonic converters developed for the automated device for the control of taps pipelines 300-800 millimeters in diameter submitted in the given work. The ultrasonic converters prisms design allows to fix a direction of irradiation of a reference reflector of control sample. The layer of attenuation fluctuations provides an optimum combination of a signal/handicap ratio and resolution. The method of transition matrixes is applied for account of the attenuation fluctuations and intermediate layer.

УДК 502.3

Results of Radioecological Expedition on Territory 30-Kilometer Zone of Chernobyl Nuclear Power Plant and Twelve Regions of Russia, Ukraine and Byelorussia in August 1986 \V.K. Oleynik, I.I. Kryshev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 7 pages, 4 tables. – References 12 titles.

The results of radioecological expedition on territory 30-kilometer zone of Chernobyl Nuclear Power Plant and twelve regions of Russia, Ukraine and Byelorussia in August 1986 are presented. The experimental data are given on content of artificial radionuclides (Cs-137, Cs-134, Ru-103, Ru-106, Zr-95, Ce-144, Ce-141) and natural radionuclide K-40 in components aquatic and terrestrial ecosystem: algae, mollusca, fish, water, bottom sediments, mosses, needle of pine, grass and soil. The estimates of dose rates to components of natural biota are performed on the base of obtained experimental data.

УДК 621.039.5.001.57

Method for Description of Fission Fragments by Two Pseudo-Fission Fragments. Theoretical Model \Yu.V. Volkov, O.B. Duginov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 7 pages, 3 illustration, 2 tables. – References 6 titles.

The model for description of neutron-fission fragments interactions by two pseudo-fission fragments is developed. The methods for ranking of isotopes according to their impact to the neutron balance and determination of the pseudo-fission fragments parameters has been proposed.

УДК 621.039.5.001.57

Elementary Theory of the Ring Nuclear Reactor (Stability of the Ring Reactor) \Yu.V. Volkov, G.Ya. Rumiantsev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 7 pages, 2 illustration, 1 table. – References 4 titles.

Simulators of the ring nuclear reactors are considered in this paper. Influence of geometric parameters of ring configuration on stability of neutron field under distortion is investigated.

УДК 621.039.51

Simulation of Slow Neutron's Transport for TRIGA Reactor \Yu.A. Korovin, A.A. Travleev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 7 pages, 4 illustration, 1 table. – References 10 titles.

The utilization of TRIGA fuel type reactor within a TRADE project requires a detailed analysis of neutron-physics characteristics of the TRIGA core. One of important features of TRIGA fuel – a presence of a moderator – hydrogen in the fuel meat leads to strong negative reactivity feedback. A hydrogen is in the form of zirconium hydride, and a neutron spectrum in the fuel is affected strongly by chemical binding of hydrogen and neighboring atoms in zirconium hydride.

Calculations of multiplication coefficient performed in this work with the help of MCNP code show the importance of taking into account binding effects for some materials used in TRIGA core. Recent evaluations of thermal data for hydrogen in water and in zirconium hydride are reviewed. Some differences in cross-sections from different evaluations are discovered, and an impact of these differences to the multiplication coefficient are displayed.

УДК 621.039.5.001.4

On Possibility of Production ^{242m}Am in the Special Installations \A.L. Kochetkov, Yu.A. Kazansky, V.A. Levchenko, I.P. Matveenko; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 8 pages, 6 illustration, 2 tables. – References 8 titles.