

УДК 621.039.5

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.1.09>

Оригинальная статья / Original paper

Влияние моделей теплового рассеяния нейтронов на расчет эффекта обезвоживания РБМК

О.Н. Андрианова, И.Е. Иванов, В.А. Варфоломеева, В.Е. Дружинин

АО «ВНИИАЭС»,

109507, Россия, г. Москва, ул. Ферганская, д. 25

Реферат. Исследуются эффекты обезвоживания бесконечных решеток РБМК с уран-эрбиевым топливом с акцентом на чувствительность расчетов к области первых резонансов эрбия (0,1 – 1 эВ). Обсуждается влияние моделей теплового рассеяния нейтронов в воде и графите на формирование спектра нейтронов, а также обновление моделей термализации в международных библиотеках ядерных данных. Сопоставлены современные модели из библиотеки ENDF/B-VIII.1 с моделями программы MCU и оценено их влияние на расчет эффекта обезвоживания бесконечной топливной решетки РБМК. Расчеты проводились с помощью программы MCNP, а данные по тепловому рассеянию нейтронов были получены с использованием программы NJOY2016 и модуля LEAPR. Результаты тестовых расчетов показали, что учет химических связей и изменения кристаллической решетки графита при облучении приводит к увеличению реактивности до $1-2 \beta_{эфф}$ для свежего топлива при температурах ниже 400 К. Для рабочих состояний с глубиной выгорания выше 16 МВт сут/кг различия в моделях термализации нивелируются и их влияние на эффект обезвоживания сокращается до $0,1-0,2 \beta_{эфф}$.

Ключевые слова: РБМК, эффект обезвоживания, уран-эрбиевое топливо, модель свободного газа, рассеяние на связанных ядрах, термализация нейтронов.

Для цитирования: Андрианова О.Н., Иванов И.Е., Варфоломеева В.А., Дружинин В.Е. Влияние моделей теплового рассеяния нейтронов на расчет эффекта обезвоживания РБМК. *Известия вузов. Ядерная энергетика.* 2026;1:110–121. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.1.09>

Введение

Расчеты эффектов обезвоживания реакторов типа РБМК с уран-эрбиевым топливом являются чувствительными к области первых резонансов эрбия, что соответствует диапазону энергий от 0,1 до 1 эВ. На формирование спектра нейтронов

в данной области значительно влияют модели теплового рассеяния нейтронов в воде и графите. В последние годы в рамках международных групп модели термализации воды и графита уточнялись и совершенствовались на основании сравнения с экспериментальными данными, включая дважды дифференциальные сечения, а также пространственно-энергетические и угловые спектры нейтронов в тепловой области энергий. Данные по законам теплового рассеяния в конденсированных средах обновлялись в зарубежных библиотеках оцененных ядерных данных, в то время как в отечественных библиотеках и программах продолжают использоваться более ранние модели термализации нейтронов.

В данной работе проведено сопоставление моделей теплового рассеяния нейтронов в воде и графите из библиотеки ENDF/B-VIII.1 [1] с моделями, принятыми в программе MCU [2]. Исследовано влияние этих моделей на расчет эффекта обезвоживания бесконечной топливной решетки РБМК. Расчеты выполнялись с использованием прецизионной программы MCNP [3], а поточечные данные по тепловому рассеянию нейтронов в конденсированных средах готовились с помощью программы NJOY2016 [4] и модуля LEAPR на основе различных моделей фононных спектров.

Формирование матриц термализации для расчетов методом Монте-Карло

Сечения замедления нейтронов в тепловой области являются сложными функциями от энергии и зависят от физико-химических свойств и температуры рассеивающего материала. Для моделирования процесса термализации используют различные приближения: от простейших моделей одноатомного или свободного газа до моделей, учитывающих взаимодействие между рассеивающим атомом и его соседями в молекуле или твердом теле, а также эффекты интерференции нейтронов на различных типах кристаллических решеток.

Исходная информация о тепловом рассеянии нейтронов записывается в виде так называемых спектров *фононов*, характеризующих передачу колебательной энергии связанных атомов. На основе фононных спектров для библиотек оцененных ядерных данных в формате ENDF-6 [5] формируется файл MF=7 с данными о рассеянии тепловых нейтронов (для энергий ниже 5 эВ), в которых могут быть представлены следующие типы реакций рассеяния:

- когерентное упругое рассеяние для материалов, имеющих кристаллическую решетку (дифракция Брэгга);
- некогерентное упругое рассеяние для некристаллических материалов (частично упорядоченных водородсодержащих систем);
- некогерентное неупругое рассеяние, заданное с использованием данных о законе теплового рассеяния в виде $S(\alpha, \beta, T)$, определяющим связь энергии и импульса при рассеянии нейтронов на ядрах среды, где α – изменение импульса в результате столкновения, β – изменение энергии в результате столкновения, T – температура среды.

В файлах MF=7 зарубежных и отечественных библиотек данные по термализации нейтронов приведены для небольшого фиксированного набора температур. Например, в библиотеке оцененных нейтронных данных РОСФОНД [6] для термализации нейтронов в воде имеются данные для восьми температур в диапазоне от 293,6 до

800 К, для термализации нейтронов на графите доступны данные для десяти температур в диапазоне от 296 до 2000 К. Этих данных недостаточно, поскольку для прецизионных расчетов по реализующим метод Монте-Карло программам (например, MCU [7], MCNP и другие) с библиотеками констант в ACE-формате [8] с детальным слежением за энергией частиц требуются нейтронные данные с минимальным шагом по температуре (1 – 5 К). Сечения теплового рассеяния нейтронов для любой заданной температуры могут быть получены из данных по фоновым спектрам с помощью процессинговой программы NJOY (его специализированного модуля LEAPR).

Программа MCU имеет специализированный модуль подготовки данных по тепло-вому рассеянию нейтронов на связанных атомах и библиотеку фоновых спектров. Данные по рассеянию на водороде в воде и углероде в кристаллическом графите в этой библиотеке аналогичны данным из работы, опубликованной в 1994 г. [9], в основу которой заложены модели работы [2].

В рамках рабочих групп МАГАТЭ модели фоновых спектров воды [10] и графита [11] были пересмотрены и опубликованы в виде заданий на модуль LEAPR в 2005 г. в отчете Комитета по ядерным данным. В руководстве программы NJOY2016 [4] приводится модель 1994 г. для фоновых спектров для углерода в кристаллическом графите и модель 2005 г. для водорода в воде. В рамках деятельности международной группы АЯЭ ОЭСР (SG 42) [12] по изучению законов рассеяния тепловых нейтронов в 2020 г. модель фоновых спектров для углерода в кристаллическом была пере-смотрена с учетом изменения плотности графита при облучении его в реакторе. В последней версии 2024 г. библиотеки оцененных ядерных данных ENDF/B-VIII.1 появились данные по термализации для реакторного графита с различной степенью пористости: 10, 20 и 30%.

Термализация нейтронов в воде и графите

Вода обладает хорошей замедляющей способностью и большой анизотропией рассеяния, которая уменьшается с ростом температуры. Основной особенностью, определяющей эти свойства воды, является возбуждение замороженных вращений молекулы. Модель термализации нейтронов учитывает молекулярные связи водорода в молекуле воды, тепловое рассеяние нейтронов на кислороде описывается моделью свободного газа. Тепловое рассеяние нейтронов на молекуле H_2O характеризуется реакцией некогерентного неупругого рассеяния, энергетическая зависимость которого, восстановленная на основе фоновых спектров 1994 г. (аналогичных принятым в программе MCU), приведена на рис. 1а. Также на рисунке 1а приведено сравнение энергетических зависимостей сечения рассеяния для модели свободного газа, т.е. без учета молекулярных связей водорода в воде.

Атомы углерода в графите расположены плоскими слоями в гексагональной решетке. В каждом слое атомы прочно связаны с тремя соседними, расстояние между которыми значительно меньше, чем расстояния между слоями, из-за чего слои связаны друг с другом более слабыми силами. Такая структура кристаллической решетки объясняет сильную анизотропию в свойствах графита.

Сечение рассеяния нейтронов на графите состоит из двух компонент: неупругого рассеяния, описываемого законом рассеяния $S(\alpha, \beta, T)$ в некогерентном приближении,

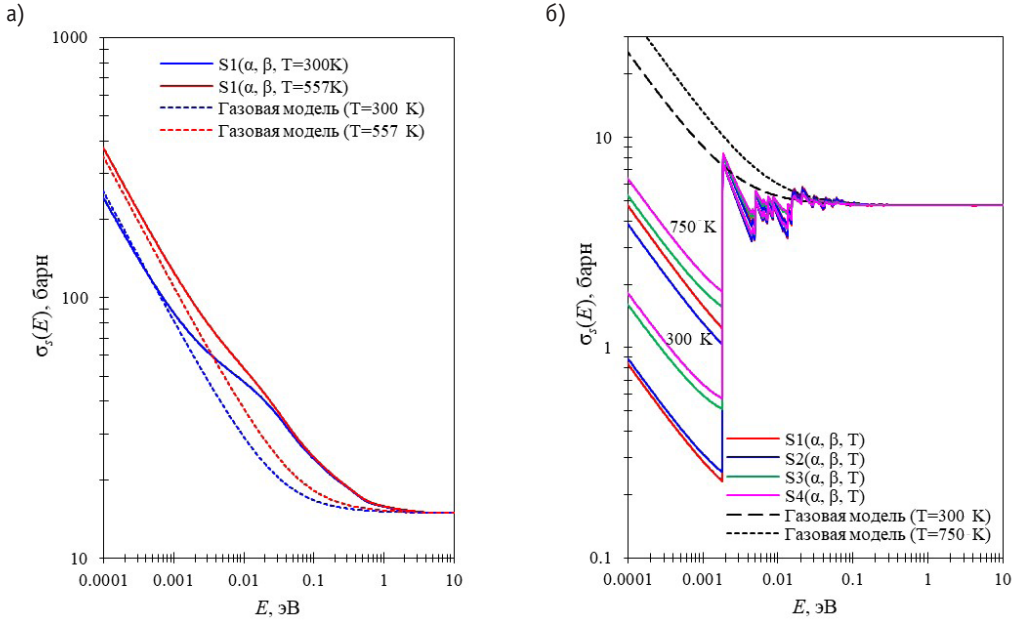


Рис. 1. Сечения теплового рассеяния нейтронов, восстановленные по различным моделям: а) в воде; б) в графите для разных моделей: 1 и 2 – модель кристаллического графита из MCU и ENDF/B-VIII.1; 3, 4 – модель реакторного графита с пористостью 10 и 30%

и упругого когерентного рассеяния. Эффекты когерентного рассеяния в графите оказываются существенными при нормальной комнатной и близкой к ней температурах, с ростом температуры они уменьшаются. Сравнение различных моделей теплового рассеяния (сумма когерентного упругого и некогерентного неупругого рассеяния) на связанных и свободных атомах углерода показано на рис. 1б. Почти вертикальная линия на рис. 1б представляет собой брэгговский порог в когерентном упругом рассеянии, за которым с ростом энергии следует структура из брэгговских пиков, обусловленная эффектом интерференции.

Важная особенность реакторного графита – это его сравнительно высокая пористость. Характеристики пористой структуры зависят от марки графита, длительности условий облучения. Представленные на рис. 1б сечения рассеяния соответствуют различным моделям термализации графита, три из которых взяты из библиотеки оцененных ядерных данных ENDF/B-VIII.1. Были рассмотрены две модели фонновых спектров (1994 г. и 2024 г.) для кристаллического графита с плотностью 2,2 г/см³, модели для облученного реакторного графита с пористостью 10% (плотностью 2,0 г/см³) и пористостью 30% (плотностью 1,6 г/см³). Пористость определяет плотность графита и, как видно из графиков, вместе с температурой оказывает влияние на тепловое сечение рассеяния нейтронов. Сравнение разных оценок показало, что из-за отличий в моделях фонновых спектров наблюдаются существенные различия в упругом когерентном и неупругом некогерентном рассеянии тепловых нейтронов на графите. Однако для полного нейтронного сечения рассеяния – суммы когерентного и некогерентного рассеяния – наблюдается эффект компенсации, проявляющийся в уменьшении различий в сечениях теплового рассеяния в важном для реакторных приложений диапазоне энергий.

Влияние моделей термализации нейтронов на пустотный эффект

Анализ влияния моделей теплового рассеяния нейтронов на воде и графите на расчеты эффекта обезвоживания бесконечной решетки ячеек РБМК выполнялся с использованием программы MCNP. Библиотеки с детальным слежением по энергии в формате ACE для заданного набора температур формировались с помощью процессинговой программы NJOY из библиотеки оцененных нейтронных данных РОСФОНД. Данные по термализации нейтронов в воде и графите готовились с помощью модуля LEAPR программы NJOY из различных моделей фононных спектров: 1) модели, принятой в программе MCU; 2) моделей из библиотеки ENDF/B-VIII.1.

В качестве тестовых моделей были рассмотрены бесконечные решетки топливных ячеек РБМК-1000 с уран-эрбиевым топливом (2,8% – начальное обогащение по ^{235}U , 0,6% – начальное весовое содержание эрбия). Добавление эрбия в качестве выгорающего поглотителя в топливо РБМК приводит к уменьшению эффекта обезвоживания. Наибольшее влияние этого резонансного поглотителя на пустотный эффект проявляется при наличии градиента температур – разницы в температурах воды и графита.

Механизм такого влияния резонансной структуры поглотителей заключается в следующем [13]. На формирование спектра нейтронов в топливе оказывают равное влияние как вода, так и графит, который в рабочем состоянии имеет существенно большую температуру, чем вода. При обезвоживании каналов тепловая часть спектра нейтронов сдвигается в сторону более высоких энергий из-за большей температуры графита, что приводит к увеличению числа нейтронов в области резонанса ^{167}Er (в интервале энергий 0,1 – 1 эВ) и, соответственно, к увеличению скорости его резонансных захватов. Увеличение захватов нейтронов эрбием и снижение захватов в канале вследствие его обезвоживания приводит к уменьшению коэффициента размножения нейтронов в ячейке РБМК в рабочем состоянии (температура топлива 1000 К, воды – 557 К и графитового блока – 750 К). В холодном состоянии (при температурах топлива, воды и графита 300 К) обезвоживание канала наоборот приводит к увеличению коэффициента размножения нейтронов.

Следует отметить, что в холодном состоянии сильнее всего проявляются эффекты химических связей и структуры кристаллической решетки графита. На рисунке 2 показана энергетическая зависимость тока нейтронов из графита в топливный канал для различных моделей термализации и двух температур графитового блока: 300 и 750 К. Приведенные зависимости показывают, что учет когерентного упругого рассеяния нейтронов на графите увеличивает эффективную температуру спектра Максвелла. Наличие пор в кристаллической решетке облученного графита наоборот приводит к смещению потока нейтронов в область низких энергий, а значит будет приводить к уменьшению отрицательной составляющей в эффекте обезвоживания, обусловленной резонансным захватом эрбия.

Спектр нейтронов в топливе в области замедления (до 10 эВ) имеет ярко выраженную резонансную структуру (см. рис. 3). В начале кампании в спектре замедления нейтронов в топливе наблюдаются резкие провалы за счет поглощения нейтронов на резонансах ^{167}Er , ^{238}U и ^{235}U . По мере выгорания ^{167}Er и наработки плутония в спектре замедления нейтронов проявляется резонансная структура ^{239}Pu и ^{240}Pu . Резонансная структура практически не проявляется в спектре замедления нейтронов в воде

Влияние моделей теплового рассеяния нейтронов на расчет эффекта обезвоживания РБМК

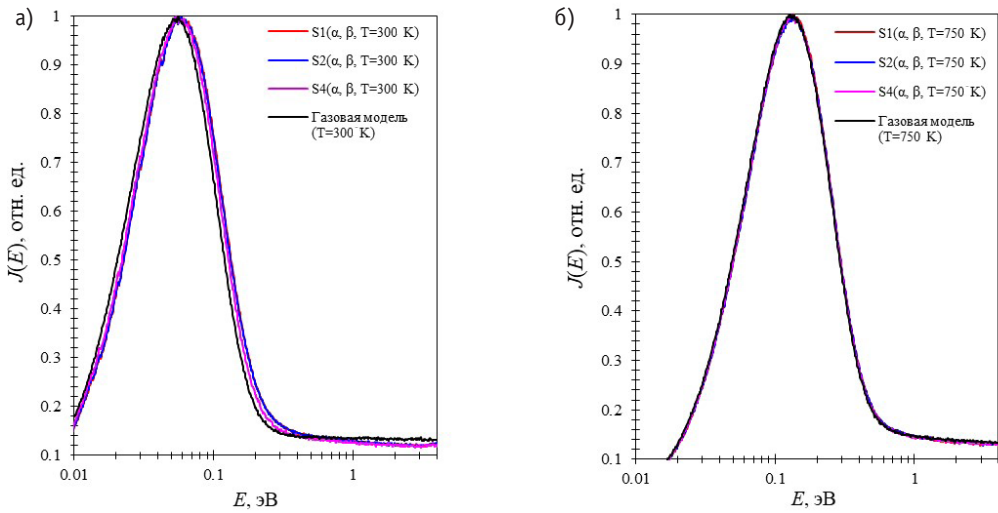


Рис. 2. Ток нейтронов из графита в топливный канал для различных моделей и температур: а) для 300 К; б) для 750 К (нумерацию моделей см. на рис. 1)

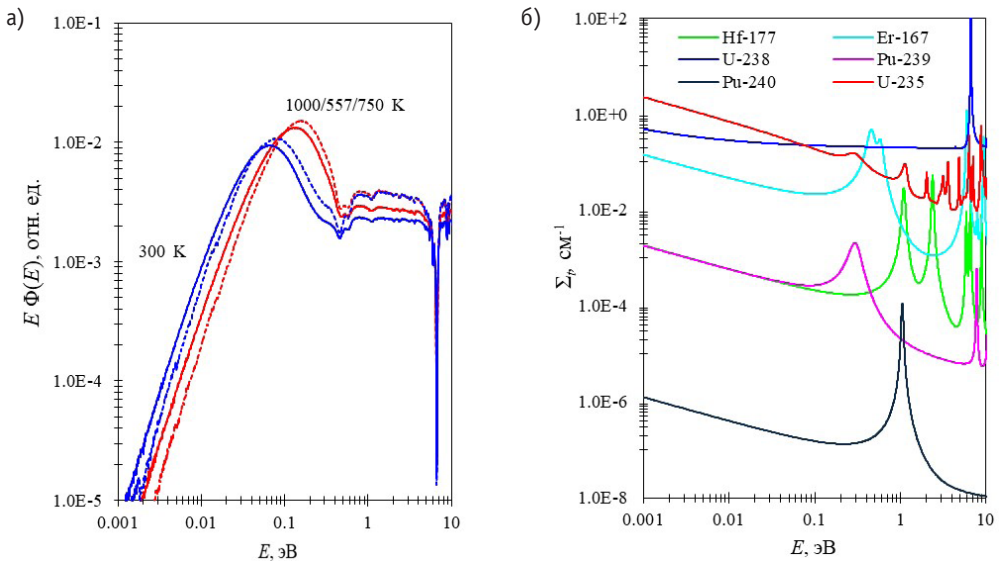


Рис. 3. Влияние резонансов на средний спектр нейтронов в топливе на начало кампании: а) синие кривые – холодное, красные – рабочее состояние с водой (сплошная линия) и без воды (пунктир); б) полное макросечение для основных изотопов

и графите. Однако в холодном состоянии в отличие от горячего наблюдается так называемый эффект затенения внутреннего ряда твэлов, который выражается в том, что при обезвоживании топливного канала во внутреннем ряду уменьшается тепловое интегральное сечение резонансного захвата эрбия, в то время как во внешнем ряду оно увеличивается. Это видно по сильной деформации спектра нейтронов в топливе для холодного состояния в области энергий $\sim 0,5$ эВ (в первом резонансе эрбия). Этот эффект приводит к увеличению реактивности при обезвоживании топливного канала для холодных состояний.

Результаты расчетов бесконечных решеток с использованием различных моделей термализации

С целью оценки влияния модели теплового рассеяния нейтронов на расчеты эффекта обезвоживания РБМК были рассмотрены расчетные тесты бесконечных однородных ячеек, составы топлива и выгорающих поглотителей, в которых изменялись, согласно различной глубине выгорания, свежее топливо и три шага по выгоранию $B = 0,08, 16$ и 38 МВт сут/кг.

Также было рассмотрено четыре варианта изменения температуры материалов и плотности воды при изотермическом нагревании: 1) температура топлива, конструкционных материалов, воды и графита равна 300 К, плотность воды $\rho = 1$ г/см³, 2) температура всех материалов равна 393 К, плотность воды $\rho = 0,9$ г/см³, 3) температура всех материалов равна 557 К, плотность воды $\rho = 0,7$ г/см³, 4) рабочее состояние: температура топлива 1000 К, воды – 557 К, конструкционных материалов – 577 К, графитовой втулки и блока – 650 и 750 К соответственно, плотность воды $\rho = 0,5$ г/см³.

Результаты расчетов зависимости изменения коэффициента размножения в бесконечной однородной решетке $\Delta k_{\infty}(B) = (k_{\infty}(B, \rho = 0) - k_{\infty}(B, \rho)) / \beta_{эфф}$ при обезвоживании канала от глубины выгорания топлива для четырех вариантов температур материалов, выполненных по программе MCNP с различными моделями матриц термализации, представлены на рис. 4. Из представленных зависимостей видно, что по мере повышения температуры топлива и увеличения глубины его выгорания различия между моделями все меньше и меньше влияют на расчет эффекта обезвоживания. Для свежего топлива и небольших температур материалов (до 393 К) учет пористости графита в модели термализации приводит к увеличению величины Δk_{∞} на $0,6-0,8 \beta_{эфф}$. Отсутствие учета химической связи атомов приводит к завышению эффекта обезвоживания ячейки (величины Δk_{∞}) на $1-2 \beta_{эфф}$ для всех рассмотренных состояний до глубины выгорания $B = 16$ МВт сут/кг. Для больших глубин выгорания >20 МВт сут/кг различие между моделями термализации, а также отсутствие учета химических связей приводит к незначительному изменению величины Δk_{∞} на $0,1-0,2 \beta_{эфф}$. Это продемонстрировано на рис. 5, на котором показана зависимость изменения коэффициента размножения бесконечной решетки от плотности воды $\Delta k_{\infty}(B, \rho) = (k_{\infty}(B, \rho) - k_{\infty}(B, \rho = 1)) / \beta_{эфф}$ для рабочего состояния для различных глубин выгорания и моделей термализации. Для рабочего состояния учет в моделях термализации появления пористости в кристаллической решетке при облучении графита приводит к увеличению величины Δk_{∞} не более, чем на $0,2 \beta_{эфф}$. При этом переход от моделей термализации с учетом химических связей к модели свободного газа не меняет зависимости коэффициента размножения бесконечной решетки от плотности воды.

Влияние моделей теплового рассеяния нейтронов на расчет эффекта обезвоживания РБМК

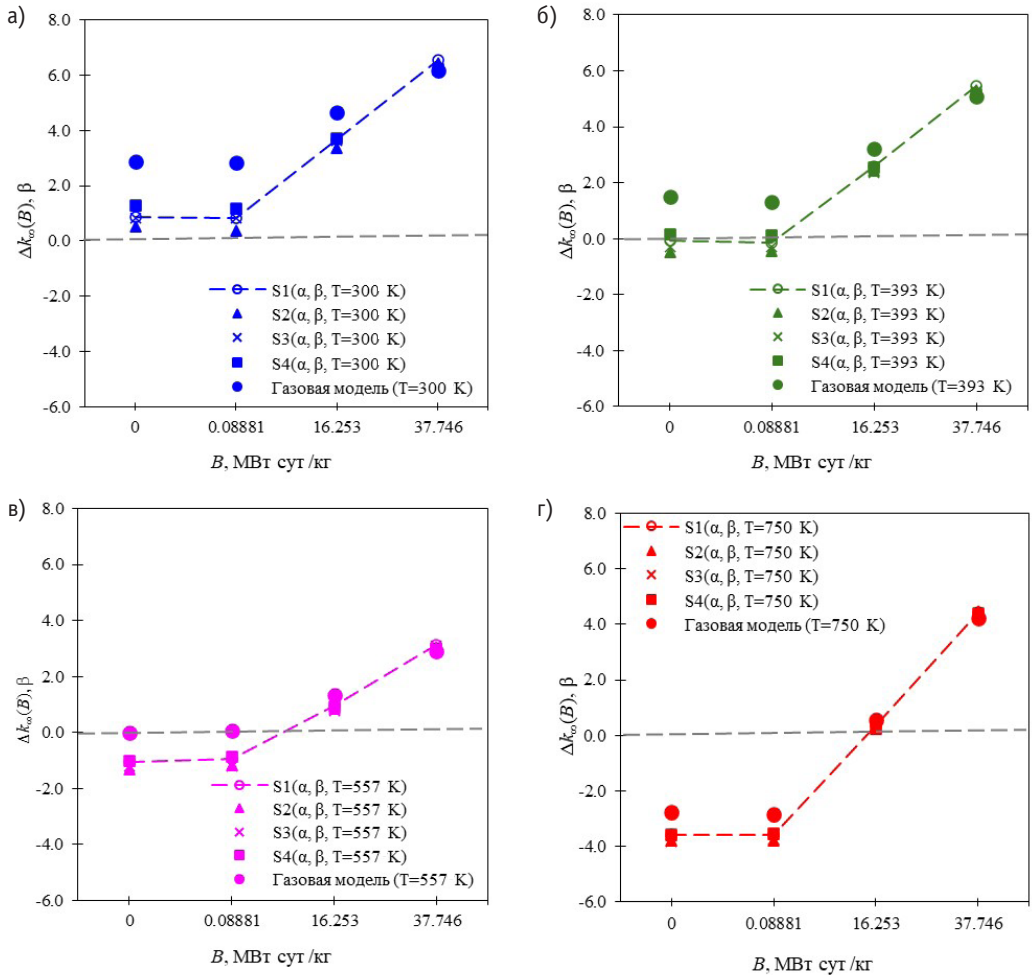


Рис. 4. Влияние модели термализации на расчет пустотного эффекта в бесконечной однородной топливной ячейке РБМК (нумерацию моделей см. на рис. 1)

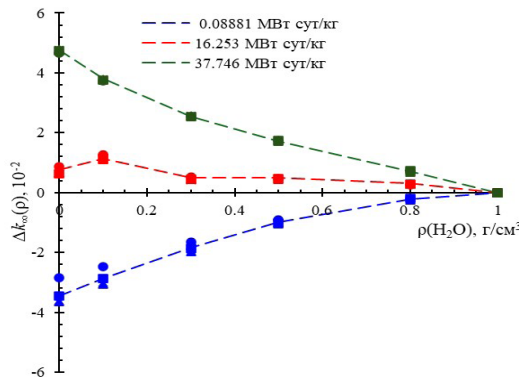


Рис. 5. Зависимость изменения коэффициента размножения бесконечной решетки от плотности воды для рабочего состояния для различных глубин выгорания и моделей термализации (обозначение моделей см. на рис. 4)

Заключение

На примере тестовых расчетов бесконечных топливных решеток РБМК с уран-эрбиевым топливом показано, что учет химических связей и особенностей изменения кристаллической решетки в процессе облучения графита в моделях термализации приводит к повышению реактивности при обезвоживании до $1 - 2 \beta_{эф}$ для свежего топлива при температурах материалов ячейки ниже 400 К. При этом для рабочего состояния для глубин выгорания выше 16 МВт сут/кг различия в моделях термализации нивелируются, и тепловое рассеяние нейтронов в воде и графите может быть описано моделью свободного газа.

Литература

1. Nobre G., Brown D., Arcilla R., Coles R., Shu B. Progress towards the ENDF/B-VIII.1 release, EPJ Web of Conferences 294, 04004. 2024, WONDER-2023. DOI: <https://doi.org/10.1051/epj-conf/202429404004>
2. Koppel J.U., Houston S.H. Reference for ENDF Thermal Neutron Scattering Data. General Atomic report GA-8774, BNL, 1968. URL: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc864861/m2/1/high_res_d/4075168.pdf (дата обращения 02.07.2025).
3. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5. April 24, 2003. URL: https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/TechReport_2003_LANL_LA-UR-03-1987Revised212008_SweezyBoothEtAl.pdf (дата обращения 02.07.2025).
4. Muir D.W., Boicourt R.M., Kahler A.C., Conlin J.L., Haeck W. The NJOY Nuclear Data Processing System. Version 2016. November 7, 2019. LA-UR-17-20093.
5. ENDF-6 Formats Manual: Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data Files ENDF/B-VI, ENDF/B-VII and ENDF/B-VIII. Ed. A. Trkov, M. Herman, D.A. Brown, CSEFG Document ENDF-102, Report BNL-203218-2018-INRE, SVN Commit: Revision 215, February 1, 2018.
6. Забродская С.В., Игнатьев А.В., Кошечев В.Н., Манохин В.Н., Николаев М.Н., Проняев В.Г. РОСФОНД – Российская национальная библиотека оцененных нейтронных данных. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы*. 2007;1–2:3–21. URL: <https://vant.ippe.ru/year2007/neutron-constants/543-1.html> (дата обращения 02.07.2025).
7. MCU-RBMK с библиотекой MDB650. Аттестационный паспорт программного средства рег. №430 от 27.02.18. О проекте MCU (Электронный ресурс). Официальный сайт проекта MCU. URL: <https://mcuproject.ru/rabout.html> (дата обращения 02.07.2025).
8. Conlin J.L., Romano P. A Compact ENDF (ACE) Format Specification. LANL Report LA-UR-19-29016, 2019. URL: https://mcnp-green.lanl.gov/pdf_files/TechReport_2019_LANL_LA-UR-19-29016_ConlinRomano.pdf (дата обращения 02.07.2025).
9. MacFarlane R.E. New Thermal Neutron Scattering Files for ENDF/B-VI, Release 2, LA-12639-MS, 1994. URL: <https://inis.iaea.org/records/qjh18-7fh70> (дата обращения 02.07.2025).
10. Mattes M. and Keinert J. Status of Thermal Neutron Scattering Data for Graphite, International Atomic Energy Agency. INDC(NDS)-0475, 2005. DOI: <https://doi.org/10.61092/iaea.2s58-k110>
11. Mattes M. and Keinert J. Thermal Neutron Scattering Data for the moderator Materials H₂O, D₂O and ZrH_x in ENDF-6 Format and as ACE Library for MCNP(x) Codes. International Atomic Energy Agency, INDC(NDS)-0470, 2005. DOI: <https://doi.org/10.61092/iaea.qhwb-q699>
12. Thermal Scattering Law $S(\alpha, \beta)$: Measurement, Evaluation and Application, International Evaluation Co-operation Volume 42. OECD NEA No. 7511, 2020. URL: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_23901/international-evaluation-co-operation-volume-42?details=true (дата обращения 02.07.2025).

13. Федосов А.М. Влияние выгорающих поглотителей на эффект обезвоживания РБМК. *Атомная энергия*. 1993;75(1):67–69. URL: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5134> (дата обращения 02.07.2025).

Поступила в редакцию 25.09.2025

После доработки 24.02.2026

Принята к опубликованию 20.03.2026

Авторы

Андрианова Ольга Николаевна, главный эксперт, к.т.н.,

E-mail: ONAndrianova@vniiaes.ru

Иванов Илья Евгеньевич, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.,

E-mail: IIVanov@vniiaes.ru

Варфоломеева Валерия Андреевна, инженер 1 категории,

E-mail: VAVarfolomeeva@vniiaes.ru

Дружинин Владимир Евгеньевич, руководитель департамента, к.т.н.,

E-mail: VEDruzhinin@vniiaes.ru

UDC 621.039.5

Neutron Thermal Scattering Models' Impact on RBMK Dewatering Effect Calculations

Andrianova O.N., Ivanov I.E., Varfolomeeva V.A., Druzhinin V.E.

*JSC "All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation",
25 Ferganskaya St., 109507 Moscow, Russia*

Abstract

The paper investigates the dewatering effect of RBMK in finite lattices with the uranium-erbium fuel, focusing on the sensitivity of calculations to the erbium first-resonance area which is considered from 0.1 eV to 1 eV. The impact of neutron thermal scattering models in water and graphite on forming neutron spectra is discussed. In addition, the update of thermalization models in international nuclear data libraries is considered. The data on the laws of thermal scattering in condensed matter have been updated in foreign libraries of evaluated nuclear data, while earlier models of neutron thermalization sometimes continue to be used in Russian libraries and programs. The MCU code has a specialized module for preparing data on thermal neutron scattering on bound atoms and a library of phonon spectra. The article compares modern models from the ENDF/B-VIII.1 library with the MCU code's ones and their influence on the calculation of the dewatering effect of the RBMK infinite fuel grid is estimated. The calculations were performed using the MCNP code, and the data on thermal neutron scattering were obtained using the NJOY2016 program and the LEAPR module. The results of test calculations showed that taking into account chemical bonds and changes in the graphite crystal lattice during irradiation leads to an increase in reactivity to $1-2 \beta_{\text{eff}}$ for fresh fuel at temperatures below 400°K. For operating conditions with a burn out depth above 16 MW day/kg the differences in the thermalization models are leveled and their impact on the dewatering effect is reduced to $0.1-0.2 \beta_{\text{eff}}$.

Keywords: RBMK, dewatering effect, uranium-erbium fuel, free gas model, scattering by bound nuclei, neutron thermalization.

For citation: Andrianova O.N., Ivanov I.E., Varfolomeeva V.A., Druzhinin V.E. Neutron Thermal Scattering Models' Impact on RBMK Dewatering Effect Calculations. *Izvestiya*

vuzov. *Yadernaya Energetika*. 2026;1:110–121. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.1.09> (in Russian).

References

1. Nobre G., Brown D., Arcilla R., Coles R., Shu B. Progress towards the ENDF/B-VIII.1 release. *EPJ Web of Conferences* 294, 04004. 2024, WONDER-2023. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202429404004>
2. Koppel J.U., Houston S.H. Reference for ENDF Thermal Neutron Scattering Data. General Atomic report GA-8774, BNL, 1968. URL: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc864861/m2/1/high_res_d/4075168.pdf (accessed 02.07.2025).
3. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5. April 24, 2003. URL: https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/TechReport_2003_LANL_LA-UR-03-1987Revised212008_Sweezy-BoothEtAl.pdf (accessed 02.07.2025).
4. Muir D.W., Boicourt R.M., Kahler A.C., Conlin J.L., Haeck W. The NJOY Nuclear Data Processing System. Version 2016. November 7, 2019. LA-UR-17-20093.
5. ENDF-6 Formats Manual: Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data Files ENDF/B-VI, ENDF/B-VII and ENDF/B-VIII. Ed. A. Trkov, M. Herman, D.A. Brown, CSEFG Document ENDF-102, Report BNL-203218-2018-INRE, SVN Commit: Revision 215, February 1, 2018.
6. Zabrodskaya S.V., Ignatyuk A.V., Koshcheev V.N., Manohin V.N., Nikolaev M.N., Pronyaev V.G. ROSFOND – Russian national estimated nuclear data library. *Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear constants*. 2007;1–2:3–21. URL: <https://vant.ippe.ru/year2007/neutron-constants/543-1.html> (accessed 02.07.2025) (in Russian).
7. MCU-RBMK with MDB650 library. Validation passport №430, 27.02.18. About the MCU project. <https://mcuproject.ru/rabout.html> (accessed 02.07.2025) (in Russian).
8. Conlin J.L., Romano P. A Compact ENDF (ACE) Format Specification. LANL Report LA-UR-19-29016, 2019. URL: https://mcnp-green.lanl.gov/pdf_files/TechReport_2019_LANL_LA-UR-19-29016_ConlinRomano.pdf (accessed 02.07.2025).
9. MacFarlane R.E. New Thermal Neutron Scattering Files for ENDF/B-VI, Release 2, LA-12639-MS, 1994. URL: <https://inis.iaea.org/records/qjh18-7fh70> (accessed 02.07.2025).
10. Mattes M. and Keinert J. Status of Thermal Neutron Scattering Data for Graphite. International Atomic Energy Agency, INDC(NDS)-0475, 2005. DOI: <https://doi.org/10.61092/iaea.2sj8-k110>
11. Mattes M. and Keinert J. Thermal Neutron Scattering Data for the moderator Materials H₂O, D₂O and ZrH_x in ENDF-6 Format and as ACE Library for MCNP(x) Codes. International Atomic Energy Agency, INDC(NDS)-0470, 2005. DOI: <https://doi.org/10.61092/iaea.qhwb-q699>
12. Thermal Scattering Law $S(\alpha, \beta)$: Measurement, Evaluation and Application, International Evaluation Co-operation Volume 42. OECD NEA No. 7511, 2020. URL: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_23901/international-evaluation-co-operation-volume-42?details=true (accessed 02.07.2025).
13. Fedosov A.M. Influence of burnable absorbers on the dehydration effect of an RBMK reactor. *Atomic Energy*. 1993;75:571–574. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00738989>

Authors

Olga N. Andrianova, Chief Expert, Cand.Sci. (Engineering),

E-mail: ONAndrianova@vniiaes.ru

Ilya E. Ivanov, Leading Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: IEIvanov@vniiaes.ru

Valeria A. Varfolomeeva, 1st Category Engineer,

E-mail: VAVarfolomeeva@vniiaes.ru

Vladimir E. Druzhinin, Head of Department, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: VEDruzhinin@vniiaes.ru