

А. В. Кучин, Ю. Н. Овдиенко,
В. А. Халимончук

Государственный научно-технический центр
по ядерной и радиационной безопасности

Моделирование расчетного бенчмарка AER для топливной кассеты реактора ВВЭР-440, содержащей гадолиний, с помощью программы HELIOS

Разработана расчетная модель топливной кассеты реактора ВВЭР-440 для программы HELIOS с целью проведения расчетов выгорания кассеты и подготовки мало групповых нейтронно-физических констант для физического расчета реактора. Точность расчета нейтронно-физических характеристик ТВС в процессе выгорания топлива оценивалась на основании сравнения результатов расчета с данными расчетного бенчмарка, распространенного в рамках работы международной организации AER (Atomic Energy Research).

Ключевые слова: ВВЭР, нейтронно-физические константы.

А. В. Кучин, Ю. М. Овдієнко, В. А. Халімончук

Моделювання розрахункового бенчмарка AER для паливної касети реактора ВВЕР-440, що містить гадоліній, за допомогою програми HELIOS

Розроблено розрахункову модель паливної касети реактора ВВЕР-440 для програми HELIOS з метою проведення розрахунків вигорання касети та підготовки мало групових нейтронно-фізичних констант для фізичного розрахунку реактора. Точність розрахунку нейтронно-фізичних характеристик ТВЗ у процесі вигорання палива оцінювалася на підставі порівняння результатів розрахунку з даними розрахункового бенчмарка, розповсюдженого в рамках роботи міжнародної організації AER (Atomic Energy Research).

Ключові слова: ВВЕР, нейтронно-фізичні константи.

© А. В. Кучин, Ю. Н. Овдиенко, В. А. Халимончук, 2011

Точность расчета нейтронно-физических характеристик активных зон реакторов ВВЭР зависит от качества подготовки библиотеки мало групповых констант топливных кассет. Для генерации мало групповых констант применяются спектральные коды, например HELIOS, WIMS, CASMO и др. Эти программы используют точное задание геометрии ТВС (расположение и состав ее структурных элементов). Они выполняют детальный расчет распределения потока нейтронов в объеме ТВС в многогрупповом приближении с учетом термализации нейтронов, резонансной структуры взаимодействия нейтронов и т. д. На основании полученных распределений потоков нейтронов выполняется “конденсация” и гомогенизация нейтронных сечений элементов ТВС и рассчитывается набор мало групповых (обычно двухгрупповых) констант для различных типов ТВС. В дальнейшем этот набор констант используется в программах расчета активных зон ядерных реакторов для определения параметров безопасности в различных режимах эксплуатации топливных загрузок. Качество подготовки нейтронно-физических констант проверяется на основе сравнения результатов расчета с известными решениями тестовых задач (бенчмарков) или на основе взаимных сравнений с соответствующими программами.

В рамках работы международной организации пользователей реакторов ВВЭР (Atomic Energy Research) распространены расчетный бенчмарк для моделирования выгорания топливной кассеты ВВЭР-440, содержащей твэлы с гадолиниевым выгорающим поглотителем [1]. Так как топливо с Gd-поглотителем имеет ряд особенностей по сравнению с обычным топливом (наличие значительных градиентов в распределении плотностей потоков нейтронов вблизи твэгов, резонансная структура сечений поглощения), особое внимание обращается на спектральные расчеты таких ТВС. Данный бенчмарк разработан с целью проверки как расчетных моделей ТВС, так и различных спектральных кодов, используемых при подготовке мало групповых нейтронно-физических констант. Тестовое решение получено с помощью программы WIMS [2]. В данной работе рассматривается использование программы HELIOS для моделирования расчетного бенчмарка и приводятся результаты сравнения с тестовой задачей.

HELIOS [3] — программа для расчета транспортного уравнения теории переноса нейтронов и гамма-квантов в двумерной геометрии, предназначенная для определения выгорания топлива и потока гамма-квантов в топливных ячейках ядерных реакторов. Система HELIOS была разработана творческим коллективом в фирме Scandpower под руководством Руди Штамлера. Наиболее важной областью расчетов в HELIOS является решение транспортного уравнения и расчет резонансного поглощения. Для решения транспортного уравнения в HELIOS применяется комбинированный метод (current coupling collision probability method — CCCP method), в соответствии с которым пространственные элементы связываются с помощью поверхностных токов нейтронов, а для определения потока нейтронов внутри пространственных элементов используется метод вероятности первых столкновений [4]. Чтобы оценить резонансный захват нейтронов, групповые потоки и резонансные интегралы выражаются как квадратуры резонансного сечения, в то время как пространственная неоднородность описывается эквивалентными сечениями, зависимость которых от резонансных сечений находится на основании нового СССР-расчета.

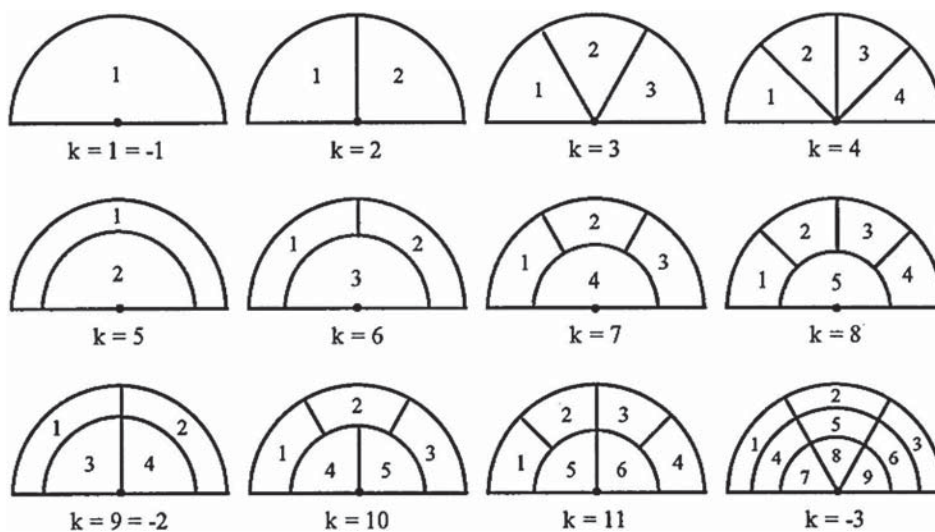


Рис. 1. Угловые сектора и их нумерация для шивки токов в программе HELIOS

Одним из наиболее важных аспектов программы HELIOS является гибкость создания геометрической модели. Программа может описывать геометрические нерегулярности, такие как водные полости произвольной формы или произвольно расположенные топливные и поглощающие стержни. Она позволяет рассчитывать тепловыделяющие сборки реакторов любого типа в отличие от большинства ячеечных программ, которые настроены на геометрию ТВС определенного типа, и поэтому могут рассчитывать топливные элементы только для конкретных типов реактора. Программа HELIOS может выполнять расчеты любого количества топливныхборок или их частей. Геометрическая гибкость создания расчетной модели заключается в возможности назначения свойств различным регионам, составляющим топливную сборку. Любой регион может содержать материал с выгорающим поглотителем и (или) изотопы с резонансным поглощением.

Использование в программе HELIOS метода вероятности первых столкновений (СП-метод) для решения транспортного уравнения приводит к тому, что время счета чрезмерно увеличивается, так как в этом случае для каждой области двумерной системы рассматривается СП-метод в каждой энергетической группе. Поэтому для решения транспортного уравнения применяется комбинированный метод шивки поверхностных токов (СС-метод) и вероятности первых столкновений. В соответствии с этим методом система произвольно разбивается на гетерогенные пространственные элементы, которые связываются поверхностными токами с дискретной угловой зависимостью. Внутри каждого элемента используется СП-метод. Дискретизация угловой зависимости поверхностных токов осуществляется разбивкой направленной полусферы поверхности на сектора. Это выполняется посредством разбиения полярного угла полусферы каждого поверхностного сегмента на некоторое количество θ -уровней, каждый из которых разбивается на несколько азимутальных ϕ -интервалов. Предполагается, что в каждом секторе угловое распределение потока изотропно. В программе HELIOS применяется стандартный набор дискретных разбиений, которые называются «порядком шивки» и обозначаются буквой k . На рис. 1 показана стандартная дискретизация угловой зависимости поверхностных токов, которая может использоваться в расчетах по программе HELIOS.

Отрицательное значение k означает разбиение полусферы нейтронных направлений на $|k|$ θ -уровней и каждого уровня на $|k|$ ϕ -интервалов. Особое место занимает порядок шивки $k=0$. Это означает, что не используется никакая угловая дискретизация, т. е. расчетные структуры, расположенные с любой стороны сегмента, не связаны токами. Вместо этого структуры объединяются в один пространственный элемент, внутри которого используется метод вероятности первых столкновений. В этом случае получается точное решение транспортного уравнения для решения задачи выгорания топливной кассеты, однако расчетное время задачи существенно увеличивается. Применение СС-метода приводит к уменьшению времени счета, однако точность решения задачи переноса нейтронов ухудшается. Поэтому точность СС-метода применительно к решению гексагональной геометрии должна быть исследована, для чего точное решение задачи СП-методом для $k=0$ сравнивается с решениями при различных значениях порядка шивки.

Для построения расчетной модели задачи определяются несколько периферийных структур, которые не связываются с другими структурами. Для каждого периферийного сегмента такой структуры задаются граничные условия. При решении задачи используется один из трех типов граничных условий:

зеркальные условия отражения — выходящий и входящий токи через сегмент равны;

альбедные условия отражения — определяют часть выходящего тока нейтронов, которая возвращается обратно через сегмент в определенную энергетическую группу;

«шивка» границ — предполагается, что выходящий ток через определенный сегмент является входящим током через другой сегмент. Этот тип граничных условий позволяет описать условия периодической и вращательной симметрии.

В соответствии с исходными для определения бенчмарка данными, представленными в трудах 10-го АЕР-симпозиума, разработан входной файл для программы HELIOS, задающий геометрические характеристики ТВС и ее материальный состав. На внешней границе ТВС используются зеркальные условия отражения нейтронов. Расчетная модель ТВС разработана для сектора симметрии 60° . На внутренней поверхности ТВС заданы условия периодичности. В расчетной модели детально описывается задание каждого твэла, центрального отверстия, чехла ТВС и т. д. На рис. 2

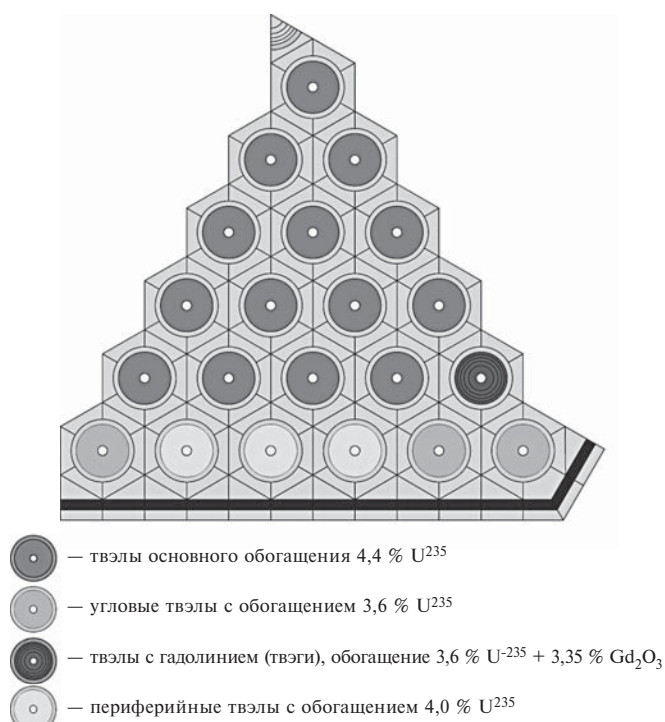


Рис. 2. Расчетная модель ТВС, реализованная в программе HELIOS

приведена расчетная модель ТВС, реализованная в программе HELIOS, а также показано обогащение топлива в твэлах ТВС и содержание гадолиниевого поглотителя в твэге.

На рис. 3 приведены результаты расчетов, связанные с оценкой чувствительности получаемых результатов к выбору расчетного шага по глубине выгорания топлива и количеству расчетных зон в области, содержащей гадолиниевый поглотитель (твэг). Расчеты выполнялись для шагов по выгоранию 1,0; 0,2; 0,1 МВт·сут/кг и десяти, пяти и одной физической зоны в области твэга. Влияние этих параметров на расчет коэффициента размножения нейтронов существенно на интервале $0 \div 10$ МВт·сут/кг, т. е. на интервале, в котором происходит интенсивное выгорание основных поглощающих изотопов гадолиния Gd^{155} и Gd^{157} . Результаты расчетов показали, что для моделирования выгорания топливной кассеты, содержащей твэлы с выгорающим гадолиниевым поглотителем, точность расчета коэффициента размножения для бесконечной среды (K_{∞}) приемлема при расчетном шаге по выгоранию 0,2 МВт·сут/кг на интервале $10 \div 12$ МВт·сут/кг, соответствующем области интенсивного выгорания основных поглощающих изотопов гадолиния Gd^{155} и Gd^{157} . При этом достаточно разбиение области твэга на 5 радиальных зон одинакового объема. После прохождения области интенсивного выгорания изотопов гадолиния ($10 \div 12$ МВт·сут/кг) расчетный шаг по выгоранию может быть увеличен до 1 МВт·сут/кг без потери точности расчета K_{∞} .

Основная проблема точности расчета в программе HELIOS — использование СС-приближения для решения задачи транспорта нейтронов. Метод вероятности первых столкновений (СР-метод) дает точный результат, но требует больших затрат машинного времени. Поэтому вначале было исследовано влияние параметра сшивки токов (k) на точность решения транспортной задачи для гексагональной геометрии. Для этого точное решение задачи с $k = 0$

сравнивалось с решением задачи при различных параметрах сшивки, приведенных на рис. 1. На рис. 4 дано отклонение коэффициента размножения бесконечной среды, полученного в расчетах с различными параметрами сшивки токов, от точного значения K_{∞} для $k = 0$. В пределах погрешности расчета $\delta K_{\infty} = 0,001$ (или 100 рсм) приемлемая точность решения транспортной задачи достигается для $k = 3; -3; -4$. При этом минимальное время решения задачи получается при $k = 3$ (табл. 1). Поэтому данное значение k принято в дальнейших расчетах выгорания топливной кассеты для сшивки токов между пространственными элементами ТВС.

Таблица 1. Максимальное отклонение коэффициента размножения нейтронов для различных k от точного решения и расчетное время варианта

Параметр сшивки токов k	Максимальное отклонение, рсм	Время расчета, мин
0	—	94,5
1	-292	2,6
2	-613	3,2
3	72	4,2
4	-131	5,9
5	-272	3,3
7	46	6,0
10	-242	7,6
11	-302	9,5
9, -2	-594	6,0
-3	103	16,7
-4	-87	56,5

В соответствии с определением бенчмарка для анализа результатов расчета по программе HELIOS сравнивались следующие нейтронно-физические характеристики топливной кассеты в зависимости от глубины выгорания топлива:

коэффициент размножения нейтронов для бесконечной среды (K_{∞});

изотопный состав топлива для основных делящихся нуклидов, продуктов деления и выгорающих поглотителей; потвэльное распределение энерговыделения в ТВС.

Сравнение коэффициента размножения K_{∞} . На рис. 5 приведено изменение коэффициента размножения нейтронов при выгорании ТВС, полученное по программе HELIOS, и сравнение с данными бенчмарка, на рис. 6 — изменение коэффициента размножения на начальном отрезке выгорания ТВС до 15 МВт·сут/кг. На рис. 5 видно, что в начале выгорания HELIOS дает хорошее согласие с результатами бенчмарка (максимальное расхождение порядка 130 рсм). После 30 МВт·сут/кг расхождения постепенно увеличиваются приблизительно до 350 рсм в конце выгорания, что приемлемо для сравнительных расчетов по программам.

Сравнение потвэльного энерговыделения. Сравнение результатов расчета потвэльного энерговыделения между HELIOS и бенчмарком приведено для характерной группы твэлов, которая представляет наибольший интерес для сравнения:

твэл в центральной части ТВС, расположенный рядом с центральным отверстием;

твэл с гадолиниевым выгорающим поглотителем (твэг);

угловой твэл;

периферийный твэл, расположенный на середине боковой стороны.

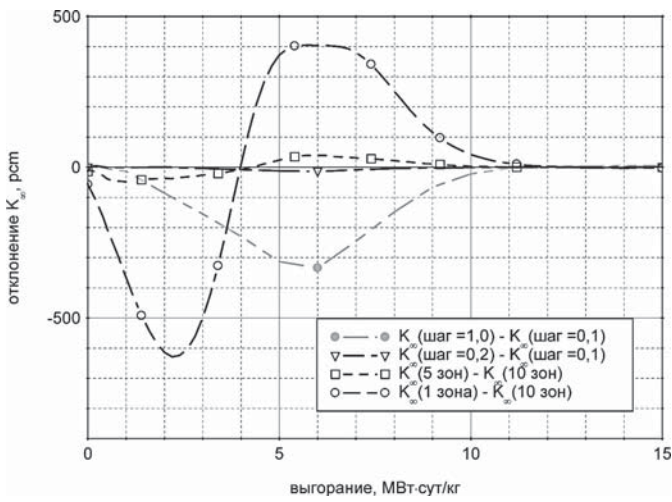


Рис. 3. Расхождения в K_{∞} при расчете выгорания ТВС с различной величиной расчетного шага по выгоранию и для различного количества расчетных зон в твэге

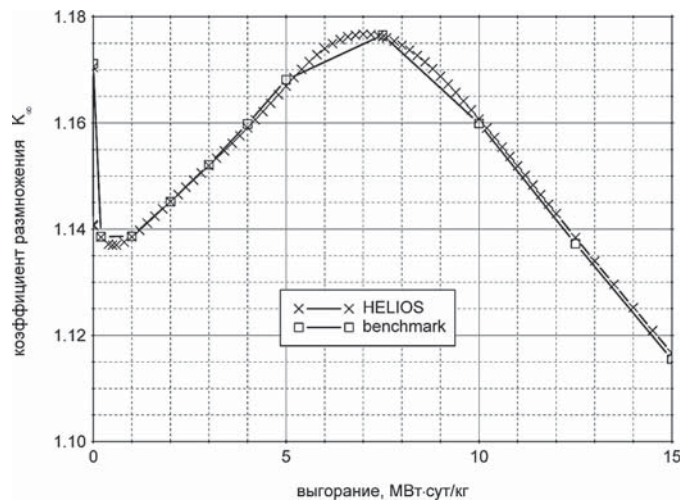


Рис. 6. Изменение коэффициента размножения в начале выгорания ТВС

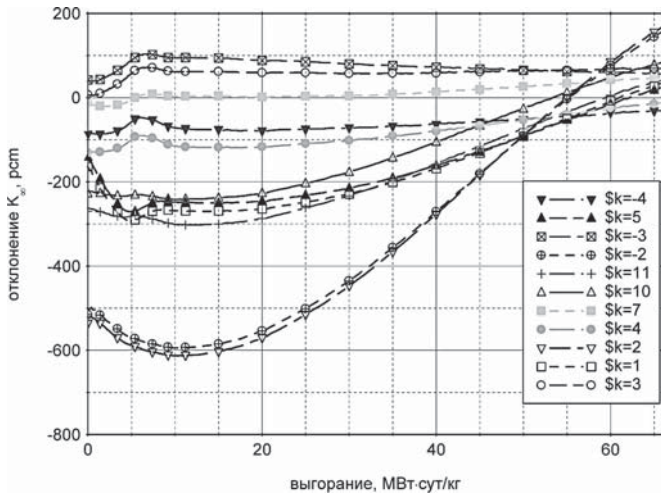


Рис. 4. Отклонения коэффициента размножения при расчете выгорания ТВС с различными порядками шивки токов от значения K_{∞} для $k = 0$

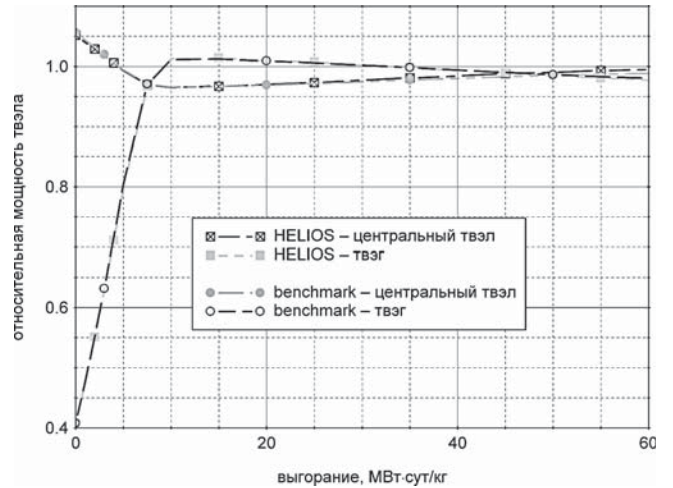


Рис. 7. Изменения относительной мощности в твэге и центральном твэле

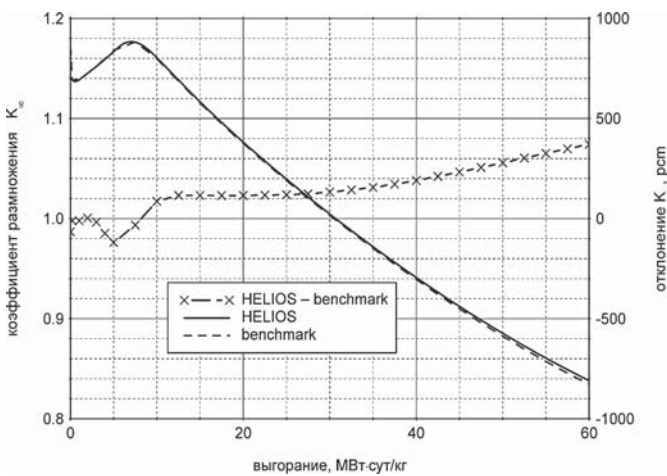


Рис. 5. Изменение коэффициента размножения при выгорании ТВС

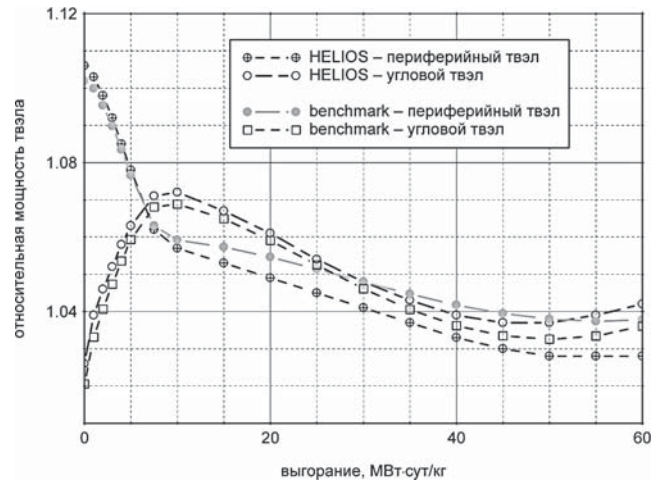


Рис. 8. Изменения относительной мощности в периферийном и угловом твэлах

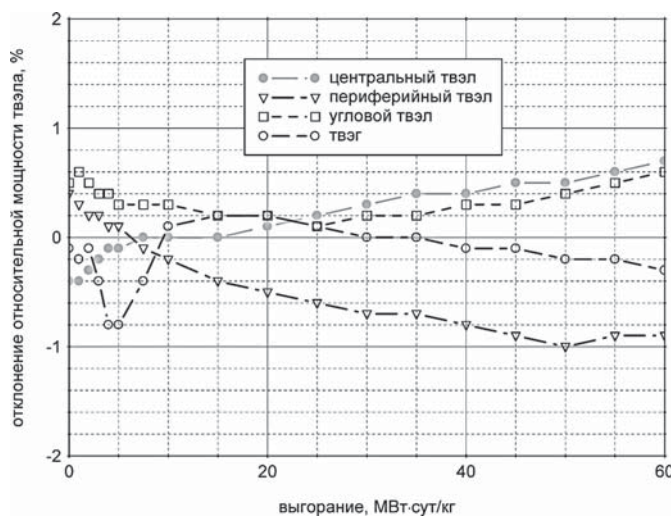


Рис. 9. Расхождения относительной мощности энерговыделения в твэлах между расчетом по HELIOS и бенчмарком

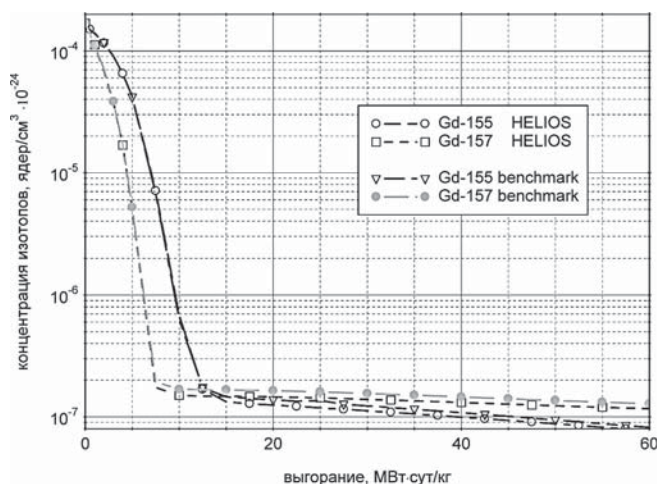


Рис. 12. Зависимость концентрации ядер изотопов выгорающего поглотителя Gd от глубины выгорания топлива в ТВС

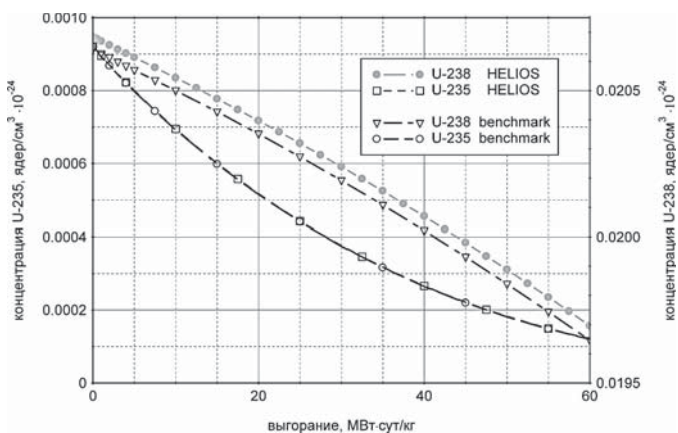


Рис. 10. Зависимость концентрации изотопов урана от глубины выгорания топлива в ТВС

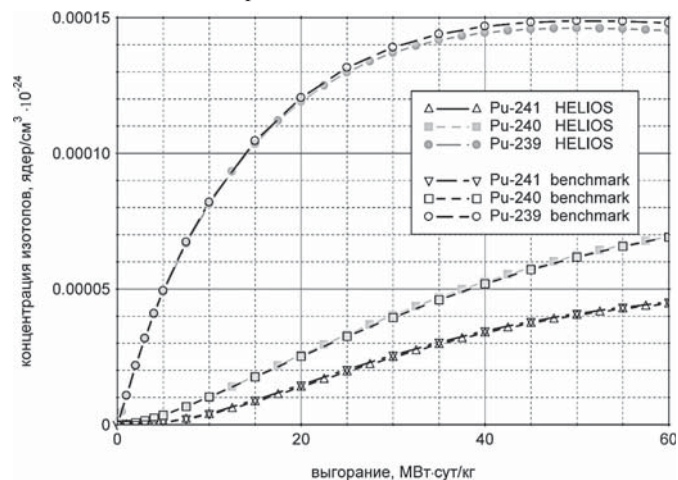


Рис. 11. Зависимость концентрации изотопов плутония от глубины выгорания топлива в ТВС

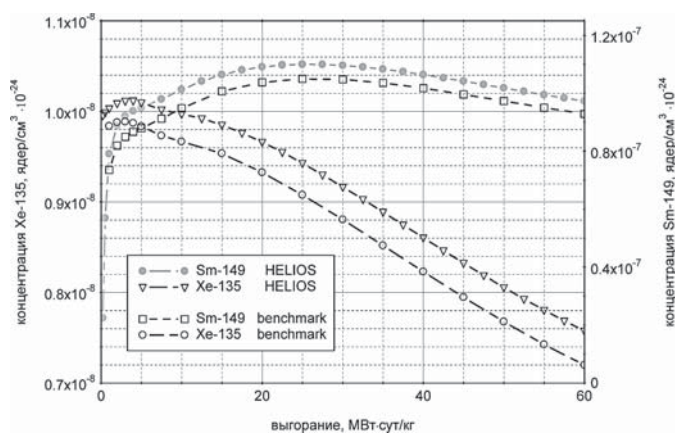


Рис. 13. Зависимость концентрации изотопов Xe¹³⁵ и Sm¹⁴⁹ от глубины выгорания топлива в ТВС

Результаты расчетов показывают хорошее согласие в распределении потвального энерговыделения (рис. 7, 8). Максимальное расхождение не превышает 1 % на всем интервале выгорания топлива. Для большинства моментов выгорания расхождение в определении энерговыделения твэлов находится в пределах 0,5 % (рис. 9).

Сравнение изотопного состава делящихся нуклидов, продуктов деления и выгорающих поглотителей. На рис. 10–13 приведены изменения концентрации делящихся элементов (U²³⁵, U²³⁸, Pu²³⁹, Pu²⁴⁰, Pu²⁴¹), продуктов деления (Xe¹³⁵ и Sm¹⁴⁹) и основных поглощающих изотопов выгорающего поглотителя (Gd¹⁵⁵ и Gd¹⁵⁷) в зависимости от глубины выгорания топлива в ТВС. Согласие между результатами HELIOS и данными бенчмарка довольно хорошее. Концентрация изотопов урана предсказывается с точностью не менее 1 % (рис. 14). Расхождения в расчете концентрации изотопа плутония (Pu²³⁹), который оказывает основное влияние на баланс нейтронов в системе, изменяются приблизительно в пределах от 1 % в начале выгорания до 2 % в конце выгорания (рис. 15). Для изотопов Pu²⁴⁰ и Pu²⁴¹

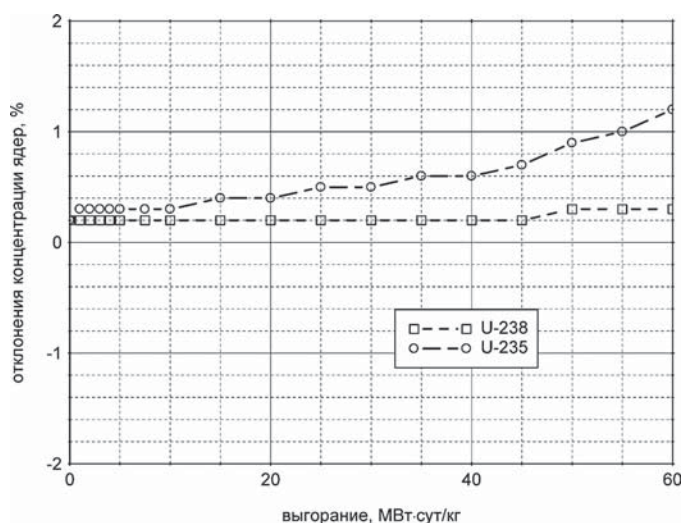


Рис. 14. Расхождения в определении концентрации изотопов урана между расчетом и бенчмарком

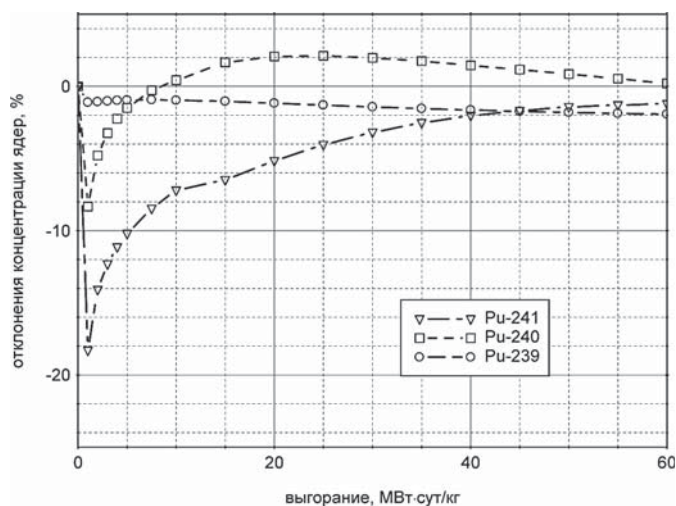


Рис. 15. Расхождения в определении концентрации изотопов плутония между расчетом и бенчмарком

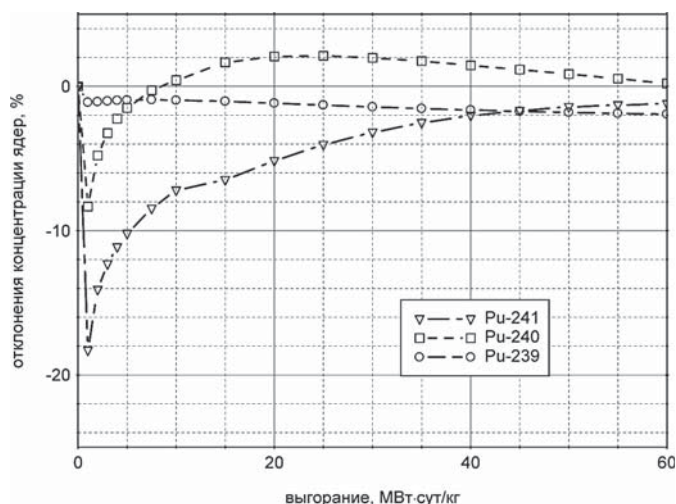


Рис. 16. Расхождения в определении концентрации изотопов выгорающего поглотителя и основных продуктов деления между расчетом и бенчмарком

при малых выгораниях, когда их концентрации еще низки, расхождения довольно высокие — до 8 и 18 %, соответственно. С увеличением выгорания погрешности уменьшаются и к концу выгорания достигают 1÷2 % (рис. 15).

Изменение концентрации основных поглощающих изотопов выгорающего поглотителя (Gd^{155} и Gd^{157}) программой HELIOS предсказывается удовлетворительно (рис. 12). В начале выгорания, когда их влияние на нейтронный баланс существенно, расхождения в определении концентраций находятся в пределах 3÷5 %. С увеличением глубины выгорания топлива их концентрация резко падает вследствие выгорания и в дальнейшем не оказывает существенного влияния на нейтронный баланс в системе. Для высоких выгораний расхождения в определении их концентраций находятся в пределах 10 % (рис. 16).

Для He^{135} — основного поглощающего элемента продуктов деления — форма кривых зависимости концентраций изотопа от выгорания, рассчитанного HELIOS, и бенчмарк-решение подобны (рис. 13). HELIOS переоценивает концентрацию He^{135} по сравнению с бенчмарк-решением на всем интервале выгорания. Для свежего топлива расхождение составляет около 2 %. С увеличением глубины выгорания топлива расхождения постепенно увеличиваются и достигают 5 % в конце выгорания (рис. 16). Аналогичные расхождения наблюдаются и для другого продукта деления — Sm^{149} , с той лишь разницей, что в начале выгорания расхождения достигают 8 %. Возможные причины получаемых расхождений связаны с различным определением расчетными программами абсолютного значения нейтронного потока.

Выводы

В результате выполнения данной работы разработана расчетная модель топливной кассеты реактора ВВЭР для программы HELIOS с целью проведения расчетов выгорания кассеты и подготовки мало групповых нейтронно-физических констант для физического расчета реактора. Для проверки правильности расчетной модели выполнены сравнительные расчеты бенчмарка, распространенного в рамках работы международной организации АЕР, занимающейся вопросами безопасной эксплуатации реакторов ВВЭР. Сравнение результатов расчета нейтронно-физических параметров, полученных программой HELIOS, с результатами бенчмарка показало хорошее согласие. Данная модель адекватно описывает поведение ТВС при выгорании топлива и может быть использована в расчетах для подготовки мало групповых нейтронно-физических констант для реакторных программ.

Список литературы

1. Proceedings of the tenth Symposium of AER, Moscow, Russia, 18–22 October, 2000.
2. WIMS, A modular scheme for neutronics calculations, User guide for version 8, ANSWERS WIMS (99)9, Winfrith, 1999.
3. HELIOS methods. Studsvik® Scandpower, Version 1.10, April 2008. — 192 p.
4. Stammier R. J. J., Abbate M. J. Methods of Steady-State Reactor Physics in Nuclear Design. London: Academic Press, 1983, 506 p.

Надійшла до редакції 22.12.2010.