

ВЛИЯНИЕ ТИПА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СЕТКИ НА РЕЗУЛЬТАТ РАСЧЕТА ПОЛЕЙ НЕЙТРОНОВ В ЗАЩИТАХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

О.В. Николаева*, С.А. Гайфулин*, Л.П. Басс*, Д.В. Дмитриев**,

А.А. Николаев***

* *Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН*

125047, Москва, Миусская пл., 4

** *АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»*

249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

*** *АО ОКБ «Гидропресс»*

142103, г. Подольск, ул. Орджоникидзе, 21



Рассмотрен вопрос о влиянии типа пространственной сетки на результат решения уравнения переноса нейтронов в защитах ядерно-энергетических установок (ЯЭУ).

Выполнены расчеты полей нейтронов в реалистической модели корпусного реактора на быстрых нейтронах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем с интегральной компоновкой оборудования. Используются структурированные кубические и неструктурированные гексаэдрические сетки (программы PMSNSYS и FRIGATE), неструктурированные тетраэдрические и призматические сетки (программа RADUGA T). Получены предельные при уменьшении размера ячейки средние по материальным зонам значения плотностей групповых потоков.

Показано, что результат расчета зависит не от типа ячейки сетки (куб, гексаэдр, тетраэдр, призма), а от типа аппроксимации криволинейных внутренних границ (границ между материалами). Использование «зубчатых» аппроксимаций для криволинейных границ приводит к увеличению площади границ, а также к возникновению на них условия преломления плотности потока нейтронов. Эти эффекты приводят к завышению решения уравнения переноса, причем во всех энергетических группах.

Вывод. При решении уравнения переноса нейтронов в защитах ЯЭУ сеточным методом необходимо использовать сетки, не приводящие к «зубчатым» аппроксимациям внутренних границ. Можно рекомендовать тетраэдрические или призматические сетки, сетки из произвольных гексаэдров, а также составные сетки, в которых внутри материальной зоны находятся ячейки-кубики, а вблизи границы зоны – ячейки-гексаэдры.

Ключевые слова: уравнение переноса, сетки, криволинейные границы.

ВВЕДЕНИЕ

При решении задачи о переносе нейтронов в активных зонах и защитах ядерно-энергетических установок (ЯЭУ) важен выбор пространственной сетки. В частности, грани-

© *О.В. Николаева, С.А. Гайфулин, Л.П. Басс, Д.В. Дмитриев, А.А. Николаев, 2022*

цы ячеек сетки должны максимально точно аппроксимировать границы материалов. Самые ранние программные пакеты предлагали выполнять расчеты в декартовой хуз-геометрии на ячейках-параллелепипедах. Для учета криволинейных границ были разработаны пакеты, позволяющие проводить расчеты в криволинейных $r\varphi z$ - и $r\theta\varphi$ -геометриях. Однако криволинейные геометрии не всегда позволяют адекватно описать все границы между материалами, и приходится проводить расчеты в декартовых хуз-координатах [1, 2]. В дальнейшем развитие этой группы пакетов шло путем распараллеливания вычислений [3 – 5] и усовершенствования сеточных схем и итерационных методов решения систем сеточных уравнений [6 – 8].

Использование в хуз-геометрии сетки из ячеек-параллелепипедов приводит к тому, что криволинейные, а также непараллельные координатным осям границы заменяются «зубчатыми» поверхностями (составленную из граней ячеек сетки поверхность будем называть «зубчатой», если угол между соседними гранями может быть больше 180° , см. рис. 1). Предлагается проводить расчеты на очень мелкой сетке (с размером ячейки ~ 2 см [9]), когда «зубчатая» граница геометрически близка к реальной.

Для лучшего качества аппроксимации сеткой границ материалов переходят к ячейкам-гексаэдрам [10]. Следующий шаг – использование неструктурированных сеток из тетраэдров и призм [12 – 18], а также сеток из произвольных гексаэдров [11]. В этом случае удастся точно задать все прямолинейные границы; криволинейные границы аппроксимируются «гранеными» поверхностями (составленную из граней ячеек сетки поверхность будем называть «граненой», если угол между соседними гранями не превышает 180° , см. рис. 1).

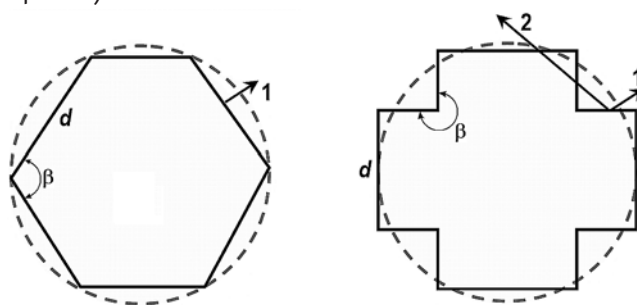


Рис. 1. Направления вылетающего и возвращающегося нейтронов для двух типов сеточных границ, где d – длина звена ломаной, аппроксимирующей окружность в поперечном сечении цилиндра; β – угол между звеньями ломаной; 1 – направление вылетающего нейтрона; 2 – направление вылетевшего, вернувшегося и снова вылетевшего нейтрона

Другой подход – использование структурированных сеток с ячейками-параллелепипедами с заданием в тех ячейках, через которые проходит граница материалов, дополнительных «составных» веществ. Сечения взаимодействия для каждого дополнительного вещества вычисляются как линейная комбинация сечений, попадающих в соответствующую ячейку материалов; коэффициенты линейной комбинации полагаются равными массовым долям каждого материала в ячейке (так называемый метод Volume Fraction). Известны зарубежный [19] и аналогичный отечественный [20] сеточные генераторы, реализующие такой подход. Возможности выполнения расчетов с дополнительными веществами включены во многие программы [3, 4, 6, 7]. Однако массовые доли материалов лишь приближенно равны требуемым коэффициентам линейной комбинации. Поэтому задача построения сетки, максимально точно задающей границы материалов, является актуальной.

Модели активных зон и защит ядерных реакторов, как правило, включают в себя многочисленные цилиндры. При использовании структурированных сеток из параллелепипедов цилиндры заменяются призмами с «зубчатыми» боковыми поверхностями. При использовании неструктурированных тетраэдрических или призматических сеток, сеток

из произвольных гексаэдров цилиндры заменяются призмами с «гранеными» поверхностями. Корректируя положение узлов сетки, можно добиться совпадения объемов «сеточного» и исходного цилиндра. Однако площадь поверхности «зубчатой» и «граненой» призм различна и отличается от площади поверхности исходного цилиндра. Кроме того, при использовании «зубчатой» сеточной границы имеет место такой эффект как возвращение вылетевшего нейтрона обратно в цилиндр (см. рис. 1). Актуальной является задача оценки влияния типа сетки на результат сеточного моделирования полей нейтронов в защитах ядерных реакторов.

ОПИСАНИЕ СЕТОЧНОЙ МОДЕЛИ

Для выполнения исследования была разработана модель корпусного реактора на быстрых нейтронах с интегральной компоновкой оборудования с теплоносителем свинец-висмут. Модель содержит активную зону (АЗ), теплоноситель (свинец-висмут), внутрикорпусные конструкции (теплоноситель, сталь), испаритель (теплоноситель, сталь, вода), бак водной защиты, а вся конструкция помещена в бетонный контейнер (рис. 2). Высота модели – 731 см, радиус – 400 см. Рассматривается только четвертая часть области с заданием условия отражения на плоскостях $x = 0$ и $y = 0$ (см. рис. 2). В АЗ задается постоянный источник.

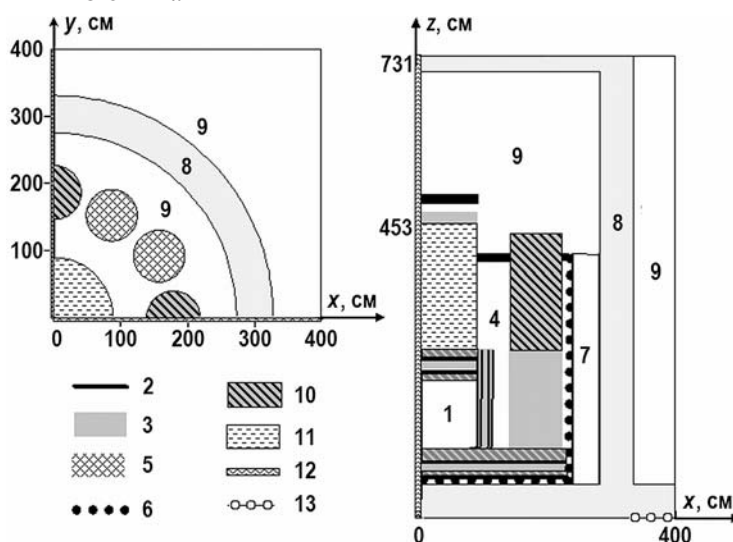


Рис. 2. Модель корпусного реактора на быстрых нейтронах (плоскости $z = 453$ и $y = 0$): 1 – АЗ; 2 – сталь; 3 – теплоноситель; 4 – внутрикорпусная защита; 5 – испаритель; 6 – газовый зазор; 7 – бак водной защиты; 8 – бетон; 9 – воздух; 10 – сталь и теплоноситель; 11 – карбид бора; 12 – условие отражения; 13 – область выдачи плотности потока (см. рис. 7)

Каждому материалу в модели отвечает один или несколько цилиндров или цилиндрических слоев с осями, параллельными оси z задачи (см. рис. 2). Используются следующие методы построения пространственных сеток.

1. По каждой переменной x, y, z вводится равномерная сетка с шагом r . В результате образуется регулярная сетка из ячеек-кубов с длиной ребра r . Тип такой сетки обозначим C .

2. Сетка из произвольных гексаэдров с верхними и нижними гранями, параллельными плоскости $z = 0$, строится программой REBEL-III [21]. Часть ячеек сетки соединена по своим поверхностям без стыкования по вершинам. Вдали от границ гексаэдры принимают форму кубов. Тип такой сетки обозначим H .

3. В плоскости x, y каждый круг заменяется правильным многоугольником с ребром длины d ; в результате каждый цилиндр заменяется граненой призмой. В этой области пакетом Salome (<https://www.salome-platform.org>) строится неструктурированная сетка.

раздрическая сетка со средним радиусом ячейки r (радиус ячейки – это радиус шара того же объема). Тип такой сетки обозначим Tf .

4. В плоскости xu каждый круг заменяется набором квадратов со стороной длины d ; в результате каждый цилиндр заменяется зубчатой призмой. Далее в полученной области пакетом Salome строится неструктурированная тетраэдрическая сетка со средним радиусом ячейки r . Тип такой сетки обозначим Ts .

5. В плоскости xu пакетом Salome строится неструктурированная треугольная сетка со средней длиной ребра ячейки r . По высоте z вводится сетка с шагом r . В результате образуется неструктурированная сетка из треугольных призм. Тип такой сетки обозначим P .

Таблица 1

Используемые пространственные сетки

| Тип сетки | Тип ячейки | Тип сеточной границы, аппроксимирующей цилиндрическую поверхность |
|-----------|--------------------|---|
| C | Куб | Зубчатая |
| H | Гексаэдр | Граненая |
| Tf | Тетраэдр | Граненая |
| Ts | Тетраэдр | Зубчатая |
| P | Треугольная призма | Граненая |

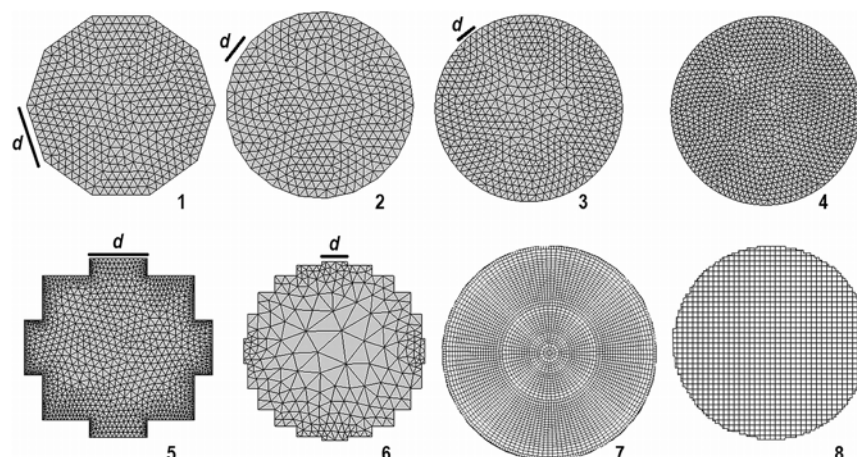


Рис. 3. Сеточные аппроксимации поперечного сечения испарителя: 1 – Tf , $d = 25$; 2 – Tf , $d = 12.5$; 3 – Tf , $d = 6.25$; 4 – P , $d = 3$; 5 – Ts , $d = 25$; 6 – Ts , $d = 12.5$; 7 – H , $d = 1.6$; 8 – C , $d = 1$

Каждая сетка (табл. 1) характеризуется средним радиусом (шагом) ячейки r и длиной звена d ломаной, аппроксимирующей окружность в поперечном сечении цилиндра (рис. 3). Для сеток типа Tf , Ts параметр d задается априори. Для сеток типа P величина d определяется как средняя длина тех ребер сетки, которые в плоскости xu образуют границу испарителя. Для остальных типов сеток полагаем $d = r$.

Сеточные аппроксимации поперечного сечения испарителя приведены на рис. 3. Сетки типа Tf , P , H формируют «граненые» аппроксимации для боковых поверхностей цилиндров. Сетки типа Ts , C образуют «зубчатые» аппроксимации. Узлы сеток подбираются таким образом, чтобы объемы «сеточных» цилиндров были равны объемам исходных цилиндров. Метод VolumeFraction [19, 20] для поддержания баланса масс здесь не используется.

При моделировании будем использовать равномерную сетку Карлсона S_{12} [22]

и константы ENDF/B-VI.8 (30 групп нейтронов, энергетический интервал (10^{-4} эВ, 17 МэВ)) [23].

Расчеты на кубических сетках типа *C* выполняются по программе PMSNSYS [10] по алмазной DDO схеме с коррекцией решения на положительность. Для расчетов на гексаэдрических сетках типа *H* используется программа FRIGATE [11] с DDL-схемами с коррекцией решения на положительность. Для расчета на неструктурированных сетках типа *Tf*, *Ts* и *P* используется программа РАДУГА Т [18] с методом конечных элементов. Расчеты по программе PMSNSYS выполнялись на СуперЭВМ АО «ОКБ «Гидропресс», расчеты по программе FRIGATE – на многоядерной персональной ЭВМ, расчеты по программе РАДУГА Т – на гибридном суперкомпьютере К60, установленном в Суперкомпьютерном центре коллективного пользования ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Находятся плотности групповых потоков нейтронов и вычисляются их средние значения в каждой из материальных зон.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Сначала выполняются расчеты на сетках разных типов с все уменьшающимся радиусом (шагом для структурированных сеток) ячейки *r*. Сетки типа *Tf* и *P* используются при значениях радиуса 4.7, 3.5, 2.4, 1.7, 1.5, 1.2 см. Сетки типа *C* используются с шагами 2 и 1 см. Полученные в расчетах значения Ψ средней по испарителю (см. рис. 2) плотности потока нейтронов первой группы даны на рис. 4. Сходимость величин Ψ при сгущении сетки достигается при значении радиуса (шага) ячейки $r \approx 1.5$ см. Полученное при сгущении каждой сетки значение Ψ не зависит от типа используемой сеточной схемы.

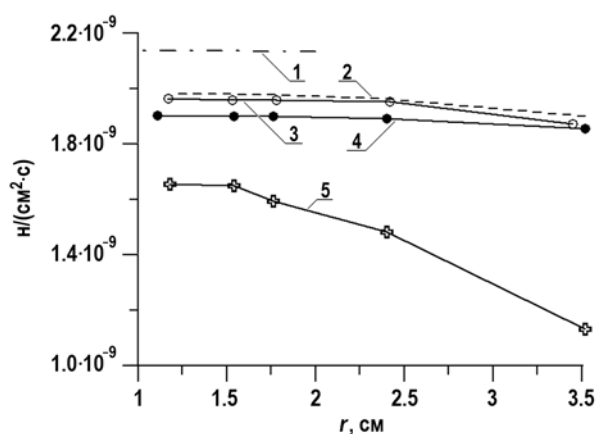


Рис. 4. Средние плотности потока нейтронов первой группы в испарителе, полученные при сгущении сеток разных типов: 1 – сетки *C*; 2 – сетки *P*; 3 – сетки *Tf* при $d = 6.25$ см; 4 – *Tf* при $d = 12.5$ см; 5 – *Tf* при $d = 25$ см

Однако для каждого типа сетки при уменьшении радиуса (шага) ячейки *r* величины Ψ сходятся к разным значениям (см. рис. 4). Предельные значения Ψ для сеток типа *Tf* зависят от длины звена *d* ломаной, аппроксимирующей окружность в поперечном сечении цилиндра (см. рис. 3). При уменьшении длины звена *d* предельные значения, полученные на сетках типа *Tf*, сближаются с предельным значением, полученным на сетках типа *P*. Это значение, однако, не совпадает с предельным значением, полученным на сетках типа *C*.

На рисунке 5 представлены предельные значения Ψ , полученные с разными сетками при радиусе (шаге) ячейки $r \approx 1,5$ см. Можно видеть, что предельное значение зависит не от типа ячейки, а от того, как аппроксимируются цилиндрические границы материалов, «зубчатыми» или «гранеными» поверхностями.

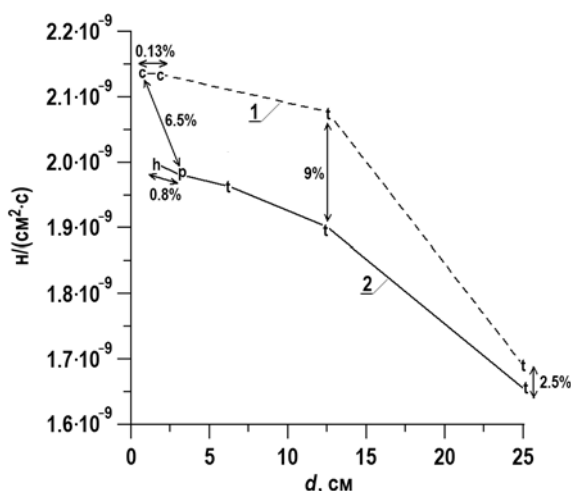


Рис. 5. Средние плотности потока нейтронов первой группы в испарителе, полученные на сетках с разными типами ячеек: 1 – «зубчатые» аппроксимации границ (сетки типа C , Ts); 2 – «граненые» аппроксимации границ (сетки типа Tf , P , H). Обозначения типов ячеек: c – кубы; t – тетраэдры; p – треугольные призмы; h – гексаэдры

Найдем предельные средние значения плотностей потока $\langle \Psi \rangle$ для разных материальных зон во всех энергетических группах. Выполним расчеты на сетках типа C («зубчатые» границы, $r = 2$ см, 12 млн. ячеек) и типа P («граненые» границы, $r = 1.7$ см, 4 млн. ячеек). Отметим, что при переходе от структурированных сеток типа C к неструктурированным сеткам типа P число ячеек сильно снижается. Расчеты занимают достаточно много времени (на сетке типа P – 76 часов на 672 ядрах суперкомпьютера К60 ИПМ им. М.В.Келдыша РАН).

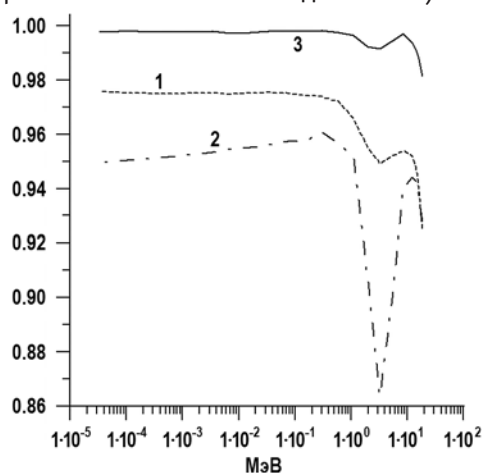


Рис. 6. Отношение многогрупповых плотностей потока нейтронов, полученных на сетке с «гранеными» границами, к плотностям потока, полученным на сетке с «зубчатыми» границами: 1 – испаритель; 2 – бак водной защиты; 3 – бетон

На рисунке 6 представлены отношения величин $\langle \Psi \rangle$, полученных на сетке типа P , к величинам, полученным на сетке типа C . Отношения представлены только для тех материальных зон, где они отличаются от единицы более чем на 0,01. Можно видеть, что влияние типа сетки сохраняется во всех энергетических группах, хотя и не во всей области. Кроме того, можно видеть, что плотности потока, полученные на сетке с «зубчатыми» аппроксимациями, завышены по сравнению с плотностями, полученными на сетке с «гранеными» аппроксимациями.

Причину этого помогает понять схема на рис. 1. Если сечения взаимодействия вне

цилиндра много меньше, чем в цилиндре, то нейтрон, вылетевший из цилиндра через один зубец границы, может вернуться в цилиндр через соседний зубец. Фактически «зубчатая» граница формирует условие преломления плотности потока.

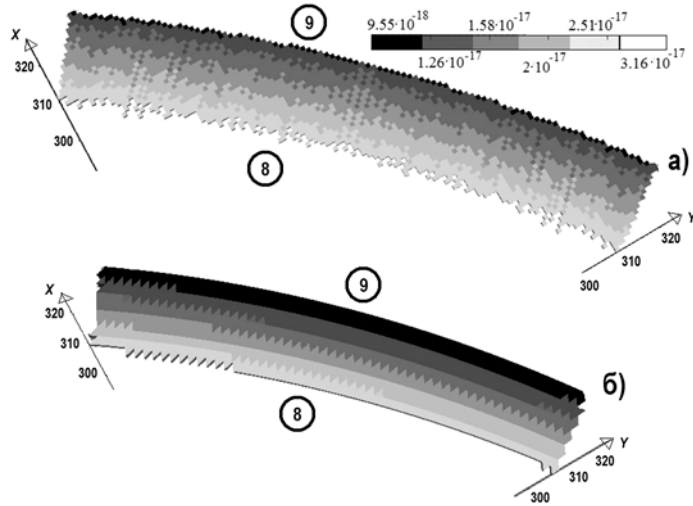


Рис. 7. Плотности потока в первой группе на нижней границе ($z = 0$) бетонного контейнера (9 – воздух; 8 – бетон): а) – сетка типа C ; б) – сетка типа Tf (логарифмический масштаб)

На рисунке 7 представлены плотности потока в первой группе на части нижней плоскости ($z = 0$) бетонного контейнера; выбранная часть плоскости отделена от внешней границы слоем воздуха (см. рис. 2). Плотность потока, полученная с «зубчатыми» аппроксимациями границ, вблизи внешней границы завышена по сравнению с плотностью потока, полученной с «гранеными» аппроксимациями (см. рис. 7). В результате отношение плотностей потока (см. рис. б) меньше единицы.

Завышение плотности потока неравномерно по области. Бак водной защиты расположен вплотную к бетонному контейнеру, и вернувшиеся нейтроны быстро достигают бака. Испаритель расположен в глубине области, но его верхняя часть находится в воздушной полости (см. рис. 2). Нейтроны, прошедшие бетонный контейнер, сразу же попадают в эту часть испарителя. Верхняя и нижняя границы контейнера параллельны плоскости $z = 0$. «Лишние» нейтроны входят в контейнер только через «зубчатую» границу, аппроксимирующую поверхность $r = 400$ см. Поэтому значительное завышение плотности потока вблизи границы $r = 400$ см (см. рис. 7) приводит к небольшому завышению среднего по контейнеру значения.

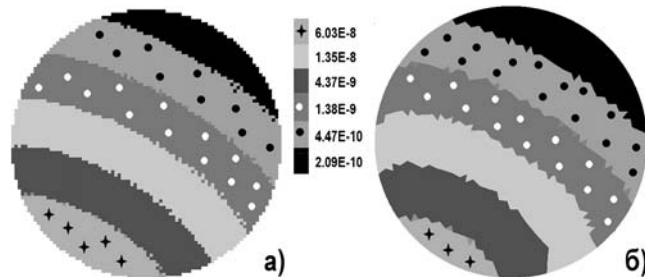


Рис. 8. Плотности потока в первой группе на нижней границе испарителя: а) – сетка типа C ; б) – сетка типа Tf (логарифмический масштаб)

С другой стороны, поверхность с «зубчатой» границей имеет большую площадь, чем с «граненой». Нижняя часть испарителя расположена вблизи источника. Через «зубча-

тую» границу внутрь испарителя попадает больше нейтронов, чем через «граненую» (рис. 8). Это еще один фактор завышения плотности потока при расчете с «зубчатыми» аппроксимациями границ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен вопрос о влиянии типа пространственной сетки на результат решения сеточным методом многогруппового уравнения переноса нейтронов в защитах ЯЭУ. Исследование выполнено на реалистической модели корпусного реактора на быстрых нейтронах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем с интегральной компоновкой оборудования. Использовались структурированные сетки с кубическими ячейками и неструктурированные сетки с ячейками-гексаэдрами, тетраэдрами и треугольными призмами.

Использование кубических сеток порождает «зубчатые» аппроксимации криволинейных внутренних (между материалами) границ. С другой стороны, «зубчатые» аппроксимации строятся для самих границ, а потом в полученной области строятся тетраэдрические сетки. Построение тетраэдрических, призматических и гексаэдрических сеток в исходной области приводит к «граненым» аппроксимациям криволинейных границ. Выполняется коррекция узлов сеток так, что суммарный объем ячеек, отвечающих каждому материалу, равен объему этого материала в исходной модели.

Находятся средние по материальным зонам значения плотностей групповых потоков. Оказывается, что значения полученных величин зависят не от типа ячеек сетки (куб, тетраэдр, призма, гексаэдр), а от типа аппроксимации гранями ячеек этой сетки криволинейных границ («зубчатой» или «граненой»).

«Зубчатые» аппроксимации границ формируют на них условия преломления; эти условия приводят к перераспределению плотности потока между зонами. Условие преломления на границе бетонный контейнер-воздух (фактически внешней границе области) приводит к тому, что часть нейтронов, вылетевших из области, возвращается в нее.

Кроме того, площади «зубчатых» границ больше, чем «граненых». «Зубчатые» аппроксимации увеличивают поверхность входа в соседние зоны вылетевших из АЗ нейтронов.

В результате наблюдается завышение плотностей потоков во всех энергетических группах. Это завышение максимально на периферии (может достигать 10%). Причем эта величина найдена для интегральных (средних по материальным зонам) значений плотностей потока. Завышение для локальных значений может оказаться больше.

Таким образом, при решении сеточным методом уравнения переноса важно использовать такие сетки, которые не приводят к «зубчатым» аппроксимациям криволинейных границ. Можно рекомендовать тетраэдрические, призматические сетки. Можно также использовать составные сетки, в которых внутри материальной зоны находятся ячейки-кубики, а вблизи границы зоны – ячейки-гексаэдры (как используемая в работе сетка типа *H*).

Литература

1. *Alcouffe R.E.* Three dimensional transport benchmark exercise using THREEDANT. / Proc. of Meeting on Three-Dimensional Neutron Transport Benchmarks 22-23 October 1990, Los Alamos, New Mexico. Электронный ресурс: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/031/22031958.pdf?r=1 (дата доступа 10.06.2022).
2. *Azmy Y.Y.* The three-dimensional, discrete ordinates neutral particle transport code TORT: An overview. / Proc. of OECD/NEA meeting on 3D Deterministic Radiation Transport Computer Programs, Feature, Applications and Perspectives 2-3 December 1996. – Paris, France. Электронный ресурс: <https://www.researchgate.net/publication/255255411> (дата доступа 10.06.2022).
3. *Dahl J.A.* PARTISN Results for the OECD/NEA 3-D Extension C5G7MOX Benchmark. //

Progress in Nuclear Energy. – 2006. – Vol. 48. – PP. 401-409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2006.01.003>.

4. *Humbert P.* Results for the C5G7 3-D Extension benchmark using the discrete ordinates code PANDA. // Progress in Nuclear Energy. – 2006. – Vol. 48. – PP. 394-400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2006.01.009>.

5. *Corau T., Sjoden G.* 3D neutron transport and HPC: a PWR full core calculation using PENTRAN SN code and IBM BLUEGENE/P computers. // Progress in Nuclear Science and Technology. – 2011. – Vol. 2. – PP. 628-633. DOI: <https://doi.org/10.15669/pnst.2.628>.

6. CNCSN 2009: One, two- and three-dimensional coupled neutral and charged particle discrete ordinates parallel multi-threaded code system. // RSICC code package CCC-726. 2009.

7. *Royston K.E., Johnson S.R., Evans T.M., Mosher S.W., Naish J., Kosand B.* JET Contributors. Application of the Denovo discrete ordinates radiation transport code to large-scale fusion neutronics. // Fusion Science and Technology. – 2018. – Vol. 74(4). – PP. 303-314. DOI: <https://doi.org/10.1080/15361055.2018.1504508>.

8. *Moryakov A.V.* LUCKY_TD code for solving the time-dependent transport equation with the use of parallel computations. // Physics of Atomic Nuclei. – 2017. – Vol. 79(8). – PP. 1242-1245; DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778816080159>.

9. *Ковалишин А.А., Моряков А.В., Раскач К.Ф.* Нейтронно-физический расчет быстрого реактора с применением современных вычислительных комплексов. // Атомная энергия. – 2018. – Т. 124 (2). – С. 63-68. Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2134> (дата доступа 10.06.2022).

10. Программа для ПЭВМ. Расчёт нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов. «PMSNSYS». 8624607.00622. ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2011.

11. *Nikolaev A.A.* Generalization of Two-Dimensional DDL Schemes of the GQ Method for Three-Dimensional Arbitrary Hexahedral Spatial Mesh. // Physics of Atomic Nuclei. – 2016. – Vol. 79 (8). – PP. 1261-1266. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778816080160>.

12. *Hoagland D.S., Yessayan R.A., Azmy Y.Y.* Solution of the neutron transport equation on unstructured grids using the parallel block Jacobi-integral transport matrix method via the novel Green's function ITMM construction algorithm on massively parallel computer systems. // Nuclear Science and Engineering. – 2021. – Vol. 195(10). – PP. 1036-1064. DOI: <https://doi.org/10.1080/00295639.2021.1898309>.

13. *Vassiliev O.N., Wareing T.A., Davis I.M., McGhee J., Barnett D., Horton J.L., Gifford K., Failla G., Titt U., Mourtada F.* Feasibility of a multigroup deterministic solution method for 3D radiotherapy dose calculations. // International Journal of Radiation Oncology Biology Physics. – 2008. – Vol. 72(1). – PP. 220-227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2008.04.057>.

14. *Аристова Е.Н., Астафуров Г.О.* Метод коротких характеристик второго порядка для решения уравнения переноса на сетке из тетраэдров. // Математическое моделирование. – 2016. – Т. 8. – № 7. – С. 20-30. Электронный ресурс: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26604113> (дата доступа XX.XX.2022).

15. *Chen Y., Zhang B., Zhang L., Zheng J., Zheng Y., Liu C.* ARES: A parallel discrete ordinates transport code for radiation shielding applications and reactor physics analysis. // Hindawi Science and Technology of Nuclear Installations. – 2017. – Article ID 2596727. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/2596727>.

16. *Kim J.W., Lee Y.O.* A deep penetration problem calculation using AETIUS: an easy modeling discrete ordinates transport code using unstructured tetrahedral mesh, shared memory parallel. // EPJ Web of Conferences. – 2017. – Vol. 153. – PP. 06025. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201715306025>.

17. *Белоусов В.И., Грушин Н.А., Сычугова Е.П., Селезнев Е.Ф.* Некоторые результаты верификации кода ОДЕТТА для неоднородных задач. // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2018. – Вып. 3. – С. 46-53.

18. *Николаева О.В., Гайфулин С.А., Басс Л.П.* Программный комплекс РАДУГА-Т для моделирования полей нейтронов в ядерно-энергетических установках. // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2021. – Т. 10. – № 1. – С. 75-89. DOI: <https://doi.org/10.14529/cmse210106>.

19. Orsi R. A general method of conserving mass in complex geometry simulations on mesh grids and its implementation in BOT3P5.0. // Nuclear Science and Engineering. – 2006. – Vol. 154(2). – PP. 247-259. DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE06-A2631>.

20. Гуревич М.И., Руссков А.А., Волощенко А.М. ConDat 1.0 – программа преобразования исходных данных из комбинаторной геометрии в растровую с использованием алгоритма трейсинга (tracing). Инструкция для пользователя. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2007. – № 12. Электронный ресурс: https://keldysh.ru/papers/2007/prep12/prep2007_12.html (дата доступа 10.06.2022).

21. Дедуль А.В., Николаев А.А. «REBEL» – программа пре- и постпроцессинга расчетов нейтронно-физических характеристик реакторов на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем. // Тяжелое машиностроение. – 2014. – № 8. – С. 39-45.

21. Carlson B.G. A method of characteristics and other improvements in solutions methods for the transport equations. // Nuclear Science Engineering. – 1976. – Vol. 61. – PP. 408-425. DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE76-A26927>.

22. Воронков А.В., Сеница В.В., Дедуль А.В., Кальченко В.В. Библиотеки многогрупповых констант пакета РЕАКТОР-ГП. // ВАИТ. Серия: Ядерные константы. – 2009. – Вып. 24. – С. 100-110.

Поступила в редакцию 14.06.2022 г.

Авторы

Николаева Ольга Васильевна, с.н.с.,

E-mail: nika@kiam.ru

Гайфулин Сергей Андреевич, н.с.

E-mail: sagapb@yandex.ru

Басс Леонид Петрович, с.н.с.

E-mail: bass@kiam.ru

Дмитриев Денис Витальевич, м.н.с.

E-mail: dvdmitriev@ippe.ru

Николаев Александр Александрович, зам. нач. отдела

E-mail: nikolaev_aa@grpess.podolsk.ru

UDC 519.6

INFLUENCE OF THE SPATIAL GRID TYPE ON THE RESULT OF CALCULATING THE NEUTRON FIELDS IN THE NUCLEAR POWER PLANT SHIELDING

Nikolaeva O.V.*, Gaifulin S.A.*, Bass L.P.*, Dmitriev D.V.**, Nikolaev A.A.***

* Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences

4, Miusskaya sq, 125047 Moscow, Russia

** IPPE JSC

1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

*** OKB Hidropress JSC

21 Ordzhonikidze Str., 142103 Podolsk, Russia

ABSTRACT

Purpose. The paper considers the influence of the spatial grid type on the result of solving the equation of neutron transport in the nuclear power plant (NPP) shielding.

Method. Neutron fields have been calculated in a realistic model of a liquid metal cooled fast neutron tank reactor with an integral equipment layout. Structured cubic and unstructured hexahedral grids (PMSNSYS and FRIGATE codes) and unstructured tetrahedral and prismatic grids (RADUGA T code) are used. Limiting values of the group fluxes averaged

over the material zones for refined grids have been obtained.

Results. It has been shown that the calculation results depend on the type of approximation of the curvilinear inner boundaries between the material zones rather than on the grid cell type (cube, hexahedron, tetrahedron, prism). Using «toothed» approximations for curvilinear boundaries leads to an increase in the area of the boundaries, as well as to the neutron flux refraction condition arising on them. These effects lead to an overestimation of the transport equation solution, and also in all energy groups.

Conclusion. When solving an equation of neutron transport in the NPP shielding by a grid method, it is necessary to use grids other than leading to «toothed» approximations of the inner boundaries. Tetrahedral or prismatic grids, or grids of arbitrary hexahedrons can be recommended, as well as composite grids in which cubic cells are located inside the material zone, and hexahedron cells are located near the zone boundary.

Key words: transport equation, grids, curvilinear boundaries.

REFERENCES

1. Alcouffe R.E. Three Dimensional Transport Benchmark Exercise Using THREEDANT. *Proc. of Meeting on Three-Dimensional Neutron Transport Benchmarks*. Los Alamos, New Mexico. 1990. Available at: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/031/22031958.pdf?r=1 (accessed Jun. 10, 2022).
2. Azmy Y. Y. The Three-Dimensional, Discrete Ordinates Neutral Particle Transport Code TORT: an Overview. *Proc. of OECD/NEA Meeting on 3D Deterministic Radiation Transport Computer Programs, Feature, Applications and Perspectives*. Paris, France. 1996. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/255255411> (accessed Jun. 10, 2022).
3. Dahl J.A. PARTISN Results for the OECD/NEA 3-D Extension C5G7MOX Benchmark. *Progress in Nuclear Energy*. 2006, v. 48, pp. 401-409; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2006.01.003>.
4. Humbert P. Results for the C5G7 3-D Extension Benchmark Using the discrete Ordinated Code PANDA. *Progress in Nuclear Energy*. 2006, v. 48, pp. 394-400; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2006.01.009>.
5. Corau T., Sjoden G. 3D Neutron Transport and HPC: A PWR Full Core Calculation Using PENTRAN SN Code and IBM BLUEGENE/P Computers. *Progress in Nuclear Science and Technology*. 2011, v. 2, pp. 628-633; DOI: <https://doi.org/10.15669/pnst.2.628>.
6. CNCNS. One, Two- and Three-Dimensional Coupled Neutral and Charged Particle Discrete Ordinates Parallel Multi-Threaded Code System. *RSICC code package CCC-726*. 2009.
7. Royston K.E., Johnson S.R., Evans T.M., Mosher S.W., Naish J., Kosand B. JET Contributors. Application of the Denovo Discrete Ordinates Radiation Transport Code to Large-Scale Fusion Neutronics. *Fusion Science and Technology*. 2018, v. 74 (4), pp. 303-314; DOI: <https://doi.org/10.1080/15361055.2018.1504508>.
8. Moryakov A.V. LUCKY_TD Code for Solving the Time-Dependent Transport Equation with the Use of Parallel Computations. *Physics of Atomic Nuclei*. 2017, v. 79 (8), pp. 1242-1245; DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778816080159>.
9. Kovalishin A.A., Moryakov A.V, Raskach K.F. Neutronics Calculation of Fast Reactor Using Modern Computing Systems. *Atomic Energy*. 2018, v. 124 (2), pp. 75-81; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-018-0378-5>.
10. PC Software. Calculation of Neutronic Characteristics of Nuclear Reactors. «PMSNSYS». 8624607.00622. OKB «GIDROPRESS», 2011 (in Russian).
11. Nikolaev A.A. Generalization of Two-Dimensional DDL Schemes of the GQ Method for Three-Dimensional Arbitrary Hexahedral Spatial Mesh. *Physics of Atomic Nuclei*. 2016, v. 79 (8), pp. 1261-1266; DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778816080160>.
12. Hoagland D.S., Yessayan R.A., Azmy Y.Y. Solution of the Neutron Transport Equation on Unstructured Grids Using the Parallel Block Jacobi-Integral Transport Matrix Method via the Novel Green's Function ITMM Construction Algorithm on Massively Parallel Computer Systems. *Nuclear Science and Engineering*. 2021, v. 195, pp. 1036-1064; DOI: <https://doi.org/10.1080/00295639.2021.1898309>.
13. Vassiliev O.N., Wareing T.A., Davis I.M., McGhee J., Barnett D., Horton J.L., Gifford K.,

Failla G., Titt U., Mourtada F. Feasibility of a multigroup deterministic solution method for 3D radiotherapy dose calculations. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*. 2008, v. 72 (1), pp. 220-227; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2008.04.057>.

14. Aristova E.N., Astafurov G.O. The Second Order Short Characteristics Method for the Solution of the Transport Equation on Tetrahedral Grid. *Mathematical Models and Computer Simulation*. 2017, v. 9, pp. 40-47; DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048217010045>.

15. Chen Y., Zhang B., Zhang L., Zheng J., Zheng Y., Liu C. ARES: A Parallel Discrete Ordinates Transport Code for Radiation Shielding Applications and Reactor Physics Analysis. *Hindawi Science and Technology of Nuclear Installations*. 2017. Article ID 2596727; DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/2596727>.

16. Kim J.W., Lee Y.O. A Deep Penetration Problem Calculation Using AETIUS: an Easy Modeling Discrete Ordinates Transport Code Using Unstructured Tetrahedral Mesh, Shared Memory Parallel. *EPJ Web of Conferences*. 2017, v. 153, pp. 06025; DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201715306025>.

17. Belousov V.I., Grushin N.A., Sychugova E.P., Seleznev E.F. Some Results of Verification of Code ODETTA for Shielding Calculations. *VANT. Ser. Fizika Yadernykh Reactorov*. 2018, iss. 3, pp. 46-53 (in Russian).

18. Nikolaeva O.V., Gaifulin S.A., Bass L.P. Code RADUGA T for Simulating Neutrons Fluxes in Nuclear Power Stations. *Vestnik YuUrGU. Ser. Vychislitel'naya Matematika i Informatika*. 2021. v. 10 (1), pp. 75-89 (in Russian); DOI: <https://doi.org/10.14529/cmse210106>.

19. Orsi R. A General Method of Conserving Mass in Complex Geometry Simulations on Mesh Grids and its Implementation in BOT3P5.0. *Nuclear Science and Engineering*. 2006, v. 154 (2), pp. 247-259; DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE06-A2631>.

20. Gurevich M.I., Russkov A.A., Voloschenko A.M. ConDat 1.0 – Code for Converting by the Tracing Algorithm the Combinatorial Geometry Presentation to the Bit-Mapped One. *Users Guide*. Preprint No 12. Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences Publ., 2007. Available at: https://keldysh.ru/papers/2007/rep12/rep2007_12.html (accessed Jun. 10, 2022) (in Russian).

21. Dedul A.V., Nikolaev A.A. REBEL – Software of Pre and Post Processing Calculations of the Neutronic Performances of Reactor on High-Velocity Neutrons with Lead Bismuthic Heat Carrier. *Tyazhyoloe Mashinostroenie*. 2014, v. 8, pp. 39-45 (in Russian).

22. Carlson B.G. A Method of Characteristics and Other Improvements in Solutions Methods for the Transport Equations. *Nuclear Science and Engineering*. 1976, v. 61, pp. 408-425; DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE76-A26927>.

23. Voronkov A.V., Sinitsa V.V., Dedul A.V., Kalchenko V.V. Libraries of Multigroup Constants for Code REACTOR-GP. *VANT. Ser. Yadernye Konstanty*. 2009, iss. 24, pp. 100-110 (in Russian).

Authors

Nikolaeva Olga Vasilievna, Senior Researcher

E-mail: nika@kiam.ru

Gaifulin Sergey Andreevich, Researcher

E-mail: sagapb@yandex.ru

Bass Leonid Petrovich, Senior Researcher

E-mail: bass@kiam.ru

Dmitriev Denis Vitalievich, Junior Researcher

E-mail: dvdmitriev@ippe.ru

Nikolaev Alexandr Aleksandrovich, Deputy Chief of Department

E-mail: nikolaev_aa@grpress.podolsk.ru