

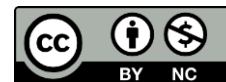
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-05>

УДК 621.039.52

EDN HAJGGN

Оригинальная статья / Original paper



Метод поверхностных моментов – новый способ решения уравнения переноса нейтронов с детальным описанием углового распределения

А.А. Семенов , А.М. Субботин 
АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация
 yadfizik@yandex.ru


Аннотация. Целью данной работы является разработка подхода, позволяющего проводить расчеты переходных процессов в ядерных реакторах с сильными неоднородностями. В настоящее время ведется разработка реакторных установок для атомных станций малой мощности, которые будут применяться для обеспечения потребителей в труднодоступных регионах электроэнергией и теплом, развития удаленных промышленных кластеров и территорий, изолированных от централизованных энергосистем, и освоения месторождений полезных ископаемых, требующих стабильного и чистого источника энергии. Перспективные реакторные установки характеризуются сложными конструкциями ТВС и всей активной зоны из-за наличия дополнительных органов регулирования и новых систем компенсации избыточной реактивности. В работе исследуется новый метод проведения нейтронно-физических расчетов – метод поверхностных моментов. Анализ угловых распределений направлений движения нейтронов показал, что данный метод перспективен для расчетов систем с сильными неоднородностями. Ключевым отличием разрабатываемого метода поверхностных моментов является отдельное описание угловых зависимостей для двух направлений (по обе стороны от грани) в виде непрерывных функций. Изложены теоретические основы метода поверхностных моментов. Проведена оценка точности для модельных задач по сравнению с методом Монте-Карло. Максимальная погрешность расчета относительных скоростей реакции деления методом поверхностных моментов в представленных задачах составила 0,6%. Это более чем на порядок ниже, чем максимальная погрешность диффузионного приближения. Таким образом, показана возможность достижения высокой точности в пределах долей процента и подтверждена эффективность расчетов активных зон с сильными неоднородностями. Представленные результаты дают основание полагать, что метод поверхностных моментов может быть полезен для расчетов ВВЭР-С и реакторных установок АСММ.

Ключевые слова: перенос нейтронов, кинетическое уравнение Больцмана, крупносеточные методы, OpenMC, разрывные базисные функции.

Для цитирования: Семенов А.А., Субботин А.М.. Метод поверхностных моментов – новый способ решения уравнения переноса нейтронов с детальным описанием углового распределения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(2):49-56. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-05>

For citation: Semenov A.A., Subbotin A.M. The surface moments method: a new approach to solve the neutron transport equation with a detailed description of angular distribution. *Nuclear Safety*. 2026;16(2):49-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-05>

The surface moments method: a new approach to solve the neutron transport equation with a detailed description of angular distribution

Andrey A. Semenov , Aleksandr M. Subbotin 
JSC «VNIIAES», Moscow, Russian Federation
 yadfizik@yandex.ru

Abstract. The objective of this work is to develop an approach to analyze transients in nuclear reactors with strong heterogeneities. Currently, reactor plants for small modular reactors (SMRs) are being developed to provide consumers in remote regions with electricity and heat, foster the growth of isolated industrial clusters and territories, and facilitate the development of mineral deposits that require a stable and clean energy source. Advanced reactor designs feature complex configurations of fuel assemblies and cores due to additional control rods and new systems for excess reactivity compensation. This paper investigates a new approach called the surface moments method. The analysis of neutron angular distributions demonstrated that this method holds promise for analyzing systems with strong heterogeneities. The key difference of the surface moments method is a separate description of angular dependencies for two directions (on both sides of the interface) in the form of continuous functions. The theoretical foundations of the surface moments method are outlined. Its accuracy is evaluated against Monte Carlo simulations using model problems. The maximum error in calculating relative fission rates with the surface moments method for the presented problems was 0.6%. This is more than an order of magnitude lower than the maximum error of the diffusion approximation. Thus, the results demonstrate the feasibility of achieving high accuracy within a fraction of a percent and confirm the efficiency of analyzing cores with strong heterogeneities. The presented results give grounds to believe that the surface moments method can be useful for calculations of VVER-S and SMR.

Keywords: neutron transport, Boltzmann transport equation, coarse-mesh methods, OpenMC, discontinuous basis functions

Введение

В настоящее время ведется разработка реакторных установок для атомных станций малой мощности, которые будут применяться для обеспечения потребителей в труднодоступных регионах электроэнергией и теплом, развития удаленных промышленных кластеров и территорий, изолированных от централизованных энергосистем, и освоения месторождений полезных ископаемых, требующих стабильного и чистого источника энергии.

Особенности, связанные с условиями эксплуатации таких энергоблоков, приводят к значительному усложнению конструкций ТВС и всей активной зоны из-за наличия дополнительных органов регулирования и новых систем компенсации избыточной реактивности.

Современными методами для проведения нейтронно-физических расчетов реакторных установок являются: диффузионное приближение, метод Монте-Карло, P_n -методы, метод вероятностей первых столкновений (ВПС). Целью данной работы является разработка подхода, позволяющего проводить расчеты переходных процессов в ядерных реакторах с сильными неоднородностями. Метод ВПС предназначен для расчетов ячеек в стационарном состоянии. Метод Монте-Карло позволяет проводить детерминистические расчеты, но требует значительных временных затрат. Поэтому обычно для таких задач используются P_n -методы, однако

известно, что на границах сред с резким изменением потока нейтронов могут возникать осцилляции (эффект Гиббса). Одним из способов пространственной дискретизации является метод матриц отклика, в котором угловая зависимость потока нейтронов на гранях ячейки описывается разложением по сферическим функциям. Ключевым отличием разрабатываемого метода поверхностных моментов является отдельное описание угловых зависимостей для двух направлений (по обе стороны от грани) в виде непрерывных функций.

Основное внимание в этой работе будет уделено полям энерговыделения, поскольку для решения большей части нейтронно-физических задач, связанных с реакторными установками, необходимо рассчитывать именно их.

Одной из основных сложностей, возникающих при подготовке сечений для основанных на групповом диффузионном приближении программных кодов (SKETCH-N [1], БИПР-8 [2]), является вычисление коэффициентов диффузии ячеек [3]. Более того, изменение коэффициентов диффузии отражателя приводит к значительным изменениям результатов расчета полей энерговыделения в активной зоне, поэтому иногда возникает необходимость вносить дополнительные поправки. При этом известно, что отклонения полей энерговыделения, вычисленных в двухгрупповом диффузионном приближении, от референсных значений мо-

гут составлять порядка 5% [1].

Особенности представления углового распределения потока нейтронов

В настоящее время для описания угловой зависимости потока нейтронов используется разложение по сферическим функциям различного порядка, например, в диффузионном приближении – до 1 порядка, в методе поверхностных гармоник (МПГ) [4] – до 2 и более высоких. В данной работе проведена оценка того, насколько хорошо такое приближение воспроизводит угловые распределения направлений движения нейтронов в областях сильных неоднородностей свойств активной зоны. Также предложен новый метод для проведения расчетов, напрямую учитывающий наличие разрывов в угловом распределении потока нейтронов.

Для получения угловых распределений направлений движения нейтронов на гранях моделировалась система с сильной неоднородностью, вызванной сильным поглотителем.

Геометрия задачи, изображенная на рисунке 1, представляет собой активную зону толщиной $h = 100$ см, состоящую из 10 бесконечных пластин толщиной $dh = h/10$ каждая. Плоскости, являющиеся гранями пластин, пронумерованы от 0 до 10, а сами пластины (ячейки) – от 1 до 10. За пределами активной зоны находится вакуум. В 5 ячейку помещен материал с карбидом бора, представляющий собой гомогенную смесь B_4C , H_2O и UO_2 с обогащением 2,4%, материальный состав приведен в таблице 1. Материальный состав остальных пластин описан в таблице 2, это тоже гомогенная смесь.

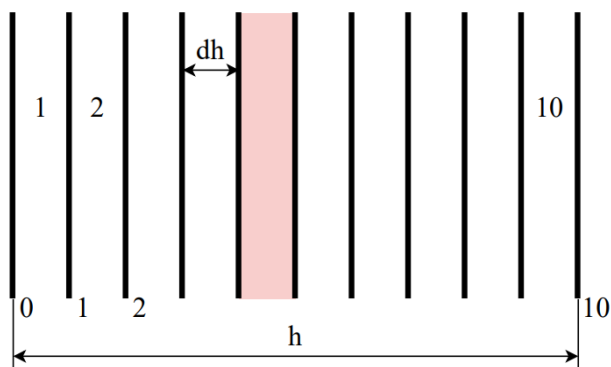


Рисунок 1. Геометрия задачи с поглотителем
Figure 1. Problem geometry with the absorber

Таблица 1. Материальный состав поглощающей пластины

Table 1. Material composition of the absorber plate

Материал	ρ , г/см ³	Объемная доля в смеси
H_2O	0,72	0,5
UO_2 (2,4%)	10,3	0,45
B_4C	2,52	0,05

Таблица 2. Материальный состав топливных пластин

Table 2. Material composition of fuel plates

Материал	ρ , г/см ³	Объемная доля в смеси
H_2O	0,72	0,5
UO_2 (2,4%)	10,3	0,5

Угловое распределение потока нейтронов на гранях

Используя метод Монте-Карло, реализованный в OpenMC, можно получить детальное угловое распределение направлений движения нейтронов. Наша идея заключалась в том, чтобы отдельно описать нейтроны, летящие в одну сторону от грани ячейки и в другую.

Для изучения углового распределения потока нейтронов, пересекающих грани пластин, использовался программный код OpenMC, а именно модуль для регистрации `openmc.MuSurfaceFilter`¹, позволяющий собирать статистику распределения нейтронов в зависимости от косинуса угла между направлением движения нейтрона и нормалью к поверхности в точке пересечения ее данным нейтроном.

Для решения этой задачи в OpenMC была создана расчетная модель, полностью соответствующая всем геометрическим и материальным характеристикам, перечисленным в предыдущем разделе.

Однако этого оказалось недостаточно, поскольку для получения необходимых угловых зависимостей потребовалось модернизировать OpenMC, т.е. внести изменения в исходный код модуля `openmc.MuSurfaceFilter`. Фрагмент данного кода с выделенными синим цветом изменениями представлен на рисунке 2.

¹ `openmc.MuSurfaceFilter` — OpenMC Documentation. — Available at: <https://docs.openmc.org/en/stable/pythonapi/generated/openmc.MuSurfaceFilter.html> (accessed: 16.01.2026).

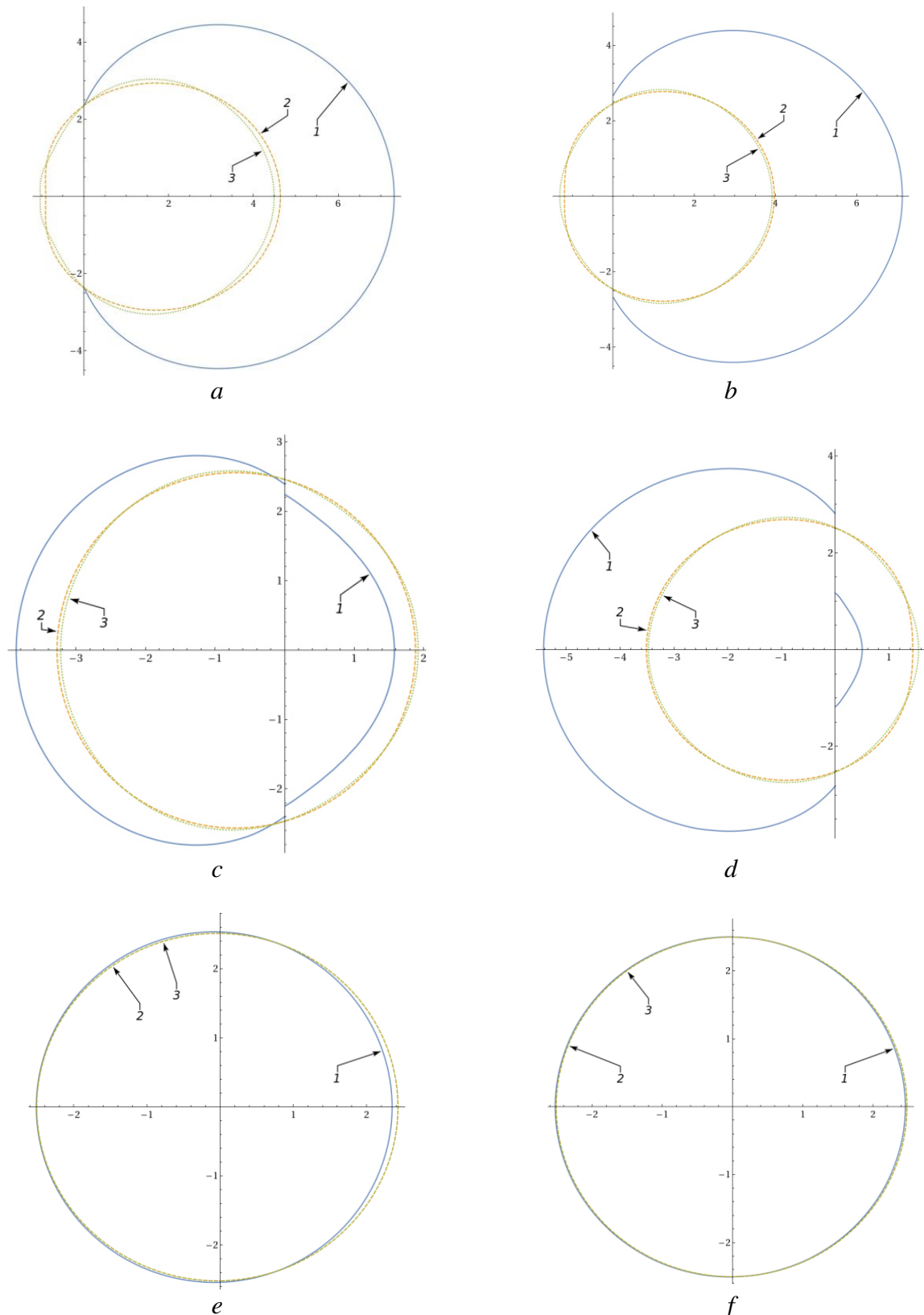


Рисунок 3. Угловое распределение направлений движения нейтронов в полярной системе координат (1 – МПМ, 2 – сумма сферических функций до 2 порядка, 3 – сумма сферических функций до 5 порядка): *a* – грань 10, быстрая группа; *b* – грань 10, тепловая группа; *c* – грань 5, быстрая группа; *d* – грань 5, тепловая группа; *e* – грань 7, быстрая группа; *f* – грань 7, тепловая группа

Figure 3. Neutron angular distributions in polar coordinates (1 – SMM, 2 – sum of spherical harmonics up to order 2, 3 – sum of spherical harmonics up to order 5): *a* – face 10, fast group; *b* – face 10, thermal group; *c* – face 5, fast group; *d* – face 5, thermal group; *e* – face 7, fast group; *f* – face 7, thermal group

Таким образом, было заблокировано изменение направления нормали к пересекаемой нейтроном поверхности, связанное со свойствами самого нейтрона, т.е. теперь нормаль к поверхности остается неизменной. Это изменение позволило получить распределение по косинусам углов между направлением движения нейтрона и нормалью к пересекаемой поверхности по обе стороны от данной поверхности.

Для получения распределения в виде линейной комбинации сферических функций применялся модуль `openmc.SphericalHarmonicsFilter`², позволяющий собирать моменты сферических функций до заданного порядка по направлениям движения нейтронов.

```
void MuSurfaceFilter::get_all_bins(
    const Particle& p, TallyEstimator estimator, FilterMatch& match) const
{
    // Get surface normal (and make sure it is a unit vector)
    const auto surf {model::surfaces[p.surface_index()].get()};
    auto n = surf->normal(p.r());
    n /= n.norm();

    // Determine whether normal should be pointing in or out
    // if (p.surface() < 0) //
    //     n *= -1;

    // Determine cosine of angle between normal and particle direction
    double mu = p.u().dot(n);
    if (std::abs(mu) > 1.0)
        mu = std::copysign(1.0, mu);

    // Find matching bin
    if (mu >= bins_.front() && mu <= bins_.back()) {
```

Рисунок 2. Фрагмент исходного кода модуля `openmc.MuSurfaceFilter`

Figure 2. Source code snippet of the `openmc.MuSurfaceFilter` module

На рисунке 3 изображены результаты моделирования в двух энергетических группах. Они представляют собой графики со сравнением угловых распределений потоков нейтронов на разных гранях.

Первый способ – отдельное описание для двух направлений (по обе стороны от грани) в виде непрерывных функций. Такой способ описания углового распределения планируется использовать в методе поверхностных моментов (МППМ).

Второй способ – разложение по сфериче-

ским функциям, приведены результаты до 5 порядка. Такое описание используется в диффузионном приближении, МППГ и P_n -методах.

Из графиков e, f видно, что оба подхода дают одинаковые физически адекватные результаты. Однако остальные графики показывают, что при наличии неоднородности угловые распределения существенно отличаются. Даже повышение порядка используемых сферических функций не позволяет добиться лучшего совпадения результатов.

Метод поверхностных моментов

Исследуемый способ описания распределения потока нейтронов в активной зоне заключается в использовании связи втекающих – вытекающих моментов потоков нейтронов.

Уравнения связи втекающих – вытекающих моментов потоков нейтронов имеют вид (1) и проиллюстрированы рисунком 4.

$$\begin{aligned} \vec{\varphi}_{i,l} &= R \cdot \vec{\varphi}_{i,r} + T \cdot \vec{\varphi}_{i+1,l}, \\ \vec{\varphi}_{i,r} &= R \cdot \vec{\varphi}_{i,l} + T \cdot \vec{\varphi}_{i-1,r}, \end{aligned} \quad (1)$$

где R – матрица отражения нейтронов;

T – матрица прохождения нейтронов через ячейку.

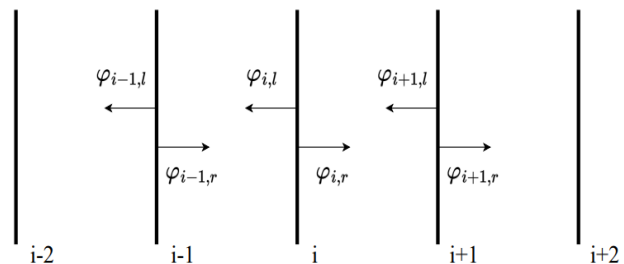


Рисунок 4. Моменты потоков нейтронов
Figure 4. Neutron flux moments

С учетом угловых распределений и энергетических групп момент потока нейтронов можно описать выражением (2):

$$\varphi_{i,d,h,g} = \int_{\Omega} F_h(\Omega) \Phi_{i,d}^g(\Omega) d\Omega, \quad (2)$$

где i – номер грани;

d – направление движения нейтронов;

h – номер угловой гармоники;

g – номер энергетической группы.

² `openmc.SphericalHarmonicsFilter` — OpenMC Documentation. – Available at: <https://docs.openmc.org/en/stable/pythonapi/generated/openmc.SphericalHarmonicsFilter.html> (accessed: 16.01.2026).

Задача на собственные значения определяется следующим образом, формула (3):

$$\hat{L}\varphi = \lambda \hat{dL}\varphi. \quad (3)$$

Левую часть выражения (3) можно переписать в виде выражений (4):

$$\begin{aligned} \vec{\varphi}_{i,l} - R \cdot \vec{\varphi}_{i,r} - T \cdot \vec{\varphi}_{i+1,l}, \\ \vec{\varphi}_{i,r} - R \cdot \vec{\varphi}_{i,l} - T \cdot \vec{\varphi}_{i-1,r}. \end{aligned} \quad (4)$$

А правую – в виде выражений (5):

$$\begin{aligned} \lambda (-dR \cdot \vec{\varphi}_{i,r} - dT \cdot \vec{\varphi}_{i+1,l}), \\ \lambda (-dR \cdot \vec{\varphi}_{i,l} - dT \cdot \vec{\varphi}_{i-1,r}), \end{aligned} \quad (5)$$

где dR – матрица отклонений элементов матрицы отражения нейтронов при изменении размножающих свойств ячейки,

dT – матрица отклонений элементов матрицы прохождения нейтронов через ячейку при изменении размножающих свойств ячейки.

Пары из выражений (4) и (5) должны быть записаны для всех граней.

В качестве искомого нейтронно-физического функционала в задачах на собственные значения в данной работе рассматривается интегральная скорость реакции деления в ячейке. Через моменты потоков нейтронов для i -й ячейки она вычисляется по формуле (6):

$$R_f^i = \sum_{h=1}^H \sum_{g=1}^2 f_{h,g} (\varphi_{i-1,r,h,g} + \varphi_{i,l,h,g}), \quad (6)$$

где $f_{h,g}$ – элемент вектора коэффициентов чувствительности данного функционала к моментам потоков нейтронов;

H – количество угловых гармоник.

Для сравнения результатов, полученных разными методами, интегральные скорости реакции деления в ячейках нормируются на средние значения по формуле (7):

$$R_{f,n}^i = \frac{R_f^i}{R_f}. \quad (7)$$

Матрицы R , T , dR , dT и вектор \vec{f} являются данными, необходимыми для решения задачи. Их подготовка реализуется решением задачи с источником методом Монте-Карло в одной ячейке рассматриваемого реактора, в данном случае – пластины. Источ-

ник задается на одной из граней ячейки, граничные условия – «черное» тело. На всех гранях ячейки регистрируются моменты потоков нейтронов, вылетающих из ячейки, которые можно описать формулой (2). Такой расчет проводится для различных вариантов задаваемого источника, варьируются энергетические группы и угловые распределения.

Затем полученные данные собираются в матрицы моментов потоков нейтронов, вылетающих через разные грани. После этого с помощью метода линейной регрессии, реализованного в пакете `scikit-learn` языка Python, готовятся матрицы преобразования источника нейтронов в выходные моменты потоков нейтронов, то есть матрица отражения нейтронов R , и матрица прохождения нейтронов через ячейку T . Аналогичным образом происходит подготовка матриц преобразования с возмущением размножающих свойств ячейки, затем вычисляются отклонения элементов и составляются матрицы dR и dT .

Также во время расчета задачи с источником набирается статистика по необходимому нейтронно-физическому функционалу, а затем из нее составляется вектор коэффициентов чувствительности данного функционала к моментам потоков нейтронов \vec{f} .

Для рассматриваемой задачи расчеты матриц R , T , dR , dT и вектора \vec{f} методом Монте-Карло занимают порядка 5 секунд. Решение системы уравнений – около 10 миллисекунд.

Для практических инженерных расчетов планируется заранее подготавливать матрицы как функции от свойств ячеек. Они будут использоваться в крупносеточном программном коде в связке с теплофизическим модулем. В начале на основе теплофизического расчета определяются матрицы, после этого в результате решения матричной задачи вычисляются поля энерговыделения и другие необходимые функционалы.

Оценка точности расчета скорости деления

В качестве референсных решений используются результаты расчетов активных зон в программе OpenMC. Кроме этого, результаты решений методом поверхностных мо-

ментов сравниваются с численными решениями двухгрупповых уравнений диффузии. Диффузионная задача решалась методом конечных элементов на мелкой сетке.

Рассматриваются две задачи, их геометрия изображена на рисунке 1. В первой задаче все ячейки заполнены материалом из таблицы 2, а вторая задача была описана выше.

График скоростей реакции деления, рассчитанных тремя разными методами, представлен на рисунке 5, а на рисунке 6 изображены отклонения двух решений от референсного.

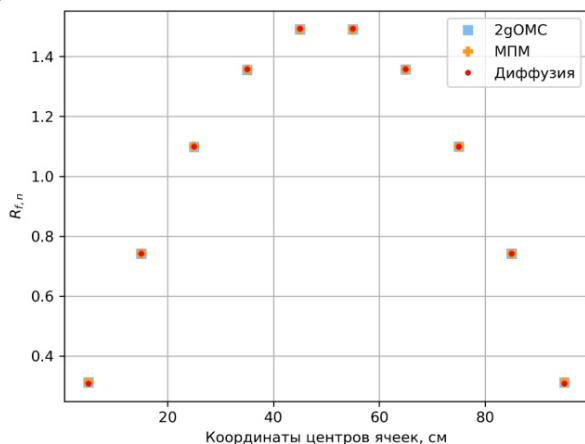


Рисунок 5. Относительные скорости реакции деления в ячейках (задача 1)

Figure 5. Relative fission rates in cells (problem 1)

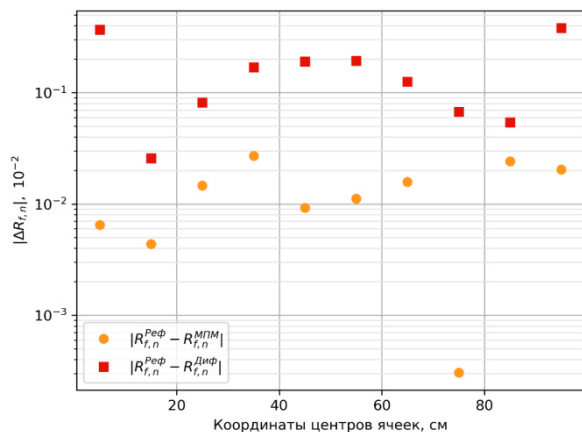


Рисунок 6. Отклонения значений $R_{f,n}$ от референсного решения (задача 1)

Figure 6. Deviations of $R_{f,n}$ values from the reference solution (problem 1)

Можно заметить, что отклонения метода поверхностных моментов на порядок ниже, чем диффузионного приближения.

После этого решалась задача с сильным поглотителем. Результаты приведены на рисунках 7 и 8.

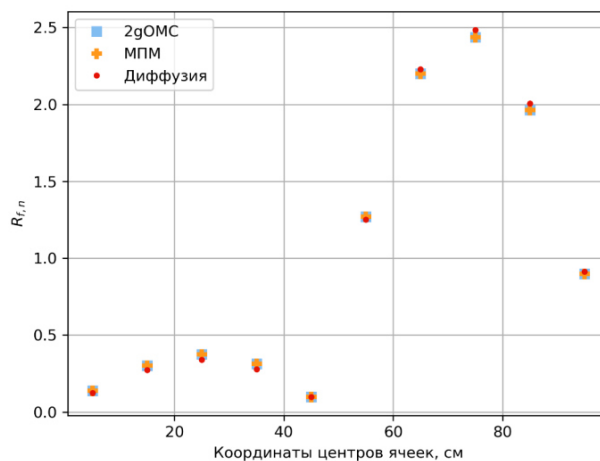


Рисунок 7. Относительные скорости реакции деления в ячейках (задача 2)

Figure 7. Relative fission rates in cells (problem 2)

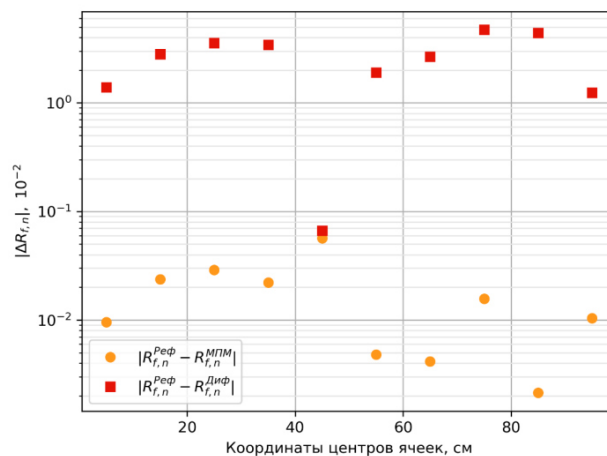


Рисунок 8. Отклонения значений $R_{f,n}$ от референсного решения (задача 2)

Figure 8. Deviations of $R_{f,n}$ values from the reference solution (problem 2)

Результаты показали, что даже внесение сильной неоднородности в активную зону не повлияло на величины отклонений метода поверхностных моментов.

Заключение

Предлагаемый подход позволяет значительно повысить точность воспроизведения скоростей реакции деления в ячейках по сравнению с диффузионным приближением и P_n -приближением. Рассмотренные в работе задачи с сильными поглотителями дают основание полагать, что метод поверхностных моментов может быть полезен для расчетов ВВЭР-С и реакторных установок АСММ.

Полученные результаты демонстрируют возможность достижения точности расчета относительных скоростей реакции деления

в пределах долей процента, поскольку максимальная погрешность в представленных в работе задачах составила 0,6 %.

Основным требованием, необходимым для применения метода поверхностных моментов, является возможность представления расчетной модели в виде ячеечной структуры с плоскими гранями, например, пластин или различных призм. Именно

такой геометрией характеризуется большая часть современных реакторных установок.

Дальнейшие исследования будут направлены на проведение трехмерных расчетов тестовых задач и бенчмарков, создание полноценного нейтронно-физического модуля и его последующую интеграцию в программные коды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ojinnaka C.A.S., Zimin V.G., Strashnykh V.P., Nikonov S.P. Analysis of the Kalinin-3 coolant transient benchmark by SKETCH-N/SKAZKA code system. *Annals of Nuclear Energy*. 2020;147:107716. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107716>

2. Лизоркин М.П. Двухгрупповое редкосеточное нодальное уравнение баланса нейтронов программы БИПР-8. *Атомная энергия*. 2008;105(1):8-17. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2406> (дата обращения: 14.01.2026).

Lizorkin M.P. Two-group sparse-grid nodal neutron balance equation of the BIPR-8 computer program. *Atomic Energy*. 2008;105(1):8-17. <https://doi.org/10.1007/s10512-008-9059-0>

3. Плеханов Р.В., Лысов Д.А. Коэффициенты диффузии для конечно-разностных схем расчетов РБМК. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов*. 2016;(3):48-52. Режим доступа: <https://nrcki.ru/files/pdf/1478857983.pdf> (дата обращения: 14.01.2026).

Plekhanov R.V., Lysov D.A. Diffusion coefficients for finite-difference RBMK calculation schemes. *Issues of atomic science and technology. Ser. Nuclear reactor physics*. 2016;(3):48-52. (In Russ.). Available at: <https://nrcki.ru/files/pdf/1478857983.pdf> (accessed: 14.01.2026).

4. Ельшин А.В. Получение конечно-разностных уравнений для ценности нейтронов в гетерогенном реакторе методом поверхностных гармоник. *Атомная энергия*. 2005;98(5):323-332. <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3253>

El'shin A.V. Surface-Harmonics Derivation of the Finite-Difference Equations for the Neutron Value in a Heterogeneous Reactor. *Atomic Energy*. 2005;98(5):307-314. <https://doi.org/10.1007/s10512-005-0210-x>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Семенов А.А. – концептуализация методологии исследования, формулировка теоретических положений, общее руководство написанием и редактированием статьи;

Субботин А.М. – разработка методологии исследования, формирование плана исследовательских мероприятий, производство расчетов в рамках исследования, написание статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Semenov A.A. – conceptualisation of the research methodology, formulation of theoretical principles, overall supervision of the writing process and editing of the article;

Subbotin A.M. – developing a research methodology, drawing up a research plan, carrying out calculations as part of the research, and writing the article.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

FUNDING:

The authors declare no external funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Семенов Андрей Артемьевич, главный эксперт АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0002-5495-3662>
e-mail: dozaand@mail.ru

Субботин Александр Максимович, инженер АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация. e-mail: yadfizik@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Andrey A. Semenov, Chief Expert, JSC «VNIIAES», Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-5495-3662>
e-mail: dozaand@mail.ru

Aleksandr M. Subbotin, Engineer, JSC «VNIIAES», Moscow, Russian Federation. e-mail: yadfizik@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 19.01.2026
После доработки / Revision 25.04.2026
Принята к публикации / Accepted 28.04.2026