

## РАСЧЕТ ВЫГОРАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ С СИЛЬНЫМ ПОГЛОЩЕНИЕМ МЕТОДОМ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ПЕРВЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ

**Т.Ю. Карпушкин**

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва*



Представлена методика восстановления матриц вероятностей первых столкновений нейтронов (ВПС) в процессе выгорания через средние хорды, рассчитанные для нескольких состояний с помощью построения стохастических траекторий нейтронов. Представлен расчет бесконечного коэффициента размножения ТВС ледокольного реактора в процессе выгорания материалов с помощью данной методики и приведено сравнение с расчетами по другим методикам и программам.

**Ключевые слова:** вероятность, хорда, нейтрон, выгорание.

**Key words:** probability, chord, neutron, burnout.

Решение задач изменения изотопного состава в процессе выгорания наиболее успешно реализуется для простых геометрий элементарных ячеек, когда для расчета пространственного распределения нейтронов можно использовать относительно простые и быстрые методы решения транспортной задачи. Например, поле нейтронов в многослойной цилиндрической, плоской или сферической геометрии можно оценить с помощью аналитических формул расчета вероятностей первых столкновений. Однако для расчета вероятностей первых столкновений в более сложных областях необходимо использовать численные методы, что сопряжено с большими вычислительными затратами. Трудности возникают при расчете сильных выгорающих поглотителей, например, гадолиния. Плотность потока нейтронов в таких материалах быстро уменьшается от поверхности внутрь поглотителя. Необходимо разбивать поглотитель на тонкие слои для отслеживания изменения изотопного состава в них. Из-за большого поглощения ядерная концентрация изотопов меняется быстро, и необходимо проводить вычисления с мелким временным шагом.

Качественный расчет геометрически сложных систем с сильными выгорающими поглотителями можно получить, используя метод Монте-Карло, но для этого метода требуется много временных затрат. Для систем с сильными выгорающими поглотителями расчеты Монте-Карло надо выполнять с очень хорошей статистикой, чтобы статистическая погрешность расчета была много меньше изменения

размножающих свойств, обусловленных изменением ядерных концентраций изотопов в процессе выгорания на небольшом временном шаге.

Избежать больших временных затрат при вычислении матриц ВПС помогла бы методика некоего приближенного вычисления этих матриц, которая существенно сократила бы время их вычисления даже для сложных геометрий без значимой потери в точности.

С этой целью разрабатывается метод вычисления матриц ВПС на основе средних хорд, которые вычислены предварительно для одного или нескольких реперных состояний построением стохастических траекторий нейтронов и отслеживанием длин хорд в зонах от точки рождения до точки первого столкновения нейтрона. Следует отметить, что существует несколько способов точного расчета вероятностей первых столкновений на основе регистрации хорд в зонах в процессе построения луча траектории нейтрона [1]. Все они, так или иначе, используют значение длины хорды в пройденной зоне и соответствующее этой зоне полное макроскопическое сечение для вычисления отдельного вклада в вероятность первого столкновения. Однако для изменившихся сечений материалов требуется повторный расчет всех последовательностей таких вкладов, в связи с чем в сложных геометриях необходимы большие временные затраты. В рассматриваемом методе делается попытка уйти от расчета вероятностей с помощью отдельных длин участков пересечения луча с геометрическими зонами, заменив отдельные участки средними хордами, проходимыми нейтроном в различных зонах до его первого столкновения (рис. 1). При таком способе расчета предполагается падение точности вычисления матриц вероятностей при все большем отличии новых полных сечений системы от исходных значений, однако существенным моментом является однократность расчета средних хорд и быстрота восстановления вероятностей на их основе. Для больших времен выгорания или для систем с сильными поглотителями предполагается повторный пересчет реперных матриц ВПС и средних хорд через определенные временные интервалы.

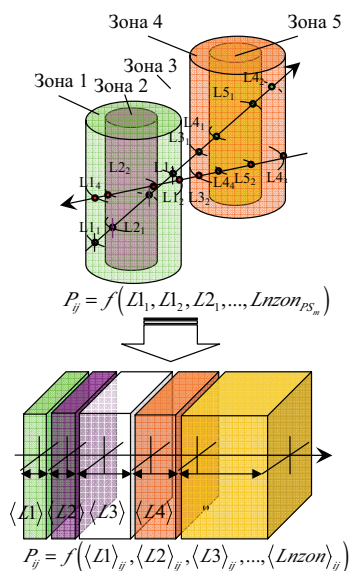


Рис. 1. Переход в вычислении вероятности от последовательности хорд (в системе цилиндров) к средним хордам до первого столкновения (система слоев)

Реперные матрицы вероятностей рассчитываются статистическим способом моделированием пробега нейтрона от рождения до точки первого столкновения. Для каждой регистрационной зоны равновероятно по ее объему разыгрываются точка старта нейтрона и направление вылета. Движение нейтронов вдоль этого направления продолжается до тех пор, пока случайно не реализуется акт столкновения. Во время полета нейтрон может столкнуться и в той зоне, где он родился, а может пролететь и несколько регистрационных зон до первого столкновения. Число стартов  $NS_i$  из зоны  $i$  суммируется, суммируется и число столкновений  $NC_{ij}$  в зоне  $j$  нейтронов, стартовавших из зоны  $i$ . Вероятность  $P_{ij}$  определяется как отношение числа столкновений  $NC_{ij}$  нейтронов в зоне  $j$ , пришедших из зоны  $i$ , к полному числу стартов  $NS_i$  из зоны  $i$ :  $P_{ij} = NC_{ij} / NS_i$ .

Одновременно с регистрацией столкновений регистрируются хорды в последовательно проходимых при движении нейтрона зонах.

Длина хорды  $l_{ijm}^k$  – это путь в зоне номер  $m$  при  $k$ -ом пересечении нейтрона, родившегося в зоне  $i$  и испытавшего первое столкновение в зоне  $j$ . Тогда средний путь или средняя хорда, пройденная нейтроном в зоне  $m$ ,

$$L_{ijm} = \sum_{k=1}^{PS_m} l_{ijm}^k / PS_m, \quad (1)$$

где  $PS_m$  – число случаев пересечения зоны  $m$  нейтроном, родившимся в зоне  $i$  и испытавшим первое столкновение в зоне  $j$ .

Построение стохастических траекторий производится в сеточной модели геометрии на плоскости [2], т.е. вся расчетная область покрывается очень мелкой квадратной пространственной сеткой, и все элементы, входящие в состав расчетной области (таблетка твэла, оболочка, газовый зазор между твэлом и оболочкой и прочие элементы конструкции), проецируются на эту мелкую пространственную сетку. Каждому элементу сетки приписывается номер материала, соответствующего элементу ячейки. Аналогия такого разбиения – представление картинки на экране дисплея. Для более быстрого построения нейтронной траектории элементы полученной сетки объединяются в более обширные квадратные области. Совместное использование регулярной и нерегулярной сеток позволяет применять единый быстрый алгоритм построения стохастической траектории, не зависящий от сложности задаваемой геометрии. В этом случае расчет вероятностей для конкретного состояния кассеты частотным способом с хорошей статистикой производится за вполне приемлемое время. Однако это время составляет 1,5–3 часа для персонального компьютера, что годится для расчета единичного состояния, но не подходит для расчета выгорания, когда зачастую вычисления приходится вести с временным шагом в пять суток на протяжении трехлетней кампании, и количество пересчетов матриц ВПС достигает нескольких сотен. Именно с целью сокращения времени расчета выгорания была предложена методика приближенного восстановления матриц ВПС через средние хорды.

Можно предположить, что для нейтрона, родившегося в зоне  $i$  и испытавшего первое столкновение в зоне  $j$ , вероятность испытать это столкновение есть

$$P_{ij} = A_{ij} \left[ \exp \left( - \sum_{m \neq j}^N \Sigma_t^m L_{ijm} \right) \left[ 1 - \exp(-\Sigma_t^j L_{ijj}) \right] + \left[ 1 - \exp(-\Sigma_t^i L_{III_{ijj}}) \right] \right], \quad (2)$$

где  $\Sigma_t^m$  – полное сечение в зоне  $m$ ;  $L_{ijm}$  – средняя хорда (1), пройденная нейтроном в зоне  $m$  при рождении в зоне  $i$  и столкновении в зоне  $j$ ;  $\Sigma_t^j$  – полное сечение в зоне  $j$ ;  $L_{ijj}$  – средняя хорда, пройденная нейтроном в зоне  $j$  при рождении в зоне  $i$  и столкновении в зоне  $j$ ;  $L_{III_{ijj}}$  – средняя хорда, пройденная нейтроном в зоне  $j$  при рождении в зоне  $j$  и столкновении в зоне  $j$  без прохождения других зон;  $A_{ij}$  – нормировочный коэффициент, который рассчитывается из условия равенства вероятностей  $P_{ij}$ , определенных по формуле (2), и прямым частотным расчетом. Эти коэффициенты запоминаются после первого расчета и используются для расчета вероятностей при изменившихся полных сечениях.

В основе данного способа расчета вероятностей лежит следующее простое предположение. При прохождении нейтрона сквозь вещество вероятность пройти слой толщиной  $L_1$  с полным сечением среды  $\Sigma_1$  без столкновений есть  $\exp(-\Sigma_1 L_1)$ . Далее, вероятность столкновения в слое  $L_2$ , следующим за слоем  $L_1$  и имеющим сечение  $\Sigma_2$ , есть  $\exp(-\Sigma_1 L_1) [1 - \exp(-\Sigma_2 L_2)]$ . Следовательно, чтобы применить данную схему для расчета вероятностей первых столкновений для сложной геометрии, нужно иметь в наличии средние хорды до первого столкновения,

т.е. будем считать, что нейтрон, вылетевший из зоны  $i$  и испытавший первое столкновение в зоне  $j$ , последовательно проходит все зоны с номерами  $1, 2, 3, \dots, N$  (рис. 1), и толщина слоя каждой зоны есть величина средней хорды до столкновения для данной зоны при условии рождения в зоне  $i$  и столкновения в  $j$ .

Таким образом, формула (2) для расчета вероятностей первых столкновений имеет простой физический смысл: первое слагаемое есть вероятность нейтронов, родившихся в зоне  $i$ , долететь до зоны  $j$  и испытать в ней столкновение, второе – вероятность нейтронов, родившихся в зоне  $i$ , испытать столкновение в ней же без прохождения через другие зоны. Использование этой формулы для других сечений в сравнении с теми, при которых были рассчитаны реперные матрицы, ведет к правильному изменению вероятностей. Например, если в какой-то из зон на пути нейтрона из  $i$  в  $j$  полное сечение станет бесконечно малым, просто обнулится вклад в соответствующий оптический путь, и вероятности скорректируются в нужную сторону.

В процессе выгорания полные сечения материалов в зонах будут меняться. Подставим в формулу (2) реперные хорды и полученные на данном шаге по времени новые сечения и скорректируем значения вероятностей  $P_{ij}$  с использованием нормировки на единицу и соотношения взаимности:

$$P_{ij}^{(1)} = \frac{[P_{ij}^{(0)}V_i\Sigma_{ti}^{(1)} + P_{ji}^{(0)}V_j\Sigma_{tj}^{(1)}]0,5}{V_i\Sigma_{ti}^{(1)}}, \quad (3)$$

где  $P_{ij}^{(0)}, P_{ji}^{(0)}$  – значения вероятностей, полученные для новых сечений по формуле (2);  $V_i, V_j$  – объемы зон  $i$  и  $j$ ;  $\Sigma_{ti}^{(1)}, \Sigma_{tj}^{(1)}$  – новые полные сечения в зонах  $i$  и  $j$ .

Диагональные элементы вычисляются как

$$P_{ii}^{(1)} = 1 - \sum_{j \neq i}^N P_{ij}^{(1)}. \quad (4)$$

Восстановленные таким образом матрицы вероятностей первых столкновений используются для решения задачи переноса в прежней геометрии, но с новыми сечениями  $\Sigma_t^{(1)}$ . На следующем шаге по выгоранию вероятности восстанавливаются с помощью новых полных сечений  $\Sigma_t^{(2)}$ .

Вычисляемые на каждом шаге по времени полные сечения для данной энергетической группы могут сильно отклоняться от первоначальных реперных сечений в той же группе. Поэтому производится поиск трех групп реперных сечений, наиболее близких к сечениям заданной группы на очередном шаге по времени (рис. 2).

Выбираются три реперные группы  $g_1, g_2, g_3$  с наименьшим среднеквадратичным отклонением

$$\chi = \sum_{i=1}^N [\Sigma_{ti}^{(g)} - \Sigma_i]^2,$$

где  $\Sigma$  – реперные макроскопические групповые сечения, для которых рассчитаны средние хорды;  $\Sigma_t^{(g)}$  – полные макроскопические сечения энергетической группы  $g$ , для которых требуется рассчитать матрицу вероятностей первых столкновений. Суммирование производится по всем геометрическим зонам. Тогда средние хорды и коэффициенты  $A_{ij}$  для подстановки в соотношение (2) корректируются простой интерполяцией:

$$\langle B \rangle = \frac{\sum_{k=1}^3 \chi(g_k)^{-1} B^{(k)}}{\sum_{k=1}^3 \chi(g_k)^{-1}}, \quad (5)$$

где в качестве  $B^{(k)}$  подставляются значения  $L_{ijm}^{(k)}$ ,  $L_{ijj}^{(k)}$  или  $A_{ij}^{(k)}$ , выбранные для трех групп с минимальными среднеквадратичными отклонениями  $\chi(g_1)$ ,  $\chi(g_2)$ ,  $\chi(g_3)$ . Полученные средние хорды и коэффициенты используются в восстановлении вероятностей для новых сечений с помощью соотношений (2)–(5).

Данная методика была реализована в виде программного модуля, встроенного в состав комплекса UNK [3], который имеет подробную библиотеку ядерных данных на основе файлов оцененных ядерных данных ENDF/B-6 и библиотеку выхода продуктов деления в зависимости от энергии нейтронов, вызвавших деление. В программном модуле BURNUP,

интегрированном в пакет, изменение ядерной концентрации изотопов на временном шаге рассчитывается с помощью аналитических формул. По приведенной методике проводились тестовые расчеты выгорания материалов ячеек и кассет реактора ВВЭР-1000 и были получены приемлемые результаты [4]. В данной работе рассматривается более сложный вариант как по геометрии, так и по материальному составу.

В качестве тестового расчета рассматривается кассета активной зоны ледокольного реактора [5], характеризующаяся сложной геометрической структурой с наличием твэлов различного обогащения, нескольких типов выгорающего поглотителя в различной геометрии и концентрации.

Кассета была разбита на 107 регистрационных зон. Рассматриваемое время работы порядка 1500 суток с шагом по времени 10 суток. Первые два шага по времени одни сутки и пять суток соответственно.

Произведено три типа расчетов:

- по программе MCU-TR [6];
- с помощью комплекса UNK [3] с вычислением вероятностей первых столкновений методом Монте-Карло на каждом шаге по времени;
- с помощью комплекса UNK с вычислением вероятностей первых столкновений методом Монте-Карло через интервал времени в 120 суток, внутри этого интервала матрицы ВПС на каждом шаге восстановлены через средние хорды.

На рисунке 3а представлен график изменения бесконечного коэффициента размножения от времени для первых двух вариантов расчетов. Как видно из этого рисунка, расчеты выгорания по двум разным по идеологии программным комплексам имеют очень близкие значения, и все особенности изменения коэффициента от времени видны на обоих графиках и хорошо согласуются между собой. На рисунке 3б представлено относительное отклонение коэффициента, рассчитанного по UNK, от коэффициента, рассчитанного по MCU-TR. Как видно из этого рисунка, первые 900 суток это относительное отклонение по абсолютной величине не превышает 1%.

Был произведен расчет выгорания с точным вычислением матриц ВПС и средних хорд через каждые 120 суток (для уменьшения погрешностей и корректиров-

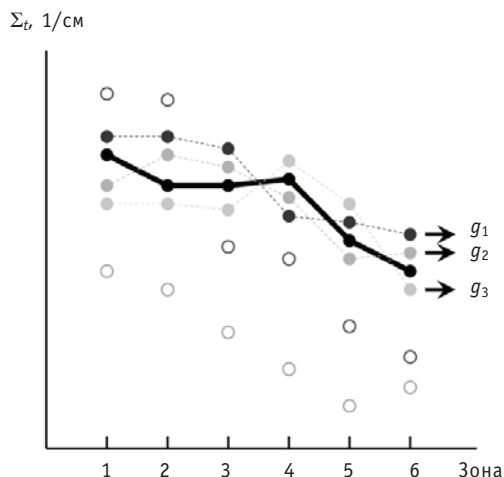


Рис. 2. Выбор трех реперных энергетических групп  $g_1$ ,  $g_2$ ,  $g_3$  с наиболее близкими полными сечениями к текущим сечениям на данном шаге по времени

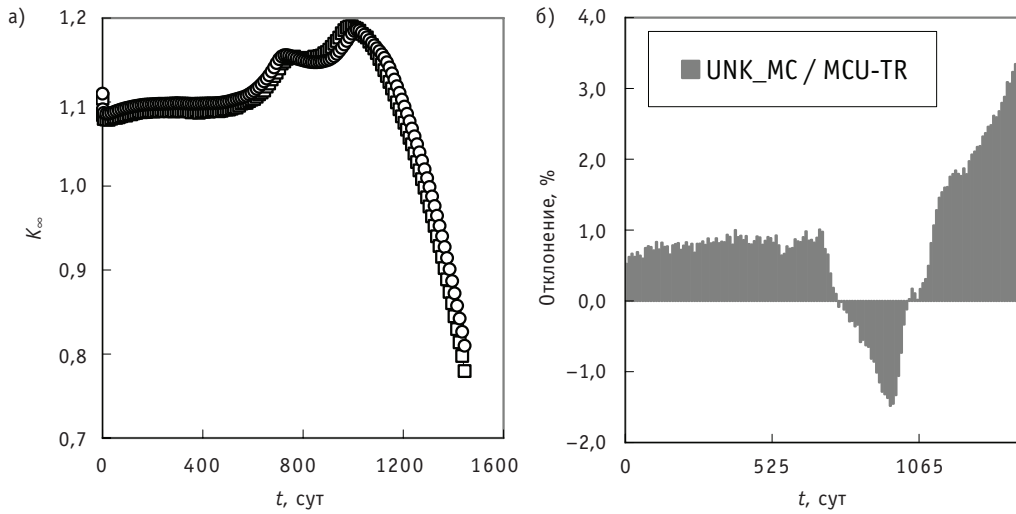


Рис. 3. а) – изменение бесконечного коэффициента размножения от времени в процессе выгорания материалов кассеты:  $\square$  – расчет по программе MCU-TR;  $\circ$  – расчет по программе UNK с пересчетом матриц ВПС на каждом шаге по времени частотным способом с помощью построения стохастических траекторий нейтронов; б) – относительное отклонение в расчете  $K_{\infty}$  по программе UNK от расчета по MCU-TR

ки средних хорд при сильно изменившихся сечениях относительно реперных) и восстановлением матриц ВПС внутри этого интервала по методике средних хорд. На рисунке 4а показан результат такого расчета совместно с расчетом по MCU-TR и UNK с точным вычислением матриц ВПС на каждом шаге по времени. Как видно из рисунка, первые 800 суток полученные значения бесконечного коэффициента размножения лежат приблизительно между более точными значениями, полученными по двум программам. На рисунке 4б показано отклонение коэффициента

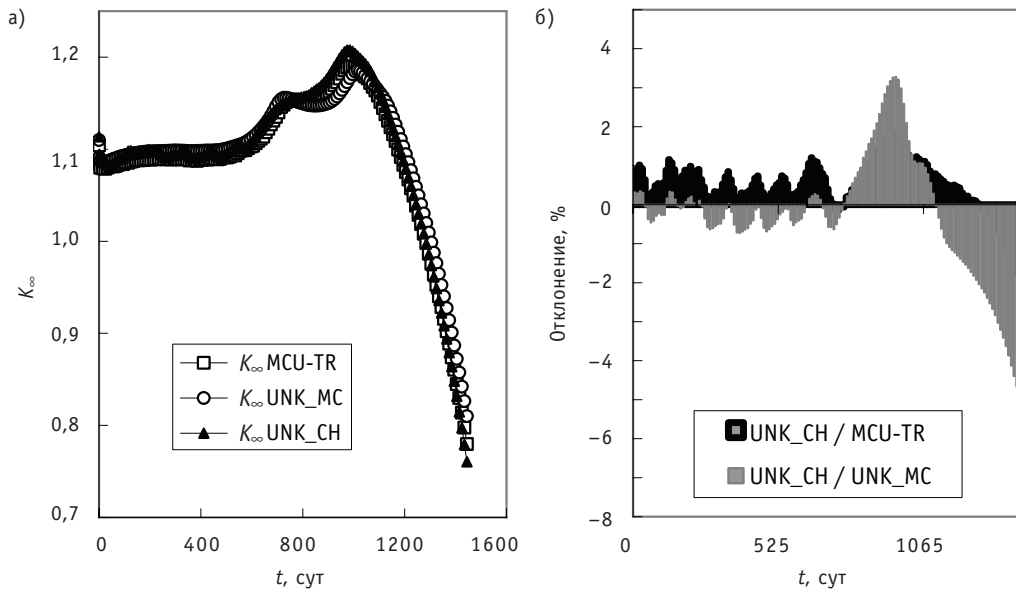


Рис. 4. а) – изменение бесконечного коэффициента размножения от времени в процессе выгорания материалов кассеты при восстановлении матриц ВПС методом средних хорд и точном их пересчете через каждые 120 суток ( $K_{\infty}$  UNK\_CH), б) – относительное отклонение в расчете  $K_{\infty}$  по методике средних хорд от расчета по программе MCU-TR ( $UNK_{CH}/MCU-TR$ ) и программе UNK с вычислением матриц ВПС методом Монте-Карло на каждом шаге по времени ( $UNK_{CH}/UNK_{MC}$ )

размножения от его значений, полученных по MCU-TR. Первые 800 суток оно не превышает 1,2%. На том же рисунке показано отклонение коэффициента размножения от его значений, полученных по UNK с точным вычислением матриц ВПС на каждом шаге по времени. Первые 800 суток оно не превышает 0,7%.

Результат расчета выгорания материалов кассеты программой UNK с использованием модуля точного вычисления матриц ВПС на каждом временном шаге частотным способом показал хорошее согласие с результатом расчета выгорания материалов данной кассеты программой MCU-TR в отношении изменения бесконечного коэффициента размножения от времени. Следует отметить, что расчеты произведены по обоим программным комплексам полностью независимо, без каких-либо специальных подгонок и настроек, на разных константных базах, с различными алгоритмами расчета изменения изотопного состава смеси в зависимости от времени, с различным набором цепочек изотопов. Такая корреляция значений из двух разных расчетов для очень сложной системы как по геометрии, так и по материальному составу свидетельствует о верном выборе разработчиками данных комплексов методик и алгоритмов расчета, а также показывает пригодность модуля вычисления матриц ВПС методом Монте-Карло частотным способом для расчета стандартных вероятностей первых столкновений в системах со сложной геометрией и материальным составом.

Последний расчет показывает принципиальную возможность применения методики восстановления матриц ВПС через средние хорды и для расчета выгорания геометрически сложных систем с высоким обогащением топлива и сильными поглотителями при условии точного пересчета матриц ВПС и средних хорд через определенные интервалы времени. Однако требуется усовершенствование этой методики для устранения ступенчатых «колебаний» значений расчетных величин относительно более точных значений и для увеличения интервала времени между точными пересчетами. Работы в этом направлении продолжаются.

### **Литература**

1. Гомин Е.А., Майоров Л.В. О расчете вероятностей первых столкновений в системах со сложной геометрией//ВАНТ. Сер. ФизЯР. – 1981. – Вып. 8(21). – С. 62-69.
2. Карпушкин Т.Ю., Цибульский В.Ф. Расчет матриц вероятностей первых столкновений методом Монте-Карло с использованием сеточной разбивки геометрии/Препринт ИАЭ-6492/5. – М., 2007.
3. Davidenko V.D., Tsibulskiy V.F. Detailed calculation of neutron spectrum in cell of a nuclear reactor/Intern. Conf. on the Physics of Nuclear Science and Technology (New York, Oct. 5-8, 1998). – P. 1755-1760.
4. Карпушкин Т.Ю. Расчет матриц вероятностей первых столкновений и средних хорд до первого столкновения методом Монте-Карло. Вычисление матриц вероятностей первых столкновений на основе средних хорд в процессе выгорания/Препринт ИАЭ-6654/5., М., 2010.
5. Аввакумов А.В., Аристархова Е.А., Каплар Е.П., Лисицин И.С., Малофеев В. М., Сидоров В.С., Увакин М.А., Чичулин Н.Л. Верификация нейтронно-физического кода BARS для расчетов активных зон транспортного типа. Отчет РНЦ КИ инв. №46-19/309. – М., 2008.
6. Алексеев Н.И., Андросенко П.А., Большагин С.Н., Брызгалов В.И., Гомин Е.А., Городков С.С., Гуревич М.И., Калугин М.А., Кулаков А.С., Марин С.В., Олейник Д.С., Пряничников А.В., Шкаровский Д.А., Юдкевич М.С. Разработка программы MCU-TR для расчета физических характеристик активных зон транспортных реакторов, реализующей для решения уравнения переноса нейтронов метод Монте-Карло на основе информации, хранящейся в файлах оцененных ядерных данных. Отчет РНЦ КИ инв. №36-10/35-09.

Поступила в редакцию 4.05.2011

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.51

*Burnout Calculation in Complicated Geometry Region with Strong Absorption by First-flight Collision Probabilities Method* \Т. Yu. Karpushkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 6 titles.

A recovery method of first-flight collision probabilities matrixes in burnout process using average chords calculated for some states by stochastic neutron rays is presented. The calculation of infinite neutron breeding factor for transport reactor assembly in burnout process of materials using this method and comparison with calculation by other methods and programs is presented.

### УДК 621.039.51

*Option of IVG.1M Reactor Modernization with Partial Replacement of Process Channels* \V. Kotov, I. Prozorova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 4 titles.

Treatments of mixed core usage including installation of not complete set of new process channels in reactor but only parts of them are stated. It is shown that partial reactor channel replacement allows reactor upgrading and enhancing its functional capabilities.

### УДК 621.039.5: 621.362

*Self-Contained Thermionic Nuclear Power Plant for Offshore Gas and Oil Production Platforms* \A. D. Krotov, G. E. Lazarenko, M. K. Ovcharenko, A. P. Pyshko, A. V. Sonko, V. I. Yarygin, D. G. Lazarenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 7 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 7 titles.

The reactor unit for direct conversion of thermal energy into electrical energy with the electrical output between 1-5 MW oriented onto integration into equipment for offshore platforms have been discussed. A distinguishing feature of the reactor unit is the use of a thermionic conversion process with the thermodynamic cycle upper temperature of ~1600 K and lower temperature of ~700 K with the efficiency 15-20%.

### УДК 621.039.519

*Tests of SM Reactor Experimental Fuel Assemblies with Increased Uranium Load* \V. A. Starkov, M. N. Svyatkin, A. V. Klinov, A. P. Malkov, V. E. Fedoseev, A. L. Petelin, Yu. B. Chertkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 1 table, 9 illustrations. – References, 8 titles.

This paper presents the results of determination of power density and burnup distribution throughout the sections of three experimental fuel assemblies with increased uranium content in the rods (6g U235), obtained under calculated and experimental simulation of their operation conditions in the SM research reactor core. The mode of these distributions change during irradiation is analyzed. Thermal physic parameters of experimental FA rod operation are examined. The essential controlled tested parameters are given. It is shown that the reactor FA with increased fuel load stood well the total cycle of the reactor tests retaining its operational integrity under energy release, thermal load and fuel burnup appropriate to operational conditions of the modernized reactor core.