

УДК 533.72

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-4-127-139

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ТЕРМОЭМИССИОННОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ЯЭУ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ БОЛЬЦМАНА НА КЛАСТЕРНОЙ АРХИТЕКТУРЕ

**Басалаев А.А.⁴, Клосс Ю.Ю.^{1,2}, Любимов Д.Ю.^{1,3}, Квасов И.Е.⁴, Шувалов П.В.⁴,
Щербаков Д.В.¹, Захаров А.А.⁴**

¹ Московский физико-технический институт (государственный университет)
141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9,
Российская Федерация

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Российская Федерация

³ Научно-производственное объединение «Луч»
142100, Московская область, г. Подольск, ул. Железнодорожная, д. 24,
Российская Федерация

⁴ ООО «Лаборатория открытого кода и приложений»
123060, г. Москва, ул. Берзарина, д. 19, Российская Федерация

Аннотация. Данная работа посвящена моделированию поведения газообразных продуктов деления: Kr и Xe в межэлектродном зазоре ядерной энергетической установки. Для проведения анализа используется метод численного решения уравнения Больцмана с использованием двумерных сеток. Для моделирования процессов был реализован программный комплекс, позволяющий проводить вычисления на кластерной архитектуре за счёт разделения пространственных ячеек между параллельными узлами. Были получены данные по распределениям ГПД в полости межэлектродного зазора в состоянии термодинамического равновесия с заданными граничными условиями.

Ключевые слова: разреженный газ, смесь газов, уравнение Больцмана, консервативный проекционный метод, численное моделирование

ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF RADIONUCLIDES IN THE THERMO- EMISSION CONVERTER OF A NUCLEAR POWER PLANT BASED ON THE SOLUTION OF THE BOLTZMAN EQUATION ON CLUSTER ARCHITECTURE

**A. Basalaev⁴, U. Kloss^{1,2}, D. Lubimov^{1,3}, I. Kvasov⁴, P. Shuvalov⁴, D. Sherbakov¹,
A. Zaharov⁴**

¹ Moscow Institute of Physics and Technology (State University)
Institutskii per. 9, 141701 Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation

² National Research Center "Kurchatov Institute"
pl. Akad. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russian Federation

© СС ВУ Басалаев А.А., Клосс Ю.Ю., Любимов Д.Ю., Квасов И.Е., Шувалов П.В.,
Щербаков Д.В., Захаров А.А., 2018.

³ "Luch" Scientific Production Association

ul. Zheleznodorozhnaya 24, 142100 Podolsk, Moscow region, Russian Federation

⁴ Open Source Lab and Applications Ltd

ul. Berzarina 19, 123060 Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper is devoted to modeling the behavior of gaseous fission products: Kr and Xe in the interelectrode gap of a nuclear power plant. For analysis, the method of numerical solution of the Boltzmann equation using two-dimensional grids is used. To simulate the processes, a software package was implemented that allows calculations to be performed on cluster architecture due to separation of spatial cells between parallel nodes. Data were obtained on the distribution of the GPA in the cavity of the interelectrode gap in the state of thermodynamic equilibrium with the given boundary conditions.

Key words: rarefied gas, gas mixture, Boltzmann equation, conservative projection method, numerical simulation.

Введение

Одним из перспективных направлений в современной физике является создание космических аппаратов, способных развивать высокую энергетическую мощность, например, для круглосуточного наблюдения за техногенными и природными процессами в различных регионах земли. Уровни необходимой мощности на данный момент не могут быть достигнуты с использованием традиционных солнечных энергетических установок, поэтому создание ядерных установок является востребованной задачей. В проектных разработках космических ядерных энергетических установок получили развитие термоэмиссионные реакторы-преобразователи на тепловых и промежуточных нейтронах [2, с.20]. Одним из элементов такого реактора является электрогенерирующий канал (ЭГК), содержащий вентилируемый твэл с ядерным топливом на основе диоксида урана. На работоспособность многоэлементного ЭГК с оксидным ядерным топливом с сообщающимися полостями твэла и межэлектродного зазора (МЭЗ) и, в частности, на изменение выходных электрических характеристик влияют многочисленные факторы, например, наличие в МЭЗ продуктов деления, образующихся в топливе при работе реактора [7, с.34]. Металлические продукты деления и их оксиды попадают в МЭЗ диффундируя через ловушку и газоотводящий тракт, конденсируясь на стенках, однако газообразные продукты деления (ГПД), например, Kr и Xe не конденсируются на ловушке и газоотводящем тракте попадая в МЭЗ ЭГК и далее вакуумно-цезиевую систему [4, с.216]. В процессе диффузии радионуклидов через вакуумно-цезиевую систему происходит их бета-распад, образующиеся в результате Ba и Sr оказывают существенное влияние на выходную электрическую мощность ЭГК из-за адсорбции на стенках коллектора [3, с. 323]. Для обоснования и отработки схемы реактора проводятся испытания в петлевом канале [9, с. 50], с помощью γ – спектрометрической системы, размещенной на вакуумном трубопроводе линии откачки, регистрируются радионуклиды и измеряются объемные активности откачиваемых газов. Проблемной задачей в такой схеме ЭГК является определение давлений и потоков ГПД в ва-

куумно-цезиевой системе, поскольку оценки выхода радиоактивных газов из топлива трудоемки и не позволяют с приемлемой точностью определить потоки ГПД через газоотводное устройство в МЭЗ.

Целью работы является: определение потока ГПД в МЭЗ из газоотводящего тракта по заданному потоку ГПД из МЭЗ в вакуумно-цезиевую систему методом решения прямой задачи по выбранным начальным потокам и последующей аппроксимации результатов; и оценка парциальных давлений Sr и Ba, образующихся в полости МЭЗ в результате бета-распада.

Для анализа газообразной смеси в полости ЭГК используется численный метод решения уравнения Больцмана [5, с. 34], которое описывает поведение разряженных смесей газов. Численно уравнение Больцмана локально по пространству, что позволяет эффективно проводить расчеты на многоядерных системах, поскольку потери производительности происходят только из-за обмена информацией между соседними ячейками, распределенными в разные процессы, специальные алгоритмы разбиения пространства позволяют уменьшить число соседних ячеек и добиться почти линейного прироста производительности от числа используемых параллельных узлов.

Описание установки

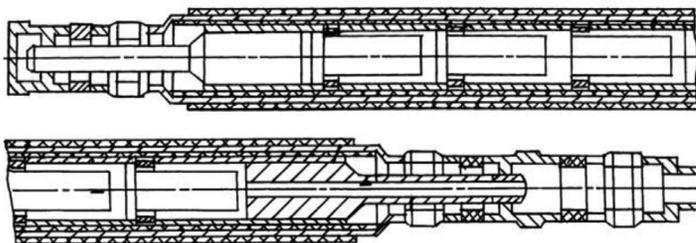
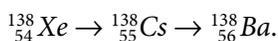


Рис. 1. Схема многоэлементного ЭГК.

Многоэлементный ЭГК представляет собой сложную инженерную конструкцию, которая содержит последовательно соединенные ЭГК с внутренним расположением твэлов, заключенные в герметичную оболочку, коммутационные переходники, соединяющие эмиттеры с коллекторами соседних электрогенерирующих элементов. Внутри коммутационных переходников выполнены каналы, соединяющие полости МЭЗ и твэла (см. рис. 1).

Пространство МЭЗ заполнено газообразным цезием – рабочим телом, через каналы в эмиттере в зазор поступают криптон и ксенон, в процессе диффузии они распадаются по цепочкам бета-распада:



Оценочные давления Cs в полости МЭЗ составляет 150 Па, а Kr и Xe находятся в полости МЭЗ под давлением не выше 1,5 Па. Характерные размеры МЭЗ варьируются от 0,4 мм до 520 мм, это дает разброс чисел Кнудсена в диапазоне от 0,004 до 100. Такой диапазон позволяет рассматривать движение ГПД в зазоре как движение разреженных газов и позволяет моделировать их поведение методом численного решения уравнения Больцмана.

Метод решения уравнения Больцмана

Для анализа поведения ГПД используется двумерное уравнение Больцмана, а при вычислении интеграла столкновений используется приближение потенциала твердых сфер, использование двумерной формы уравнения Больцмана возможно, поскольку ширина МЭЗ мала относительно радиуса эмиттерного пакета, а сама установка осесимметрична относительно центральной оси:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{p_x}{m} \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{p_y}{m} \frac{\partial f}{\partial y} = \int (f f_i - f f_i) g b d b d \epsilon d p_i.$$

Для учета бета-распада ГПД уравнение Больцмана дополняется уравнением радиоактивного распада, в котором количество молекул заменено функцией распределения, поскольку при бета-распаде импульс частицы меняется слабо:

$$\frac{d f_i}{d t} = -\lambda_i f_i + \sum \lambda_j f_j$$

где i – индекс газа, испытывающего распад, а индексы j – индексы газов, которые распадаются на i газ.

Для решения системы уравнений Больцмана, используется монотонная разностная схема с использованием метода расщепления по физическим процессам [1, с.49]: на первом этапе решается уравнение переноса, поочередно вдоль направлений распространения газа, на втором этапе решается уравнение релаксации, рассматриваются процессы межмолекулярного взаимодействия в газах, на третьем этапе решается уравнение бета-распада.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial f^*}{\partial t} + \frac{p_x}{m} \frac{\partial f^*}{\partial x} = 0, f^*(x, \xi, 0) = f(x, \xi, t_j) \\ \frac{\partial f^{**}}{\partial t} + \frac{p_y}{m} \frac{\partial f^{**}}{\partial y} = 0, f^{**}(x, \xi, 0) = f^*(x, \xi, \tau/2) \\ \frac{\partial f^{***}}{\partial t} = I(f^{***}, f^{***}), f^{***}(x, \xi, 0) = f^{**}\left(x, \xi, \frac{\tau}{2}\right), \tau = t_{j+1} - t_j \\ \frac{\partial f^{****}}{\partial t} = -\lambda f^{****} + \sum_k \lambda_k f_k^{****}, f^{****}(x, \xi, 0) = f^{***}(x, \xi, \tau) \\ f(x, \xi, 0) = f^{****}(x, \xi, \tau) \end{array} \right.$$

Для решения уравнения переноса используется разностная схема второго порядка точности TVD-схемой (Total Variation Diminishing Scheme). Такая схема обладает свойствами монотонности и неотрицательности решения, что отвечает поведению функции распределения, которая как физическая величина представляет из себя суть концентрацию газа.

$$\frac{f_i^{j+1} - f_i^j}{\tau} + \frac{p}{m} \frac{\tilde{f}_{i+1/2}^j - \tilde{f}_{i-1/2}^j}{h} = 0$$

$$\tilde{f}_{i+1/2}^j = \begin{cases} f_i^j + \frac{1-\gamma}{2} \overline{\Delta f}_i^j, p > 0, \\ f_{i+1}^j - \frac{1-\gamma}{2} \overline{\Delta f}_{i+1}^j, p < 0. \end{cases}$$

В уравнениях среднее отклонение функции распределения $\overline{\Delta f}_i^j$ соответствует одному из нескольких ограничителей второго порядка точности, наиболее оптимальным выбором является superbee ограничитель, при котором среднее отклонение определяется следующим образом:

$$\overline{\Delta f}_i^j = \max(\min(2|f_{i+1}^j - f_i^j|, |f_i^j - f_{i-1}^j|), \min(|f_{i+1}^j - f_i^j|, 2|f_i^j - f_{i-1}^j|)).$$

Для того, чтобы TVD-схема не разваливалась в процессе счета необходимо выполнение условия, исходя из которого определяется временной шаг в задаче:

$$\gamma = \left| \frac{p \tau}{m h} \right|, \quad 0 \leq \gamma \leq 1.$$

Для решения уравнения релаксации используется схема:

$$f(t + \tau) = f(t) + \tau I(t) + O(\tau^2).$$

Интеграл столкновений вычисляется с помощью проекционного метода, более подробно описанного в [10, с.53], при котором интеграл представляется в виде:

$$I_\gamma = \frac{\pi b_{\max} V_{sph} N_0}{2} \frac{N_0}{N_v} \sum_{v=0}^{N_v} \left\{ \delta_{\alpha_v, \gamma} + \delta_{\beta_v, \gamma} - (1 - r_v) (\delta_{\lambda_v, \gamma} + \delta_{\mu_v, \gamma}) - r_v (\delta_{\lambda_v + s_v, \gamma} + \delta_{\mu_v - s_v, \gamma}) \right\} \Omega_v$$

$$\Omega_v = \left\{ (f_{\lambda_v} f_{\mu_v})^{1-r_v} (f_{\lambda_v + s_v} f_{\mu_v - s_v})^{r_v} - f_{\alpha_v} f_{\beta_v} \right\} \left| \frac{\bar{p}_{\alpha_v}}{m_1} - \frac{\bar{p}_{\beta_v}}{m} \right| b_v$$

$$r_v = \frac{E_{0v} - E_{1v}}{E_{2v} - E_{1v}}, E_{0v} = \bar{p}_{\alpha_v}^2 + \bar{p}_{\beta_v}^2, E_{1v} = \bar{p}_{\lambda_v}^2 + \bar{p}_{\mu_v}^2, E_{2v} = \bar{p}_{\lambda_v + s_v}^2 + \bar{p}_{\mu_v - s_v}^2.$$

В формулах выше из импульсной сетки выбираются узлы α_v, β_v – отвечающие за импульсы молекул до столкновения и узлы λ_v, μ_v – отвечающие за импульсы молекул после столкновения соответственно. Причем узлы $\lambda_v, \lambda_v + s_v$ выбираются так, что бы выполнялось неравенство:

$$E_1 < E_0 < E_2$$

а узел μ_v выбирают, чтобы выполнялся закон сохранения импульса:

$$\mu_v = \alpha_v + \beta_v - \lambda_v.$$

Данный численный интеграл консервативен по импульсу, энергии и веществу, а также обращается в ноль на максвелловском распределении. Окончательно, для уравнения релаксации, после аппроксимации функций их дискретными аналогами, получается разностная схема:

$$f_{\gamma}^{j+1} = f_{\gamma}^j + \tau I_{\gamma}^j.$$

Эта разностная схема явная, поскольку вклады в интеграл столкновений вычисляются через функции распределения из нижнего временного слоя. Для повышения точности вычисления интеграла столкновений узлы скоростной сетки для расчета выбираются с помощью метода сеток Коробова [9, с.163].

Разностная схема дополняется начальными и граничными условиями, начальное условие – распределение Максвелла с заданным давлением P_0 и температурой T_0 :

$$f(p) = \frac{P_0}{kT_0} \cdot \frac{\exp(-p^2 / 2mkT_0)}{\sum \exp(-p^2 / 2mkT_0)}.$$

Для определения граничного условия на границе с нормалью n нужно доопределить функцию распределения для молекул с импульсами $(p, n) > 0$, молекулам задается максвелловское распределение с константой, определяемой из типа граничного условия. Для условия диффузного отражения задается температура стенки T_1 , а константа определяется из равенства потоков налетающих и отраженных от стенки молекул:

$$f((p, n) > 0) = \frac{\sum_{(p, n) < 0} |p| f(p)}{\sum_{(p, n) > 0} p \cdot \exp(-p^2 / 2mkT_{\text{нб}})} \exp\left(-\frac{p^2}{2mkT_1}\right).$$

При определении граничного условия заданного потока q_1 константа определяется из суммарного потока газа в ячейке и температуры газа на границе T_1 :

$$f((p, n) > 0) = \frac{q_1 - \sum_{(p, n) < 0} |p| f(p)}{\sum_{(p, n) > 0} p \cdot \exp(-p^2 / 2mkT_{\text{нб}})} \exp\left(-\frac{p^2}{2mkT_1}\right).$$

При определении условия постоянного давления задается давление P_1 и температура газа T_1 , функция распределения дополняется по формуле:

$$f((p, n) > 0) = \frac{P_1 / kT_1 - \sum_{(p, n) < 0} f(p)}{\sum_{(p, n) > 0} \exp(-p^2 / 2mkT_1)} \exp\left(-\frac{p^2}{2mkT_1}\right).$$

Программная реализация

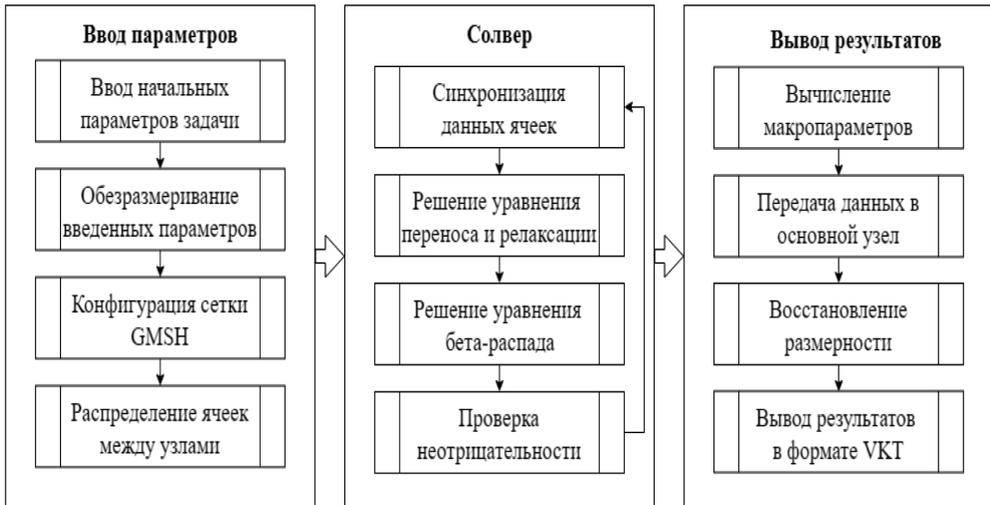


Рис. 2. Схема модулей программы.

Программный комплекс, использующий численное решение уравнения Больцмана, реализован на языке C++, программа решает задачу эволюции газовых смесей в области с заданными начальными и граничными условиями. Задание параметров пространства, степени дискретизации и разбиение сетки на равные части производится с помощью пакета GMSH. В процессе работы программы на каждом шаге итерации создаются файлы с маркопараметрами (давление, концентрация, температура, поток) ячеек в формате vtk – стандартном формате для приложений gnuplot и paraview. Схема модулей программы изображена на рисунке 2.

В программе используется одновременное исполнение на кластерных узлах с помощью средств MPI, данные пространственных ячеек разделяются по доступным параллельным узлам поровну. При проведении расчетов на нескольких узлах в пространственную сетку добавляются фиктивные ячейки, которые содержат значения и информацию о пространственной ячейке соседнего узла, перед каждой операцией по вычислению уравнения переноса идет синхронизация значений функции распределения соседних ячеек между узлами, для решения уравнения релаксации значения соседних ячеек не используются. Для

ввода и вывода данных используется узел с номером 0, который запускается на основной машине, этот узел создает пространственную и скоростную сетки и распределяет их по остальным узлам. Для получения результатов расчетов данные всех узлов собираются на основной машине и сохраняются в файл. Прирост производительности при разбиении пространственной сетки по параллельным узлам близок к линейному от числа используемых узлов, потери времени происходят из-за передачи больших массивов функции распределения между узлами в процессе синхронизации.

Результаты

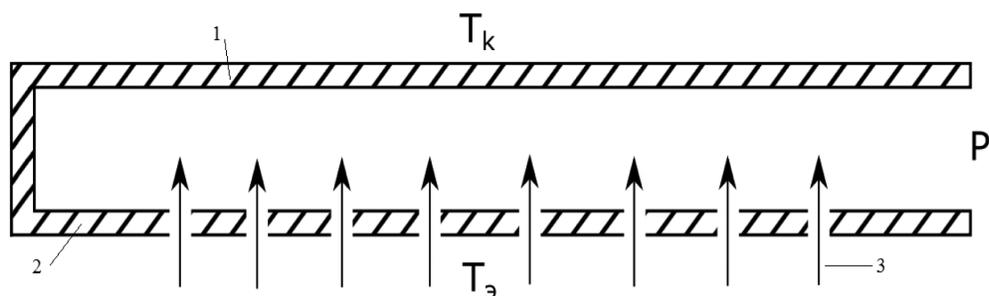


Рис. 3. Двумерный вид многоэлементного ЭГК: 1 – коллекторный пакет; 2 – эмиттеры; 3 – поступление ГПД через систему газоотвода.

Методом, описанным выше, решалась задача моделирования поведения ГПД в пространстве МЭЗ. Поскольку МЭЗ обладает осевой симметрией, то для упрощения счета он рассматривался в двумерном виде, представленном на рисунке 3. Граничными условиями на коллекторе и эмиттере задается диффузное отражение с температурой 900К и 1500К соответственно. Граничным условием на левом и правом концах МЭЗ является диффузное отражение с градиентной температурой и условие постоянного давления соответственно, для Cs давление устанавливается в значение 150Па, для Kr и Xe задается граничное условие вакуума – давление 0Па. Начальным условием является распределение Максвелла с давлением 150Па для Cs и градиентной температурой, Kr и Xe в начальный момент отсутствуют в области счета. Поскольку оценочные концентрации Kr и Xe малы по сравнению с концентрацией Cs, то при вычислении интеграла столкновений рассматривались только столкновения: Cs – Cs, Cs – Kr и Cs – Xe, столкновениями ГПД между собой можно пренебречь. Расчет производится до момента установления состояния термодинамического равновесия.

Были проведены серийные расчеты для разных потоков Kr и Xe в МЭЗ, и были получены данные по распределениям давлений, температур, потоков цезия и ГПД в полости зазора. На рисунке 4 приведен график зависимости потока Kr и Xe на правом конце МЭЗ от начального потока из газоотводящего тракта. На выходе из МЭЗ задавался ожидаемый конечный поток q_k .

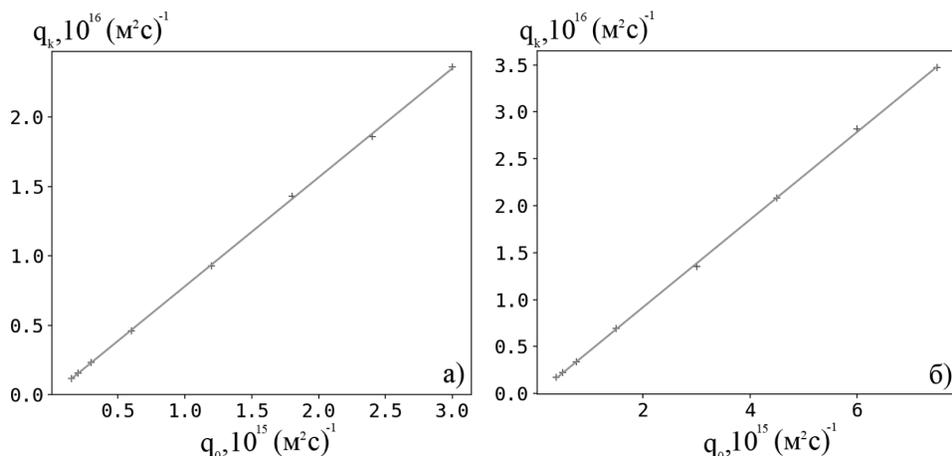


Рис. 4. Конечный поток из МЭЗ криптона (а) и ксенона (б) в зависимости от их начального потока в МЭЗ.

Таблица 1.
Конечные и начальные потоки ГПД в МЭЗ

Газы	$q_k, 10^{16}(\text{m}^2 \cdot \text{c})^{-1}$	$q_0, 10^{15}(\text{m}^2 \cdot \text{c})^{-1}$
Kr	1,01	1,29
Xe	1,73	3,74

Используя метод аппроксимации, т.е. минимизации квадратичной ошибки:

$$E = \sum_{j=0}^k |p(x_j) - y_j|^2$$

где $p(x)$ – это аппроксимирующий полином, а y – это значения дискретной функции в точках j , определяется зависимость соответствующая полученным данным, из этой зависимости определяется значение начального потока ГПД в МЭЗ для заданного ожидаемого потока на выходе. Аппроксимация производилась с помощью пакета `numpy` на локальной машине. Расчетные начальные и ожидаемые конечные потоки указаны в таблице 1.

Для оценки парциальных давлений Ва и Sr были проведены расчеты с начальным потоком, определенным методом аппроксимации, при расчетах рассматривался бета-распад Kr и Xe до Sr и Ba. При вычислении интеграла столкновений рассматривались только столкновения: Cs – Cs, Cs – Kr и Cs – Xe. Всего рассматривалось 7 газов: Cs, Kr, Xe, Rb, Sr, Cs(138), Ba. На рисунке 5 приведены графики распределения давления Kr, Xe и Sr, Ba относительно длины МЭЗ.

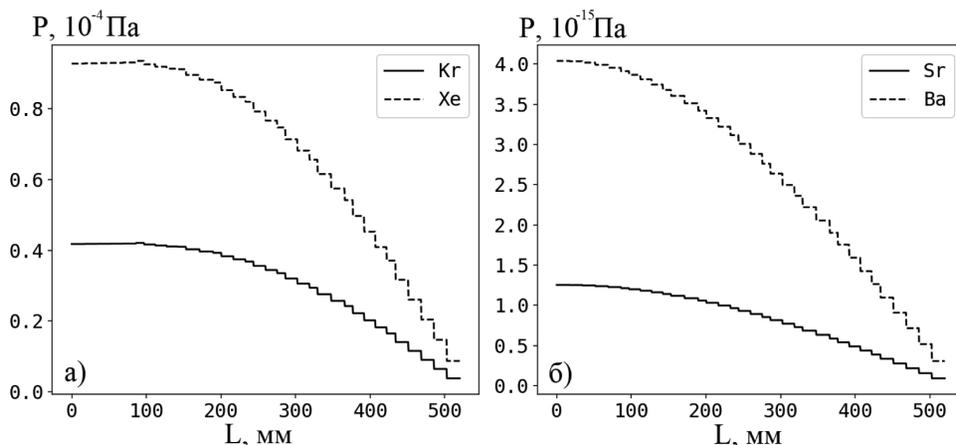


Рис. 5. Давление Kr, Xe (а) и их продуктов бета-распада Sr, Ba (б) в МЭЗ.

Заклучение

В ходе работы было рассмотрено применение метода численного решения уравнения Больцмана к расчету поведения газообразной смеси в полости МЭЗ, разработана программа и получены распределения потоков и давлений ГПД для разных начальных потоков. Рассмотрена зависимость потока ГПД на конце МЭЗ от потока из газоотводящего тракта, получено значение начального потока по заданному конечному. Оценены парциальные давления продуктов бета-распада Kr и Xe в полости зазора. Полученные результаты, согласуются с результатами, полученными методом решения линейного уравнения диффузии [8, с. 324].

Статья поступила в редакцию 20.08.2018 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 17-08-00606, 18-08-00438, 18-07-00323, 17-08-00339, 17-08-00252.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant Nos 17-08-00606, 18-08-00438, 18-07-00323, 17-08-00339, and 17-08-00252).

ЛИТЕРАТУРА

1. Аристов В.В., Черемисин Ф.Г. Расщепление неоднородного кинетического оператора уравнения Больцмана // Доклады АН СССР. 1976. Т. 231. № 1. С. 49–52.
2. Васильковский В.С., Андреев П.В., Зарицкий Г.А. Проблемы космической энергетики и роль ядерных энергетических установок в их решении // Международная конференция «Ядерная энергетика в космосе – 2005». Москва – Подольск, 1–3 марта 2005 г.: сборник докладов в 3 т. Т. 1. М.: Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежалы, 2005. С. 20–25.

3. Выбыванец В.И., Любимов Д.Ю., Корякин В.А. Моделирование работы долгоресурсного термоэмиссионного преобразователя с ядерным нагревом // Атомная энергия. 2015. Т. 118. Вып. 4. С. 233–236.
4. Гонтарь А.С., Гриднев А.А., Любимов Д.Ю. Анализ физико-химических процессов в многоэлементном ЭГК с сообщающимися полостями твэла и межэлектродного зазора // Атомная энергия. 2008. Т. 104. Вып. 4. С. 216–224.
5. Коган М.Н. Динамика разреженного газа. М.: Наука, 1967. 440 с.
6. Коробов Н.М. Тригонометрические суммы и их приложения. М.: Наука, 1989. 240 с.
7. Любимов Д.Ю., Николаев Ю.В., Шумилов А.А. Влияние продуктов деления на фазовый состав достехиометрического диоксида урана в тепловыделяющих элементах термоэмиссионных электрогенерирующих каналов // Материаловедение. 2008. № 3(132). С. 34–42.
8. Любимов Д.Ю., Федик И.И., Шумилов А.А. Влияние продуктов деления на выходную мощность термоэмиссионных ЭГК с сообщающимися и разделенными полостями твэла и межэлектродного зазора // Атомная энергия. 2011. Т. 110. Вып. 6. С. 321–327.
9. Синявский В.В. Методы и средства экспериментальных исследований и реакторных испытаний термоэмиссионных электрогенерирующих сборок. М.: Энергоатомиздат. 2000. 355 с.
10. Черемисин Ф.Г. Консервативный метод вычисления интеграла столкновений Больцмана // Доклады РАН. 1997. Т. 357. № 1. С. 53–56.

REFERENCES

1. Aristov V.V., Cheremisin F.G. [Separation of the inhomogeneous kinetic operator in the Boltzmann equation]. In: *Doklady AN SSSR [Doklady Mathematics]*, 1976, vol. 231, no. 1, pp. 49–52.
2. Vasil'kovskii V.S., Andreev P.V., Zaritskii G.A. [Problems of space energy and the role of nuclear power plants in their decision]. In: *Mezhdunarodnaya konferentsiya «Yadernaya energetika v kosmose – 2005». Moskva–Podolsk, 1–3 marta 2015 g.: sbornik dokladov v 3 t. T. 1* [International conference “Nuclear power in space – 2005”. Moscow–Podolsk, March 1–3, 2005: a collection of papers in 3 volumes. Vol. 1]. Moscow, Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering Publ., 2005. pp. 20–25.
3. Vybyvanets V.I., Lyubimov D.Yu., Koryukin V.A. [Simulation of the operation of a long-life thermionic converter with nuclear heating]. In: *Atomnaya energiya [Atomic Energy]*, 2015, vol. 118, no. 4, pp. 233–236.
4. Gontar' A.S., Gridnev A.A., Lyubimov D.Yu. [Analysis of physicochemical processes in multicomponent electricity generating channels with communicating fuel-element and interelectrode gaps]. In: *Atomnaya energiya [Atomic Energy]*, 2008, vol. 104, no. 4, pp. 216–224.
5. Kogan M.N. *Dinamika razrezhennogo gaza* [Rarefied gas dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 440 p.
6. Korobov N.M. *Trigonometricheskie summy i ikh prilozheniya* [Trigonometric sums and their applications]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 240 p.
7. Lyubimov D.Yu., Nikolaev Yu.V., Shumilov A.A. [Influence of fission products on phase composition of prestoichiometric uranium dioxide in fuel elements of thermal-emission energy-generating channels]. In: *Materialovedenie [Inorganic Materials: Applied Research]*, 2008, no. 3(132), pp. 34–42.
8. Lyubimov D.Yu., Fedik I.I., Shumilov A.A. [Effect of fission products on the output power of thermionic EGC with communicating and separated fuel-element cavities and

- an interelectrode gap]. In: *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 2011, vol. 110, no. 6, pp. 321–327.
9. Sinyavskii V.V. *Metody i sredstva eksperimental'nykh issledovaniy i reaktornykh ispytaniy termoemissionnykh elektrogeneriruyushchikh sborok* [Methods and means of experimental studies and reactor tests of thermionic power generating assemblies]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 355 p.
10. Cheremisin F.G. [A conservative method for computing the Boltzmann collision integral]. In: *Doklady RAN* [Doklady Mathematics], 1997, vol. 357, no. 1, pp. 53–56.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Басалаев Артем Викторович – начальник группы ООО «Лаборатория открытого кода и приложений»;
e-mail: bz@lokip.ru;

Клосс Юрий Юрьевич – доктор физико-математических наук, начальник отдела моделирования физических процессов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»; заведующий кафедрой моделирования ядерных процессов и технологий Московского физико-технического институт (государственного университета);
e-mail: kl@lokip.ru;

Любимов Дмитрий Юльевич – кандидат технических наук, доцент кафедры моделирования ядерных процессов и технологий Московского физико-технического институт (государственного университета); ведущий научный сотрудник научно-производственного объединения «Луч»;
e-mail: ld@lokip.ru;

Квасов Игорь Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, начальник группы ООО «Лаборатория открытого кода и приложений»;
e-mail: kvs@lokip.ru;

Шувалов Павел Вадимович – кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории ООО «Лаборатория открытого кода и приложений»;
e-mail: shv@lokip.ru;

Щербаков Дмитрий Валерьевич – аспирант кафедры моделирования ядерных процессов и технологий Московского физико-технического института;
e-mail: dmitrii.shcherbakov@phystech.edu;

Захаров Александр Алексеевич – начальник группы, ООО «Лаборатория открытого кода и приложений»;
e-mail: shv@lokip.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Artem V. Basalaev – Head of the Group, Open Source Lab and Applications Ltd;
e-mail: bz@lokip.ru;

Yury Yu. Kloss – Doctor in Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Physical Processes Modeling, National Research Center “Kurchatov Institute”; Head of the Department of Modeling Nuclear Processes and Technologies, Moscow Institute of Physics and Technology (State University);
e-mail: kl@lokip.ru;

Dmitry Yu. Lubimov – PhD in Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Modeling Nuclear Processes and Technologies, Moscow Institute of Physics and Technology (State University); Leading Researcher of “Luch” Scientific Production Association;
e-mail: ld@lokip.ru;

Igor Ye. Kvasov – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Head of Group, Open Source Lab and Applications Ltd;
e-mail: kvs@lokip.ru;

Pavel V. Shuvalov – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory Open Source Lab and Applications Ltd;
e-mail: shv@lokip.ru;

Dmitry V. Sherbakov – postgraduate student at the Department of Modeling Nuclear Processes and Technologies, Moscow Institute of Physics and Technology (State University);
e-mail: dmitrii.shcherbakov@phystech.edu;

Alexander A. Zaharov – Head of the Group, Open Source Lab and Applications Ltd;
e-mail: shv@lokip.ru.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Басалаев А.А. Клосс Ю.Ю., Любимов Д.Ю., Квасов И.Е., Шувалов П.В., Щербakov Д.В., Захаров А.А. Анализ динамики поведения радионуклидов в термоэмиссионном преобразователе ЯЭУ на основе решения уравнения Больцмана на кластерной архитектуре // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2018. № 4. С. 128–139.

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-4-127-139

FOR CITATION

Basalaev A.A., Kloss Yu.Yu., Lubimov D.Yu., Kvasov I.Ye., Shuvalov P.V., Sherbakov D.V., Zaharov A.A. Analysis of the behavior of radionuclides in the thermo-emission converter of a nuclear power plant based on the solution of the Boltzmann equation on cluster architecture. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2018, no. 4, pp. 128–139.

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-4-127-139