ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ИНЖИНИРИНГ, 2023, том 14, № 6, с. 523–529

РАЗДЕЛЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОТОПОВ. МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ

УДК 533.9;621.039;621.039.7;621.039.73;621.039.3;66.017

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ДИФФУЗИОННОЙ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ

© 2023 г. А. С. Петровская[a], *, А. Б. Цыганов[a]

[a]Лаборатория физики плазмы, ООО "ИнноПлазмаТех", г. Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: anita3425@yandex.ru*

Поступила в редакцию 20.07.2023 г.
После доработки 21.07.2023 г.
Принята к публикации 24.07.2023 г.

Статья посвящена принципиально новой технологии – "Ионное травление – термическое разделение", разрабатываемой для решения мировой проблемы ядерной энергетики – замыкания ядерного топливного цикла и переработки отработанного ядерного топлива. Рассмотрен вариант конструкции диффузионной разделительной трубы, являющейся ключевым элементом для реализации данной технологи. На основе численного расчета получены распределения температуры на внутренней поверхности разделительной трубы, а также в потоке газа-носителя в условиях индивидуального омического нагрева определенных секций трубы со съемными вкладышами. Полученные температурные распределения позволяют выбрать оптимальные режимы работы для селективного разделения компонентов отработанного ядерного топлива.

Ключевые слова: Ядерный топливный цикл, переработка отработанного ядерного топлива, плазменный разряд высокого давления, ионное травление – термическое разделение, теплофизические параметры, поле температуры

DOI: 10.56304/S2079562923010207

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных проблем ядерной энергетики является разработка эффективных технологий для переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и сокращения накопленных объемов радиоактивных отходов. В настоящее время на территории России на предприятиях ГК "Росатом" общий объем ОЯТ составляет примерно 24 тыс. т, на предприятиях ядерной комплекса в других странах мира – более 350 тыс. т.

В данной статье мы рассматриваем принципиально новую технологию – "Ионное травление–термическое разделение" (ИТ–ТР) для переработки ОЯТ и эффективной реализации замкнутого топливного ядерного цикла. Технология свободна от использования широко применяемых в атомной отрасли радиохимических методов, основанных на переводе ОЯТ в фазу растворов и расплавов, что неизбежно приводит к увеличению объемов радиоактивных отходов (РАО), радиационной деградации используемых химических реагентов, а также к значительным конструктивным проблемам при реализации многостадийного процесса радиохимической переработки [1–6]. В частности, к увеличению объемов РАО при переработке ОЯТ приводят известный висмут-фосфатный способ, в основе которого лежит окислительно-восстановительный процесс ацетатного осаждения уранил-триацетата, экстракция аминами, аква-фтор-процесс и др., а также неводные методы, включая возгонку фторидов, плавку-рафинирование с селективным окислением, электролиз в солевых расплавах, пирохимический способ переработки ОЯТ в солевых расплавах и др. [7].

Стоит отметить, что в промышленном масштабе реализован только экстракционный PUREX-процесс переработки ОЯТ, основанный на использовании в каждом технологическом цикле трибутилфосфата в углеводородном разбавителе в качестве экстрагента, что также приводит к увеличению объемов РАО. Данная технология была разработана и запатентована в конце 40-х годов в США и освоена для переработки облучённого природного урана в оружейных целях. В частности, по данным работы [8], использование PUREX-процесса для переработки 1 т ОЯТ приводит к существенному увеличению объемов вторичных РАО: жидкие (высокоактивные – 45 м^3, среднеактивные – 150 м^3, низкоактивные – 2000 м^3), твердые (1-я группа активности 3500 кг, 2-я – 3000 кг, 3-я – 1000 кг).

Кроме радиохимических методов, существуют также подходы в виде плазменной сепарации

ОЯТ в плазменных центрифугах [9–15], плазмооптической масс-сепарации [16–19] и на основе ионно-циклотронного резонанса [20, 21] для переработки ОЯТ на основе физических принципов. Среди недостатков сепарации ОЯТ в плазменных центрифугах стоит отметить недостаточную производительность и низкую селективность из-за процесса перезарядки, поскольку в плазменных центрифугах удается добиться только разделения на легкую и тяжелую массовые группы элементов с атомными массами 150 и 240 [15], а для извлечения выбранных изотопов потребуются дополнительные стадия переработки. Если задаться вопросом наиболее высокой селективности разделения изотопов, то стоит обратиться к лазерным методам разделения [22–25], недостатком которых является сложность экспериментальных и промышленных установок, их высокая стоимость и энергоемкость, а также низкая производительность в силу специфики процесса: например, для селективной диссоциации молекулы $^{235}UF_6$ потребуется поглощение до 50 квантов узкополосного ИК-излучения на длине волны 16 мкм [26, 27]. Сложности с рабочим ресурсом мощных лазерных систем, перестраиваемых по частоте в области длин волн 16 мкм затрудняют промышленную реализацию этого подхода. Кроме того, подобные способы селективной лазерной диссоциации применимы только для выделения ^{235}U из гексафторида урана, и не применимы для переработки ОЯТ, которое состоит из широкого спектра элементов с индивидуальными химическими характеристиками.

В данной статье мы представляем принципиально новый подход к проблеме – технологию “Ионное травление–Термическое разделение” (ИТ–ТР) для переработки ОЯТ с его разделением по элементному составу за счет дифференциации по температурам насыщенных паров и предлагаем один из вариантов конструкции устройства для ее реализации. Достоинство технологии заключается в свободе от многостадийности радиохимического извлечения из ОЯТ входящих в него химических элементов, сокращение объемов вторичных РАО, отсутствие ЖРО и проблем с радиационной деградацией используемых химических реагентов. Принципы технологии ИТ–ТР основаны на использовании разряда высокого давления (порядка 1 атм) для атомизации таблетки ОЯТ и последующего разделения атомарной смеси по элементному составу за счет дифференциации по температурам насыщенных паров в диффузионной разделительной трубе в потоке газа-носителя (инертного газа – Ar, или в смеси с водородом). Для анализа режимов работы разделительной трубы нами решалась трехмерная задача теплопроводности и определялось распределение температуры на внутренней поверхности разделительной трубы в потоке газа носителя в условиях дополнительного секционированного омического нагрева трубы, а также в условиях отсутствия дополнительного нагрева. Данный расчет необходим для выбора оптимальных режимов с заданным селективным разделением атомарных компонентов ОЯТ. Основные физические принципы технологии ранее были изложены нами в работах [28, 29], поэтому данная статья является их логическим развитием и ставит целью нахождение температурного режима работы диффузионной разделительной трубы для разделения заданных элементов ОЯТ при секционированном нагреве трубы с необходимыми продольными температурными градиентами.

СХЕМА РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ ДИФФУЗИОННОЙ ТРУБЫ

Реализация технология ИТ–ТР для переработки ОЯТ осуществляется в диффузионной разделительной трубе, изготовленной из тугоплавкого металла (например, вольфрама) и сформированной в виде секций с различной толщиной стенок, поддерживающихся при заданных значениях температуры посредством омического нагрева. Труба (или пучок идентичных труб для обеспечения нужной производительности) находится в вакуумной камере во избежание окисления воздухом и для уменьшения теплопотерь, при этом внешняя поверхность трубы дополнительно термически изолирована от стенок камеры посредством жаростойкой цилиндрической керамики (например, из карбида гафния). Таблетки ОЯТ, или их фрагменты стопкой помещаются внутри трубы в цилиндрическом керамическом держателе, отрицательное рабочее напряжение для плазменного разряда подается на таблетки через вольфрамовый электрод, пропущенный через керамический держатель, который обеспечивает электрическую изоляцию электрода от трубы. Ионное и термическое распыление внешнего торца первой в стопке таблетки ОЯТ или ее фрагмента осуществляется посредством зажигания разряда в потоке газа-носителя (например, аргон с добавкой водорода) между торцом таблетки ОЯТ и плоским анодом, расположенным напротив (анод не показан на рис. 1). Также в качестве анода может служить сама диффузионная разделительная труба. Рабочие параметры технология ИТ–ТР имеют следующие значения: давление в потоке газа-носителя 0.1–1 атм, скорость газа – носителя 1–10 м/с, плотность тока 1–5 А/см^2 и напряжение 100–1000 В, которые определяют мощность, выделяющуюся на таблетке ОЯТ. В этих условиях микроплазменный разряд горит однородно по внешней поверхности таблетки ОЯТ с формированием катодного слоя, распыленные атомы топлива попадают в поток газа-носителя, диффундируют в нем и осаждаются на поверхностях съемных вкладышей, распо-

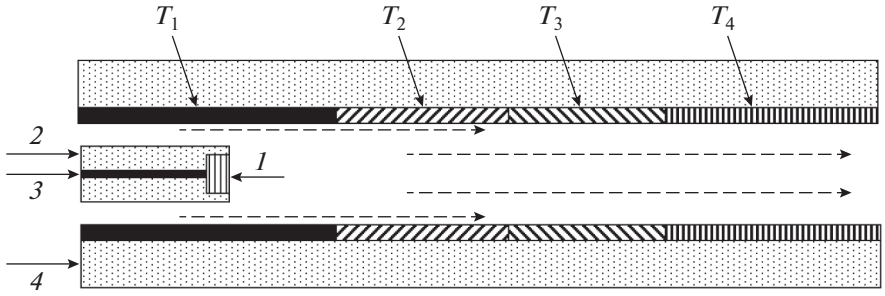

Рис. 1. Схема диффузионной разделительной трубы для реализации технологии ИТ–ТР.

ложенных внутри трубы в зоне отдельных секций, поддерживаемых омическим нагревом при заданных распределениях температуры. Схема диффузионной разделительной трубы для реализации технологии ИТ–ТР и переработки ОЯТ на примере разделения элементов U, Pu, Am, Sr, Cs приведена на рис. 1.

На рис. 1 отображены основные компоненты диффузионной разделительной трубы: *1* – таблетка ОЯТ или ее фрагменты, *2* – керамический держатель, *3* – электрод для подачи рабочего напряжения на таблетку ОЯТ, *4* – керамическая изоляция диффузионной разделительной трубы, поддерживаемой внешним омическим нагревом при различных температурах на четырех ее различных секциях, оснащенных съемными вкладышами из металлической фольги, таким образом, что величины температур удовлетворяют неравенству $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$. При этом для каждой их четырех секций распределения температуры имеют следующие значения: T_1 = 2800–2300 K, T_2 = 1400–1200 K, T_3 = 1200–950 K, T_4 = 700–600 K для наиболее эффективного разделения элементов U, Pu, Am, Sr, с учетом их процентного содержания в ОЯТ. Выбранные диапазоны температур оценены из парциальных давлений распыляемых элементов ОЯТ в потоке газа-носителя и данных о кривых давления насыщенных паров этих элементов. При выбранных диапазонах температур селективность разделения элементов U, Pu, Am, Sr по сумме атомов достигается не ниже 99.9%. Цезий, как наиболее летучий металл, конденсируется отдельно на выходе из разделительной трубы. На рис. 1 горизонтальными пунктирными стрелками слева направо показан поток газа-носителя в трубе.

Таким образом, распыленные атомы, увлеченные потоком газа-носителя, будут осаждаться на поверхности съемных вкладышей, а после исчерпания стопки таблеток ТВЭЛ (~1 сут) происходит перезарядка трубы, а вкладыши с конденсатом извлекаются из диффузионной разделительной трубы и меняются на новые. Расчетные распределения температуры на внутренней поверхности разделительной трубы и в потоке газа носителя получены для следующих геометрических параметров трубы: длинна разделительной трубы 5 м, толщина стенки трубы 5 мм, внутренний диаметр разделительной трубы 1.6 см, толщина внешней керамической теплоизоляции 10 см. При этом нами задавались источники омического нагрева внутри секций трубы, позволяющие реализовать раздельный нагрев четырех отдельных секций трубы (и вкладышей вместе с ними) до указанных выше диапазонов температуры. В следующем разделе статьи приводятся результат численного расчета распределения температурного поля на внутренней поверхности диффузионной разделительной трубы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Определение трехмерного распределения поля температуры в условиях наличия потока газа-носителя в диффузионной разделительной трубе сводится к решению самосогласованной задачи с учетом системы уравнений теплопроводности для всех компонентов разделительной трубы, согласно рис. 1 и уравнениям для потока газа-носителя. В целом геометрия задачи близка к ранее выполненным нами расчетам в статье [28], за исключением наличия дополнительных секционированных источников омического нагрева трубы, позволяющих реализовать нагрев четырех секций (вкладышей) трубы в диапазонах температуры T_1 = 2800–2300 K, T_2 = 1400–1200 K, T_3 = 1200–950 K, T_4 = 700–600 K для реализации эффективного разделения элементов U, Pu, Am, Sr, Cs из состава ОЯТ соответственно.

Согласно рис. 1, для каждой из областей T_1–T_4 в вольфрамовой диффузионной разделительной трубе решены уравнения теплопроводности:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \mathbf{q} = \alpha T \frac{dS}{dt} + Q, \qquad (1)$$

где для каждой области задаются ρ – плотность вещества, α – коэффициент термического рас-

ширения, C – теплоемкость, S – тензор напряжений Пиола–Кирхгофа; $\mathbf{q}$ – поток тепла, обусловленный механизмом теплопроводности, T – температура, Q – источники тепла.

Для области трубы, заполненной движущимся потоком газа-носителя (аргон), уравнение теплопроводности в общем виде имеет вид:

$$\rho C\frac{\partial T}{\partial t}+\mathbf{u}\nabla T+\nabla\mathbf{q}=\alpha_p T\left(\frac{\partial \rho}{\partial t}+\mathbf{u}\nabla p\right)+\tau\nabla\mathbf{u}+Q, \quad (2)$$

где ρ – плотность газа, α_p – коэффициент термического расширения газа, C – теплоемкость, S – тензор напряжений Пиола–Кирхгофа; $\mathbf{q}$ – поток тепла, обусловленный механизмом теплопроводности и конвекцией, T – температура, Q – источники тепла, $\mathbf{u}$ – скорость потока газа, p – давление, τ – тензор вязких напряжений.

Поскольку в задаче имеется движение газа-носителя (пунктирные стрелки слева на право на рис. 1), то уравнения теплопроводности (1) и (2) необходимо дополнить уравнениями движения газа, неразрывности и состояния среды:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla(\rho\mathbf{u})=0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}=-(\mathbf{u}\nabla)\mathbf{u}+\eta\Delta\mathbf{u}-\frac{\nabla p}{\rho}+\mathbf{f}, \quad (4)$$

$$\rho=\frac{p}{RT}, \quad (5)$$

где $\mathbf{f}$ – векторное поле массовых сил, R – газовая постоянная, η – коэффициент кинематической вязкости, ρ – плотность газа, $\mathbf{u}$ – скорость потока газа, p – давление.

Уравнение теплопередачи, применимое к поверхностям теплообмена:

$$Q'=\langle\alpha\rangle\delta TF, \quad (6)$$

где $\langle\alpha\rangle$ – средний по теплообменной поверхности аппарата коэффициент теплопередачи, δT – разница температур поверхности частей устройства (таблетки ОЯТ, керамического держателя, трубы) и потока газа в трубе, F – поверхность теплообмена.

Здесь мы пренебрегаем температурной деформацией, эффектом термического расширения газа и вязкой диссипацией газа. Источниками тепла Q в данной задаче являются мощность плазменного разряда (мощность выделяется на поверхности таблетки ОЯТ) и четыре дополнительных источника омического нагрева, позволяющих поддерживать указанный диапазон температур на четырех секциях трубы: T_1 = 2800–2300 K, T_2 = 1400–1200 K, T_3 = 1200–950 K, T_4 = 700–600 K. Торцы диффузионной разделительной трубы и внешней поверхности керамической изоляции поддерживаются при температуре 300 K за счет принудительного охлаждения, величина мощности плазменного разряда $1\cdot10^6$ Вт/м^2, что соответствует рабочим параметрам разряда при напряжении 100 В и плотности тока 1 А/см^2. Движение газа в разделительной трубе рассмотрено в приближении ламинарного течения с условием гладкого скольжения по стенкам трубы, скорость потока газа-носителя – 10 м/с. Исходя из расчета величины скорости поперечной диффузии распыленных атомов ОЯТ, оценены длины L для каждой из четырех отдельных секций разделительной трубы: первая секция T_1 = 2800–2300 K, длина L_1 = 2 м; вторая секция T_2 = 1400–1200 K, длина L_2 = 1 м; третья секция T_3 = 1200–950 K, длина L_3 = 1 м; четвертая секция T_4 = 700–600 K, длина L_4 = 1 м.

Как показали расчеты распределения поля температуры на внутренней поверхности разделительной трубы при нагреве таблетки ТВЭЛ только за счет разряда в отсутствии подогрева секций трубы, поле температур имеет выраженный локальный максимум в области расположения таблетки ОЯТ, что не позволяет создать нужные продольные температурные градиенты для разделения атомарных компонентов ОЯТ за счет дифференциации по температурам насыщенных паров. На рис. 2 представлен результат численного решения системы уравнений (1)–(6), а именно, распределение поля температуры вдоль внутренней поверхности вольфрамовой разделительной трубы в отсутствии дополнительных источников омического нагрева для четырех секций, указанных на рис. 1.

Результаты расчетов распределение поля температуры вдоль внутренней поверхности вольфрамовой разделительной трубы при наличии дополнительного омического нагрева для четырех секций представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что задавая неравномерное распределение внешнего дополнительного омического нагрева на четырех различных секциях диффузионной разделительной трубы, можно достичь заданного распределения температуры для эффективного раздельного осаждения атомов различных элементов, образующих ОЯТ, с учетом их температурных зависимостей давления насыщенных паров и парциальных концентраций присутствия в элементном составе ОЯТ. Данный расчет показывает вариант разделения элементов U, Pu, Am, Sr, Cs с ожидаемой селективностью не ниже 99.9%. Соответственно, элементы U, Pu, Am, Sr будут осаждаться на поверхностях съемных вкладышей, размещенных в четырех секциях внутри диффузионной разделительной трубы: первая секция T_1 = 2800–2300 K, длина L_1 = 2 м;

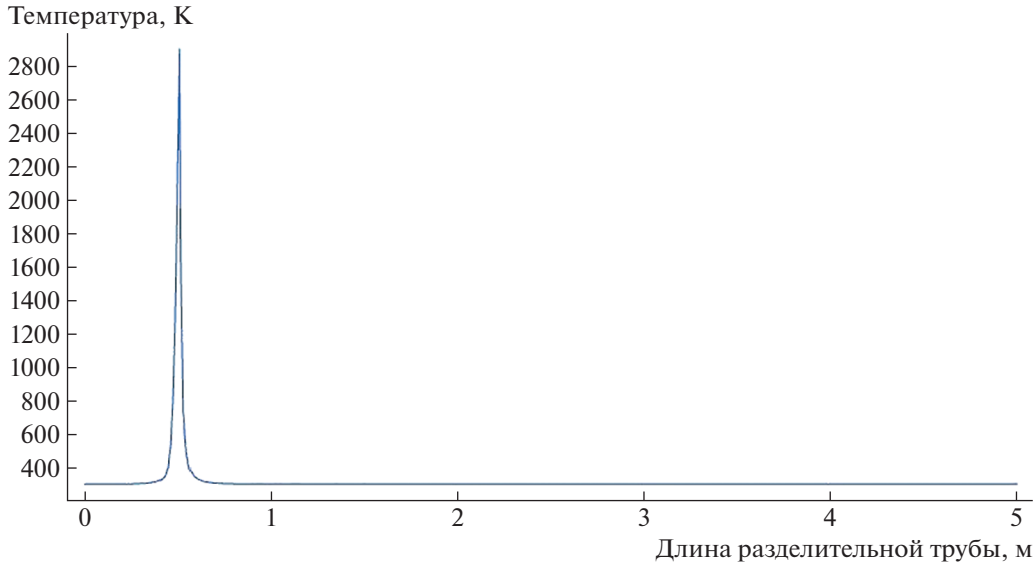

Рис. 2. Распределение температуры вдоль внутренней поверхности вольфрамовой разделительной трубы в отсутствии дополнительных источников омического нагрева.

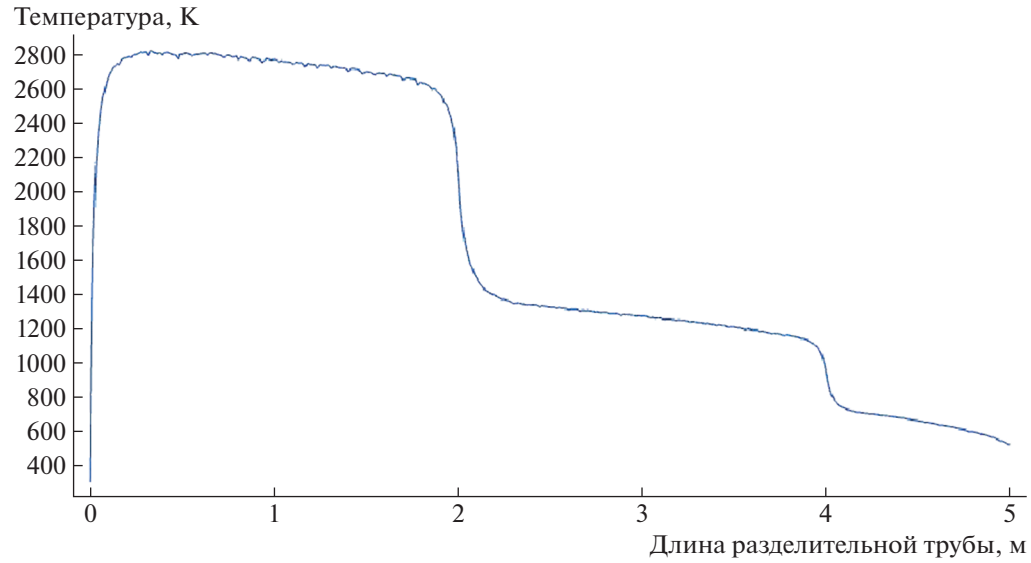

Рис. 3. Распределение температуры вдоль внутренней поверхности вольфрамовой разделительной трубы в условиях дополнительных источников подогрева.

вторая секция $T_2 = 1400–1200$ K, длина $L_2 = 1$ м; третья секция $T_3 = 1200–950$ K, длина $L_3 = 1$ м; четвертая секция $T_4 = 700–600$ K, длина $L_4 = 1$ м. Из расчета следует, что производительность переработки ОЯТ в одной разделительной трубке составляет порядка 1 кг/сут, а для достижения заданного общего объема переработки достаточно установить пучок из нужного количества трубок в камере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье предлагается принципиально новый подход для решения проблемы переработки ОЯТ и замыкания ядерного топливного цикла – технология “Ионное травление – термическое разделение” (ИТ–ТР) и один из примеров ее конструктивной реализации. Для обоснования предлагаемого варианта конструкции диффузионной разделительной трубы ИТ–ТР рассмотре-

на и решена самосогласованная задача теплопроводности и переноса в потоке газа-носителя (аргон), получены распределения температуры на внутренней поверхности разделительной трубы в условиях секционированного омического нагрева трубы со съемными вкладышами. Получены значения диапазонов температур и длин для четырех секций трубы: первая секция T_1 = 2800–2300 K, длина L_1 = 2 м; вторая секция T_2 = 1400–1200 K, длина L_2 = 1 м; третья секция T_3 = 1200–950 K, длина L_3 = 1 м; четвертая секция T_4 = 700–600 K, длина L_4 = 1 м для разделения элементов U, Pu, Am, Sr, Cs, образующих ОЯТ, с ожидаемой селективностью не ниже 99.9%. Таким образом, продемонстрирована практическая возможность разделения атомарных компонентов ОЯТ за счет дифференциации по температурам насыщенных паров на примере разделения урана, плутония, америция, стронция и цезия за счет их осаждения в потоке газа-носителя (аргон) на съемных вкладышах в диффузионной трубе. Аналогичные расчеты также могут быть выполнены по всему элементному составу ОЯТ с учетом парциальных концентраций каждого из рассматриваемых элементов и данных об их температурных зависимостях давления насыщенных паров. Полученные в статье данные могут быть использованы при разработке промышленной установки (диффузионной разделительной трубы) для переработки ОЯТ по технологии ИТ–ТР. Из описанной схемы установки видно, что при технологии ИТ–ТР процесс переработки ОЯТ происходит за один шаг в одной компактной установке; не образуются вторичные РАО, т.к. не образуются никакие химические соединения атомов, входящих в ОЯТ, за счет использования инертного газа-носителя, не возникает проблем с радиационной деградацией и распадом химических реагентов, используемых в конкурирующих радиохимических методах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Volk V.I., Arseenkov L.V., Smirnov S.I., et al.* // RF Patent No. 2603019. 2016.
2. *Stolyrevsky A.Ya.* // RF Patent No. 2556108. 2015.
3. *Zhabin A.Yu., Apalkov G.A., Smirnov S.N., et al.* // RF Patent No. 2626763. 2017.
4. *Нагурбаева М.И., Чижевская С.В., Магомедков Е.П.* // Изв. выш. учебн. завед. Усп. хим. хим. технол. 2017. № 31 (10). С. 40.
5. *Choi E.Y., Jeong S.M.* // Prog. Nat. Sci.: Mater. Int. 2015. V. 25 (6). P. 572.
6. *Bekhtenev A.A., Volosov V.I.* // Nucl. Fusion. 1980. V. 20 (5). P. 579.
7. *Xu M., Smolenski V., Liu Q., et al.* // J. Chem. Thermodyn. 2021. V. 152. P. 106260. https://doi.org/10.1016/j.jct.2020.106260
8. *Кулагин В.А., Кулагина Т.А., Матышенко А.И.* // Журн. сиб. фед. унив. Инж. технол. 2013. Т. 6 (2). С. 123.
9. *Bekhtenev A.A., Volosov V.I.* // Nucl. Fusion. 1980. V. 20. P. 579.
10. *Volosov V.I., Pekker M.S.* // Nucl. Fusion. 1981. V. 21. P. 1275.
11. *Fetterman A.J., Fisch N.J.* // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. P. 094503.
12. *Krishnan M., Geva M., Hirsheeld J.L.* // Phys. Rev. Lett. 1981. V. 46. P. 36. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.46.36
13. *Geva M., Krishnan M., Hirsheeld J.L.* // J. Appl. Phys. 1984. V. 56. P. 1398. https://doi.org/10.1063/1.334139
14. *Grossman M.W., Shepp T.A.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1991. V. 19. P. 1114.
15. *Smirnov V.P., Samokhin A.A., Vorona N.A.* // Plasma Phys. Rep. 2013. V. 39 (6). P. 523.
16. *Strokin N.A., Astrakhantsev N.V., Bardakov V.M., et al.* // RF Patent No. 2446489. 2012.
17. *Strokin N.A., Bardakov V.M., Zan V.N.* // RF Patent No. 2469776. 2012.
18. *Астраханцев Н.В., Бардаков В.М., Зан В.Н. и др.* // ВАНТ. 2010. № 4. С. 310.
19. *Астраханцев Н.В., Бардаков В.М., Зан В.Н. и др.* // Перспективные материалы. 2011. № 10. С. 80.
20. *Zhiltsov V.A., Kuligin V.M., Semashko N.N., et al.* // At. Energy. 2006. V. 101 (4). P. 302.
21. *Волосов В.И., Деменев В.В., Стешов А.Г.* // Прикладная физика. 2000. № 4. С. 22.
22. *Radziemski L.J., Solarz R.W., Paisner J.A.* (Eds.) Laser Spectroscopy and Its Applications. Optical Engineering. 1987. New York: M. Dekker. V. 11.
23. *Bokhan P.A. et al.* Laser Isotope Separation in Atomic Vapor. 2006. Berlin: Wiley-VCH.
24. *Jensen R.J., Judd O.P., Sullivan J.A.* // Los Alamos Sci. 1982. V. 4 (1). P. 2.
25. *Eerkens J.W., Kim J.* // AIChE J. 2010. V. 56. P. 2331.
26. *Cantrell C.D.* (Ed.) Multiple-Photon Excitation and Dissociation of Polyatomic Molecules. Topics in Current Physics. 1986. Berlin: Springer. V. 35.
27. *Lyman J.L.* Laser Spectroscopy and Its Applications. Optical Engineering. *Radziemski L.J., Solarz R.W., Raisner J.A.* (Eds.). 1987. New York: M. Dekker. V. 11.
28. *Петровская А.С., Цыганов А.Б., Суров С.В. и др.* // Вопросы материаловедения. 2022. № 4 (112). С. 199.
29. *Petrovskaya A.S., Tsyganov A.B., Surov S.V., et al.* // Nucl. Eng. Des. 2022. V. 386. P. 111561. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111561

Calculation of the Temperature Dictribution in Diffusion Separating Tube for the Ion Sputtering–Thermal Separation Technology for SNF Processing

A. S. Petrovskaya[1, *] and A. B. Tsyganov[1]

[1]Plasma Application Laboratory, InnoPlasmaTech LLC, St. Petersburg, 199034 Russia

**e-mail: anita3425@yandex.ru*

Received July 20, 2023; revised July 21, 2023; accepted July 24, 2023

Abstract—The paper is devoted to a fundamentally new technology – "Ion sputtering–thermal separation", which is being developed to solve the world problem of nuclear energy – the nuclear fuel cycle closing and spent nuclear fuel processing. The design of the diffusion separation tube, which is the main element for the implementation of this technology, is considered. On the basis of a numerical calculation, temperature distributions were obtained on the inner surface of the diffusion separation tube, as well as in the carrier gas flow under conditions of individual ohmic heating of certain sections of the tube with removable liners. The obtained temperature distributions make it possible to choose the optimal operating modes for the selective separation of spent nuclear fuel components.

Keywords: Nuclear fuel cycle, spent nuclear fuel reprocessing, high-pressure plasma discharge, ion sputtering – thermal separation, thermo-physical parameters, temperature distribution