

БЕЗОПАСНОЕ ОБРАЩЕНИЕ С ЯДЕРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

УДК 533.9, 533.9.02, 533.9.03, 533.9.07, 621.039, 621.039.7

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ КАМЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЕЗАКТИВАЦИИ БЛОКОВ ОБЛУЧЕННОГО ГРАФИТА РБМК

© 2024 г. А. С. Петровская^а, *, А. Б. Цыганов^а

^аЛаборатория физики плазмы, ООО “ИнноПлазмаТех”, Санкт-Петербург, 199034 Россия

*E-mail: anita3425@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.03.2024 г.

После доработки 12.04.2024 г.

Принята к публикации 23.04.2024 г.

Для дезактивации облученных графитовых блоков впервые разрабатывается новый подход “сухая” ионно-плазменная камерная технология дезактивации. Технология основана на применении однородного укороченного плазменного разряда в инертном газе (аргон) для ионной и термической обработки одновременно всех поверхностей графитового блока в специальной камере. Дезактивация графитового блока кладки реактора осуществляется посредством ионного распыления радионуклидов с его поверхностей, а также за счет их термодиффузии из объема блока благодаря нагреву плазменным разрядом. При этом технология позволяет сохранить интегральную целостность дезактивированных блоков графитовой кладки реактора для эффективного захоронения. В статье получены теплофизические параметры ионно-плазменной камерной технологии на примере дезактивации реакторного графита марки ГР-280.

Ключевые слова: ионно-плазменная технология дезактивации в камере, ядерные энергетические установки, дезактивация, облученный реакторный графит, вывод из эксплуатации, реактор большой мощности канальный

DOI: 10.56304/S2079562924060265

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент в мире не существует эффективного решения проблемы по дезактивации облученного реакторного графита. Объемы накопленного облученного реакторного графита в процессе эксплуатации ядерных реакторов составляют внушительные значения ~260 тыс. тонн в мире и порядка 60 тыс. тонн в России, включая свыше 20 тыс. тонн 11 энергоблоков РБМК (реактор большой мощности канальный). Поэтому разработка эффективных технологий дезактивации облученного графита является актуальной проблемой ядерной энергетики. Предлагавшиеся до сих пор технологии дезактивации облученного реакторного графита можно разделить на следующие принципиальные подходы: плазменное сжигание с измельчением на мелкие фракции [1–3], последовательная термическая и химическая обработка (например, [4–7]), сжигание в среде окислителя и пиролиз [8], термохимическая обработка [9, 10], плавление [11], витрификация [12] и т.д. Недостатками указанных подходов являются технические сложности установки подачи высокотемпературных потоков газов-реагентов (например, плазмотроны), увеличение объемов вторичных радиоактивных от-

ходов (РАО) за счет связывания радионуклидов со стабильными атомами реагентов, а также, в большинстве случаев, нарушение целостности графитовых блоков и их фрагментацию в процессе дезактивации, что ухудшает условия для последующего захоронения.

Также эти известные методы с использованием химических, щелочных и кислотных растворов широко применяются для дезактивации поверхностей внутриконтурного оборудования ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Другие известные на сегодня подходы к дезактивации поверхности путем механической, электрохимической или лазерной обработки также неизбежно приводят к проблемам улавливания и/или увеличения объемов вторичных РАО [13–16].

Облученные графитовые блоки ЯЭУ содержат множество радиоизотопов, среди которых наиболее активные: дозообразующий изотоп углерода — ^{14}C с периодом полураспада 5700 лет (95% активности графитовой кладки), а также — ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{137}Cs и др. Для разработки эффективной технологии дезактивации графитовых блоков необходимо учитывать данные о пространственном распределении в них радионуклидов, прежде всего изотопа

^{14}C . Согласно экспериментальным исследованиям пространственной структуры облученного графита (см, например [17–21]) методами сканирующей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и др., изотоп ^{14}C сконцентрирован на глубине порядка 5 мм и менее от поверхности. Преимущественно поверхностная локализация изотопа ^{14}C в облученных графитовых блоках РБМК объясняется двумя факторами:

1. Формирование изотопа ^{14}C в результате нейтронного облучения ^{14}N из азотно–гелиевой смеси, обеспечивающей охлаждение графитовой кладки РБМК в период эксплуатации, и последующим выпадением изотопа ^{14}C на поверхность графитовых блоков [22].

2. Нейтронной активацией азота, диффундировавшего из окружающей газовой атмосферы в приповерхностные слои реакторного графита в силу пористой структуры реакторного графита и его развитой поверхности [23, 24], что согласуется с данными [17–21].

Таким образом, на основе данных о физико-химическом составе графитовых блоков и процессе их эксплуатации, можно сформулировать экономически и технически оптимальные требования к эффективной технологии дезактивации:

а) необходимо обеспечить быструю дезактивацию всего графита в выводимом из эксплуатации реакторе (в пределах 3–5 лет), поскольку длительное (планируемое сегодня на 20–30 лет) непроизводительное сохранение персонала на выведенных из эксплуатации АЭС является крайне затратным финансово (до 1 млрд руб. в год на один энергоблок);

б) необходимо сохранение интегральной целостности графитовых блоков, т.к. их углеродная матрица обладает очень высокой физической и химической устойчивостью и служит высокостабильным контейнером для остаточных радионуклидов при захоронении;

в) необходимо учитывать преимущественно поверхностную локализацию изотопа ^{14}C в графитовых блоках, с целью удаления, в первую очередь, в концентрированной твердой форме с поверхности облученного графита высокоактивного слоя, обогащенного изотопом ^{14}C , который затем компактно (несколько десятков кубометров) размещается в пунктах глубинного захоронения (ПГЗРО) как РАО 1-го класса опасности. После обработки оставшаяся масса графита перейдет из 2-го класса в 3-й класс опасности РАО, что резко снижает требования и затраты на его захоронение;

г) необходимо учитывать особенности локализации большинства радионуклидов (кроме ^{14}C) в графитовых блоках, которые находятся в виде интеркалированных атомов между графен-графеновыми слоями и при этом слабо связаны с атомами

углерода. Поэтому раскрытие доступа с поверхности графитового блока к межграфеновым слоям и создание условий для термодиффузии интеркалированных атомов к поверхности позволит удалить неуглеродные радионуклиды без нарушения целостности блока.

Разрабатываемый нами новый подход в виде “сухой” ионно-плазменной камерной технологии дезактивации основан на применении однородного укороченного микро-плазменного разряда в инертном газе (аргон, при давлении порядка атмосферного) по всей поверхности каждого блока графитовой кладки РБМК, помещенного в дезактивационную камеру. Технология обеспечивает выполнение заявленных требований: удаление с поверхности графитового блока основного дозообразующего элемента (изотоп ^{14}C) посредством ионного распыления, а также удаление интеркалированных радионуклидов, образованных в объеме графитового блока, за счет термодиффузии при нагреве обрабатываемого блока до температур порядка 2000 К без разрушения интегральной целостности графитового блока.

В предыдущих работах нашей научной группы [25–28], а также в описании патентов на технологию, полученных нами совместно с “Концерном Росэнергоатом” и ГК “Росатом” [29–31], приводятся параметры ионно-плазменной технологии дезактивации реакторного графита и металлоконструкций ЯЭУ с использованием портативной распылительной ячейки, позволяющей осуществлять распыление и прогрев выбранных локальных пятен на обрабатываемой поверхности последовательно, шаг за шагом.

Настоящая статья является новым направлением в разработке ионно-плазменной технологии, основанной на применении специальной камеры для эффективной и быстрой дезактивации сразу всех поверхностей извлекаемых из реактора графитовых блоков (без разрушения их интегральной целостности). Нами выполнен численный расчет поля распределения температур дезактивируемого графитового блока в камере в зависимости от времени и вкладываемой мощности в разряд, определены времена нагрева и остывания графитового блока на примере дезактивации блока реакторного графита марки ГР-280, используемого в РБМК.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящем разделе определены теплофизические параметры ионно-плазменной камерной технологии дезактивации, полученные посредством решения нестационарной задачи теплопроводности для дезактивируемого графитового блока с габаритами $25 \times 25 \times 60$ см из кладки РБМК. Графитовый блок, извлеченный из кладки реактора манипулятором, помещается в специаль-

ную дезактивационную камеру, наполненную инертным газом (аргон) при давлении 1 атм., стенки камеры снаружи поддерживаются при температуре 300 К за счет системы охлаждения. Идея ионно-плазменной камерной технологии дезактивации заключается в одновременной ионно-плазменной обработке всех поверхностей графитового блока, помещенного в дезактивационную камеру. Обработка осуществляется под действием укороченного разряда в среде аргона, зажигаемого одновременно между шестью обрабатываемыми поверхностями блока и подведенными параллельно к ним шестью плоскими танталовыми электродами. Танталовые электроды устанавливаются на линейных приводах с шаговыми двигателями внутри дезактивационной камеры на расстоянии порядка 1 мм от каждой поверхности графитового блока и каждый из них имеет площадь, равную площади противолежащей поверхности блока. При указанной конфигурации устройства анодами разряда являются танталовые электроды, а катодами — грани обрабатываемого графитового блока, а плазменный разряд горит однородно по всей поверхности графитового блока за счет малого межэлектродного расстояния и отсутствия контракции.

Под действием такого плазменного разряда происходят два процесса одновременно:

1) ионное и термическое распыление атомов поверхности графитового блока (катода), диффузия распыленного материала в газе (аргон) без образования вторичных химических соединений и последующее осаждение распыленных атомов на танталовых электродах (аноды). Таким образом, осуществляется удаление с поверхности графитового блока дозообразующего (более 90% активности) элемента — изотопа ^{14}C , что позволит достичь снижение активности облученного реакторного графита до 3-го класса опасности РАО, а также обеспечить компактное извлечение ^{14}C в концентрированной форме для захоронения по 1-му или 2-му классу;

2) равномерный со всех сторон и по всему объему графитового блока термический прогрев (равномерное поле температуры), достигаемый за счет воздействия разряда по всему периметру блока, что обеспечивает термодиффузию к поверхности блока образованных в его объеме неуглеродных радионуклидов, причем без разрушения интегральной целостности графитового блока.

В настоящей статье мы не касаемся других особенностей устройства дезактивационной камеры, т. к. выбор теплофизических параметров ионно-плазменной технологии (распределение поля температур, длительность нагрева и остывания графитового блока) для конкретного графитового блока, главным образом, будут зависеть от вкладываемой мощности в разряд, габаритов графитового блока, его

радионуклидного состава и физических свойств, в зависимости от марки и условий облучения в реакторе. В наших предыдущих исследованиях [25–31] рассматривалась ионно-плазменная технология дезактивации реакторного графита с использованием портативной распылительной ячейки, которая обеспечивала дезактивацию за счет локального ионного и термического распыления поверхности графита, однако без равномерного термического прогрева всего дезактивируемого блока и термодиффузии радионуклидов из объема блока. Параметры плазменного разряда при дезактивации графитового блока в камере имеют следующие значения: давление аргона в камере от 0.1 до 1 атм., напряжение на разрядом промежутке 300–1000 В, плотность тока разряда $0.001\text{--}2\text{ А/см}^2$, величина разрядного промежутка (расстояние между анодом и катодом в виде обрабатываемого блока графита) — порядка 1 мм. Возникающий в этих условиях плазменный разряд является пространственно однородным, за счет исключения возможности контрагирования и образования стримеров.

В общем виде постановка трехмерной задачи теплопроводности состоит в согласованном решении нестационарных уравнений теплопроводности для двух областей: графитового блока (1) и газового промежутка (2) толщиной $\sim 1\text{ мм}$ (плазменный разряд в аргоне):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \mathbf{q} = Q, \quad (1)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \mathbf{q} = Q, \quad (2)$$

где $\mathbf{q} = -k \nabla T$, ρ — плотность [кг/м^3], C_p — теплоемкость [$\text{Дж/кг} \cdot \text{К}$], k — коэффициент теплопроводности [$\text{Вт/м} \cdot \text{К}$], Q — тепловой поток на поверхности графитового блока, возникающий за счет удельной мощности плазменного разряда [Вт/м^3], $\mathbf{u}$ — скорость потока газа [м/с], которой можно пренебречь в настоящих условиях. Также в данной задаче учитывается излучение с поверхности графитового блока в виде теплового потока, пропорционального σT^4 по закону Стефана—Больцмана, где σ — постоянная Стефана—Больцмана, T — температура поверхности графитового блока. Также считаем, что внешние стенки дезактивационной камеры принудительно охлаждаются до фиксированной температуры 300 К.

Были рассчитаны распределения поля температуры внутри графитового блока в зависимости от времени и от вкладываемой мощности в плазменный разряд для графитового блока марки ГР-280.

В табл. 1 представлены численные значения температур T , при которых достигается равномерный прогрев графитового блока по всему объему и времени t для достижения равномерного прогрева в зависимости от вкладываемой мощности Q .

Таблица 1. Численные значения температур при равномерном прогреве графитового блока в зависимости от времени действия и мощности разряда

$Q, \text{Вт/м}^2$	$T, \text{К}$	$t, \text{с}$
$2 \cdot 10^6$	2566	1200
$1 \cdot 10^6$	2155	1800
$5 \cdot 10^5$	1800	2000
$2.5 \cdot 10^5$	1500	2200
$1 \cdot 10^5$	1172	2400

В данном расчете величины мощности выбирались с учетом допустимых значений тока разряда и напряжения при зажигании укороченного плазменного разряда высокого (вплоть до атмосферного) давления в аргоне, а также ограничений, позволяющих предотвратить перегрев или расплавление танталовых электродов и других элементов дезактивационной камеры. В качестве одного из режимов дезактивации графитового блока может быть выбрана мощность $1 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$, при которой максимальное значение температуры по всему объему графитового блока составляет 2155 К. Как упоминалось выше, температурный режим обработки можно выбирать с учетом марки графита и его радионуклидного состава, но в данной работе температурный режим выбирался только с учетом физических свойств графита марки ГР-280, без относительно его радионуклидного состава. Учет радионуклидного состава и роли термодиффузии радионуклидов из объема графитового блока является отдельной задачей, которая будет рассмотрена в следующих статьях.

На рис. 1 и 2 представлены поперечные сечения температурного распределения внутри графитового блока шириной 25 см (габариты блока

$25 \times 25 \times 60 \text{ см}$) при вкладываемой мощности $1 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$, длительности нагрева 1800 с и последующем остывании. Рисунок 1 иллюстрирует изменение распределения температурного поля по ширине графитового блока (с шагом по времени 50 с) от момента зажигания разряда при температуре блока 300 К и до достижения равномерного прогрева при температуре 2155 К по всему объему графитового блока (через 1800 с после зажигания).

Температурные распределения при остывании графитового блока до температуры 640 К в течение первых 4200 с после выключения плазменного разряда приведены на рис. 2.

Аналогичным образом определены значения температуры, при которых достигается равномерный прогрев графитового блока для других значений мощности разряда, соответствующие данные приведены в табл. 1.

Стоит отметить, что в процессе остывания графитового блока наибольший градиент температуры наблюдается в первые 4000 с после выключения плазменного импульса, соответствующие распределения приведены на рис. 2. Дальнейшее остывание графитового блока происходит существенно медленнее, а именно, достижение температуры графитового блока до значения порядка 300 К наблюдается за время порядка 25 000 с.

Согласно поставленной задаче теплопроводности, уравнениям (1) и (2), а также указанным выше граничным условиям, нами выполнен численный расчет температуры поверхности графитового блока марки ГР-280 в процессе его ионно-плазменной дезактивации под действием укороченного плазменного разряда и последующего остывания в дезактивационной камере в зависимости от времени при различных значениях вкладываемой мощности в разряд. Данные зависимости приведены на рис. 3, где символы 1, 2, 3, 4 и 5

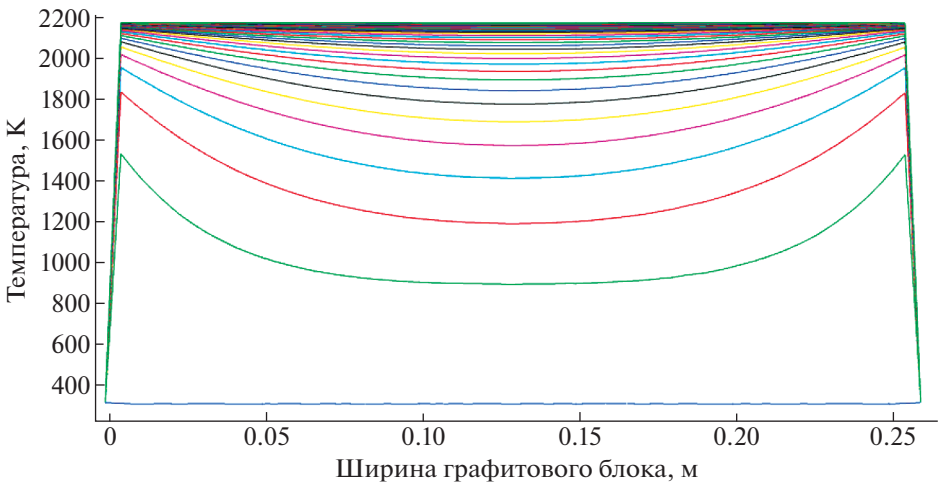


Рис. 1. Сечения температурных распределений внутри графитового блока под воздействием плазменного разряда.

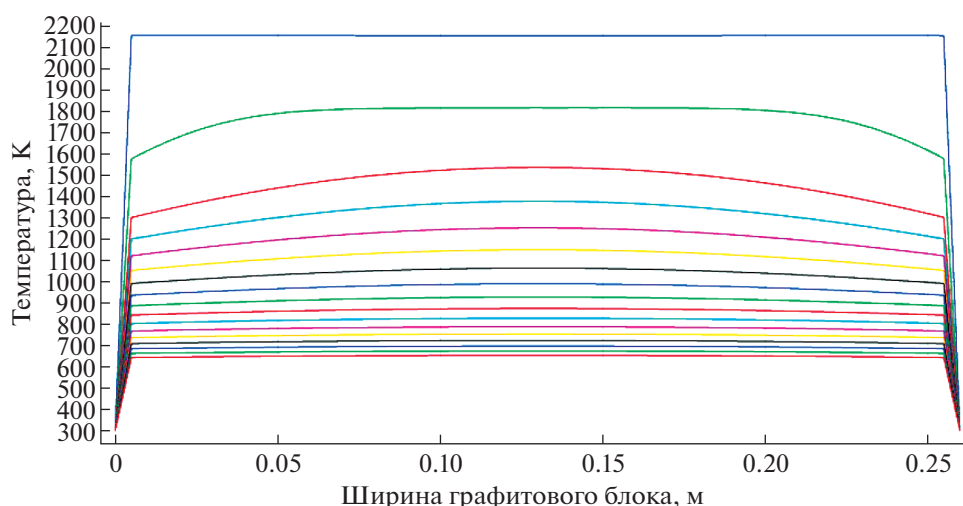


Рис. 2. Сечения температурного распределения внутри графитового блока при остывании от 2155 до 640 К.

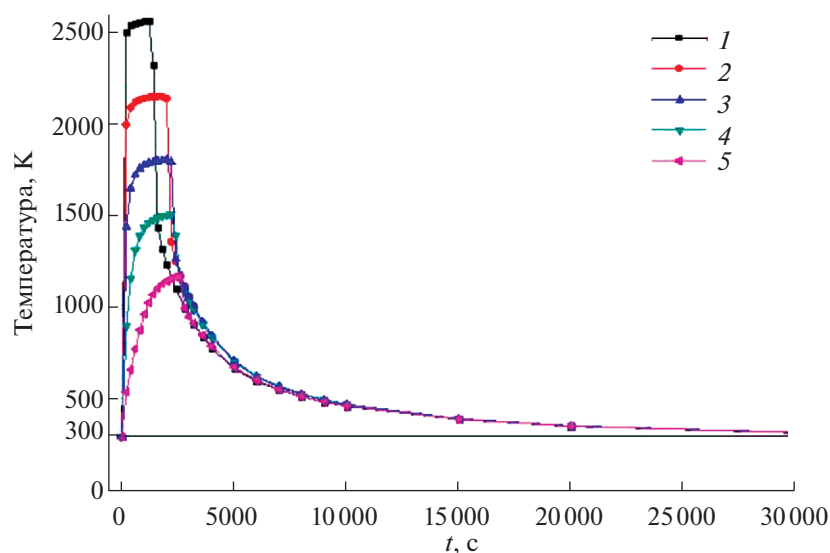


Рис. 3. Температуры поверхности графитового блока в зависимости от времени при разных значениях плотности мощности разряда.

обозначают температурные кривые при мощности 2, 1, 0.5, 0.25, и 0.1 МВт/м² соответственно.

Из полученных нами данных для реакторного графита марки ГР-280 характерные времена нагрева при различных значениях мощности плазменного разряда составляют величины в диапазоне 1200–2400 с, а характерное время остывания до приемлемой температуры извлечения из камеры (~300 К) составляет порядка 5 ч. Для уменьшения общего времени дезактивации всего реакторного графита РБМК целесообразно одновременное использование нескольких дезактивационных камер. Механизм ионно-плазменного распыления и температурный прогрев поверхности графитово-

го блока в первые 200 с дезактивации обеспечивают ионно-термическое распыление поверхностного слоя реакторного графита с удалением дозобразующего радионуклида ¹⁴C, а также радионуклидов, локализованных в поверхностном слое. Последующий равномерный прогрев графитового блока позволяет реализовать удаление посредством термодиффузии интеркалированных в объеме графитового блока неуглеродных радионуклидов без разрушения интегральной целостности графитового блока.

Аналогичные расчеты распределений поля температур в зависимости от времени и скорости нагрева и остывания могут быть выполнены для

блоков кладочного реакторного графита различных габаритов и марок, при этом оптимальный температурный режим может быть выбран с учетом состава радионуклидов и его пространственного распределения в графитовых блоках и с учетом влияния процессов термодиффузии радионуклидов из графитовой матрицы. Дополнительно, технология ионно-плазменной дезактивации с использованием портативной распылительной ячейки может непосредственно применяться для удаления радиоактивных загрязнений (представляющих собой, как правило, оксиды радиоактивных металлов) с внутренних поверхностей оборудования и трубопроводов первого контура реакторных установок [26]. Это позволяет использовать заявленную технологию для комплексного решения задач дезактивации металлоконструкций ядерных энергетических установок как при плановых остановках и ремонтах, ЯЭУ так и при выводе из эксплуатации. Также основные принципы ионно-плазменной технологии использованы нами для разработки нового подхода к решению глобальной проблемы ядерной энергетики — переработке отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и замыканию ядерного топливного цикла — в виде ионно-термической технологии переработки ОЯТ с разделением по элементному составу [32, 33].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен принципиально новый подход для дезактивации с сохранением целостности облученных графитовых блоков из кладки реактора: “сухая” ионно-плазменная камерная технология. На примере графитового блока марки ГР-280 из кладки реактора РБМК выполнен расчет теплофизических параметров ионно-плазменной технологии — пространственного распределения температурного поля в графитовом блоке в процессе его нагрева под воздействием однородного укороченного плазменного разряда в дезактивационной камере, а также в процессе последующего его остывания в зависимости от времени и от вкладываемой плотности мощности в разряд в диапазоне 0.1–2 МВт/м². С учетом физических свойств графита марки ГР-280 и ограниченный свойств материалов для изготовления элементов дезактивационной камеры в первом приближении (без учета процессов термодиффузии радионуклидов из объема графитового блока) для дезактивации рекомендуется режим равномерного прогрева графитового блока до температуры не выше 2200 К.

С учетом общего рассмотрения физических свойств и морфологии реакторного графита на основе данных литературного обзора и актуальности быстрого решения проблемы дезактивации, в статье сформулированы основные экономические и технически оптимальные критерии для выбора эф-

фективной технологии дезактивации. На основе физических принципов ионно-плазменной камерной технологии дезактивации графитовых блоков и полученных результатов показано, что технология удовлетворяет сформулированным критериям: обеспечение быстрой дезактивации всего объема облученного графита из реактора РБМК, учет пространственной локализации радионуклидов в графитовом блоке для выбора наиболее эффективных температурных режимов дезактивации, обеспечение в процессе дезактивации интегральной целостности графитовых блоков для упрощения последующего захоронения, существенное сокращение объемов вторичных РАО, снижение Класа радиационной опасности дезактивированного графита посредством ионного и термического удаления основного дозообразующего изотопа ¹⁴C и других радионуклидов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00321, <https://rscf.ru/project/24-29-00321/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Gurau D., Deju R. // Radiat. Phys. Chem. 2015. V. 106 (1). P. 371.
2. Romenkov A.A., Tuktarov M.A., Sudareva N.A., et al. // Ann. Report. 2012. Moscow: NIKIET JSC.
3. Podruzhina T. // Report No. Juel-4166. 2004. Jülich: Forschungszentrum Jülich in der Helmholtz-Gemeinschaft. P. 127.
4. Dmitriev S.A., Karlina O.K., Klimov V.L., et al. // Patent RU No. 2192057. 2002.
5. Romenkov A.A., Tuktarov M.A., Karlina O.A., et al. // Patent RU No. 2546981. 2015.
6. Cleaver J., McCrory S., Smith T.E., Dunzik-Gougar M.L. // WM Conf. 2012. Phoenix, Arizona, USA.
7. Fachinger J., von Lensa W., Podruzhina T. // Nucl. Eng. Des. 2008. V. 238. P. 3086.
8. Mason J.B., Bradbury D. // Nucl. Energy. 2000. V. 39 (5). P. 305.
9. El-Genk M.S., Tournier J.P. // J. Nucl. Mater. 2011. V. 41. P. 193.
10. Ojovan M.I., Lee W.E., Sobolev I.A., et al. // Proc. Inst. Mech. Engin., Part E: J. Process Mechanical Engineering. 2004. V. 218 (4). P. 261.
11. Womack R.K. // Met. Mater. Soc. 1999. V. 51 (10). P. 14.
12. Lee W.E., Ojovan M.I., Stennett M.C., Hyatt N.C. // Adv. Appl. Ceram. 2006. V. 105 (1). P. 3.
13. Алешин А.М., Змитродан А.А., Кривобоков В.В. // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. 2019. № 4 (18). С. 34.
14. Kim S.W., Park S.Y., Roh C.H., et al. // Nucl. Engin. Technol. 2022. V. 54. P. 2329.
15. Wood C.J. // Prog. Nucl. Energy. 1990. V. 23. P. 35.
16. Liu S., He Y., Xie H. // Sustainability. 2022. V. 14. P. 4021.

17. LaBrier D., Dunzik-Gougar M.L. // J. Nucl. Mater. 2014. V. 448. P. 113.
18. Dunzik-Gougar M.L., Smith T.E. // J. Nucl. Mater. 2014. V. 451. P. 328.
19. LaBrier D., Dunzik-Gougar M.L. // J. Nucl. Mater. 2015. V. 460. P. 174.
20. Vulpius D., Baginski K., Fischer C., Thomauske B. // J. Nucl. Mater. 2013. V. 438. P. 163.
21. Payne L., Heard P.J., Scott T.B. // PLoS ONE. 2016. V. 11 (10). P. e0164159. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164159>
22. Петровская А.С., Кладков А.Ю., Суров С.В., Цыганов А.Б. // ВАИТ. Сер.: Ядерно-реакторные константы. 2018. Т. 4. С. 185.
23. Contescu C.I., Arregui-Mena J.D., Campbell A.A., Edmondson P.D. et al. // Carbon. 2019. V. 141. P. 663.
24. Laudone G.M., Gribble C.M., Matthews G.P. // Carbon. 2014. V. 73. P. 61.
25. Petrovskaya A.S., Tsyganov A.B., Kladkov A.Yu., Surov S.V., et al. // Proc. Int. Conf. Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech). 2021. P. 164. <https://doi.org/10.1109/EEExPolytech53083.2021.9614889>
26. Petrovskaya A.S., Tsyganov A.B. // Phys. Solid State. 2023. V. 65 (12). P. 2184.
27. Petrovskaya A.S., Tsyganov A.B., Surov S.V., Blokhin D.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87 (10). P. 1552. <https://doi.org/10.3103/S1062873823703689>
28. Петровская А.С., Кладков А.Ю., Суров С.В., Блохин Д.А., Цыганов А.Б. // Ядерная физика и инжиниринг. 2023. Т. 14 (2). С. 131. [Petrovskaya A.S., Kladkov A.Yu., Surov S.V., Blokhin D.A., Tsyganov A.B. // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85. P. 1992. <https://doi.org/10.1134/S1063778822100416>. <https://doi.org/10.56304/S2079562922050359>
29. Petrovskaya A.S., Tsyganov A.B., Stakhiv M.R. // Patent RU No. 2711292. 2020.
30. Petrovskaya A.S., Tsyganov A.B., Stakhiv M.R. // Int. Patent Appl. WO2019RU00816, US Patent Appl. US20210272715, European Patent Appl. EP19888171.6, Canada Patent Appl. CA3105179A1, CN112655056Aю 2021.
31. Petrovskaya A.S., Tsyganov A.B. // Patent RU No. 2771172. 2022.
32. Petrovskaya A.S., Tsyganov A.B., Surov S.V., Kladkov A.Yu. // Nucl. Eng. Des. 2022. V. 386. P. 111561.
33. Петровская А.С., Цыганов А.Б., Суров С.В., Блохин Д.А. // Вопросы материаловедения. 2022. Т. 4 (112). С. 199–211. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-112-4-199-211>

Thermophysical Parameters of Ion-Plasma Chamber Technology for Deactivation of Irradiated Graphite of RBMK

A. S. Petrovskaya¹ * and A. B. Tsyganov¹

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

*e-mail: anita3425@yandex.ru

Received March 10, 2024; revised April 12, 2024; accepted April 23, 2024

Abstract—A new “dry” ion-plasma chamber deactivation technology is developed for the first time to deactivate irradiated graphite blocks. The technology is based on a homogenous shortened plasma discharge in an inert gas (argon) for the ion and thermal treatment of all graphite block surfaces simultaneously in a special chamber. The deactivation of graphite block of the reactor masonry is carried out by the ion sputtering of radionuclides from the block surfaces, as well as due to the thermal diffusion of radionuclides from the graphite block volume under plasma discharge heating. The technology provides a maintenance of the graphite masonry blocks integrity during the deactivation process for the effective burial of radionuclides. The thermophysical parameters of the ion plasma in chamber technology for the deactivation of the grade GR-280 reactor graphite have been obtained.

Keywords: ion plasma chamber deactivation technology, nuclear power plants, deactivation, irradiated reactor graphite, nuclear plant decommission, high-power channel-type reactor