

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

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

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЕЗАКТИВАЦИИ

© 2026 г. А. С. Петровская^а, *, А. Б. Цыганов^а

^аЛаборатория физики плазмы, ООО “ИнноПлазмаТех”, Санкт-Петербург, 191036 Россия

*E-mail: anita3425@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.09.2025 г.

После доработки 10.09.2025 г.

Принята к публикации 16.09.2025 г.

Статья посвящена разрабатываемой ионно-плазменной технологии для решения проблем дезактивации облученного реакторного графита и внутриконтурного оборудования, а также проблем вывода из эксплуатации различных видов ядерных реакторов. Рассмотрены особенности технической реализации устройства для дезактивации и системы охлаждения электрода-коллектора для осаждения на нем удаляемых плазмой “укороченного” разряда с поверхности внутриконтурного оборудования и облученного графита радионуклидов. Обсуждаются физические и теплотехнические процессы, лежащие в основе ионно-плазменной “сухой” технологии. Расчетным путем получены распределения температур на электроде-коллекторе и в охлаждающем потоке системы водяного охлаждения электрода-коллектора. Найдены рабочие параметры технологии для дезактивации облученного реакторного графита и металлоконструкций ЯЭУ: давление инертного газа 0.1–1 атм., плотность тока укороченного разряда 0.1–1 А/см², напряжение на разрядном промежутке 100–1000 В. Получено, что при плотности мощности укороченного разряда $1 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^5$, $5 \cdot 10^5$ и $1 \cdot 10^6$ Вт/м² для охлаждения электрода-коллектора требуется скорость потока водяного охлаждения порядка 1 м/с.

Ключевые слова: облученный реакторный графит, сухая дезактивация, металлоконструкции ядерных энергетических установок, внутриконтурное оборудование, вывод из эксплуатации, устройство для дезактивации, система охлаждения

DOI: 10.56304/S207956292602003X

ВВЕДЕНИЕ

Одна из важных проблем эксплуатации ядерных энергетических установок (ЯЭУ) заключается в радионуклидном загрязнении внутренних поверхностей оборудования и трубопроводов первого контура. Традиционные радиохимические подходы приводят к неизбежному формированию больших объемов вторичных радиоактивных отходов (РАО), поэтому поиск новой эффективной технологии для дезактивации поверхностей конструкционных элементов ЯЭУ, как при плановых ремонтах, так и в процессе вывода из эксплуатации, является актуальной задачей. Радиоактивные загрязнения поверхностей внутриконтурного оборудования содержат активированные продукты коррозии конструкционных материалов, а также продукты деления ядерного топлива при нарушении герметичности оболочек тепловыделяющих элементов, которые далее переносятся теплоносителем по всей реакторной установке. Химический и элементный состав слоя радиоактивных загрязнений на внутренних поверхностях трубопроводов, а также величина активности зависят от времени и режимов эксплуатации реакторной установки, а также от ее типа. На-

пример, при длительной эксплуатации реакторных установок активность γ -излучающего изотопа ⁶⁰Со составляет не менее 90% от общей активности слоя поверхностных осадков. Основным источником радиоактивного кобальта являются продукты коррозии нержавеющей стали, содержащей 10% никеля, в которых много примесей кобальта, причем сечение поглощения нейтронов природным изотопом ⁵⁹Со очень велико, на три порядка величины больше по сравнению с другими металлами стали. По данным ряда работ (например, [1, 2]), посвященных обследованию химического состава и активности радиоактивных коррозионных отложений на внутренних поверхностях оборудования реакторных установок, эти отложения содержат металлы Fe, Mn, Ni, Ti, Zr, Cr, продукты топливной композиции, их оксиды Fe₂O₄, TiO₂, U₃O₈, PuO₂, UO₂, а также более сложные соединения в форме шпинелей, например, феррит никеля Ni_xFe_(3-x)O₄ ($x < 3$), смешанных ферритов кобальта и никеля с общей формулой (CoO)_x(NiO)_y(FeO)_(1-x-y)Fe₂O₃, где $1 > y \geq x$.

Для того, чтобы правильно оценить сравнительные преимущества и недостатки новых подходов к дезактивации, необходимо с начала подробно рассмотреть технические, экологические и экономические особенности технологий, которые используются для этих целей сегодня. В настоящий момент широко применяемым подходом к дезактивации внутриконтурного оборудования реакторов являются радиохимические технологии растворения отложений, в которых применяются водные растворы, растворы слабых и сильных кислот (соляная, азотная, серная, фосфорная кислоты, щавелевая кислота, сульфаминовая кислота и др.), соли слабых и сильных кислот (гидросульфат натрия, сульфат натрия, фторид натрия и др.) или щелочи (гидроксид калия, гидроксид натрия и др.) [3, 4]. Выбор типа раствора, его концентрации зависит от химического состава загрязнений, что устанавливается эмпирическим путем и относится к недостаткам всех химических способов дезактивации. Вторым значительным недостатком является увеличение объемов вторичных РАО, что создает дополнительную проблему их дезактивации и хранения [5, 6]. Третий недостаток – это коррозия металла и деградация уплотнений внутриконтурного оборудования реакторов при традиционной радиохимической дезактивации. Безреагентные методы дезактивации (свободные от кислот и щелочей), в которых также используются растворы – например, дезактивация принудительной циркуляцией теплоносителя, кислородная безреагентная дезактивация, использование барботажного режима и др., показали меньшую эффективность по сравнению с химическими методами. Известны также механические способы дезактивации поверхностей, например, дробеструйный, пескоструйный, вакуумный методы, но к их недостаткам относятся неудобный доступ к загрязненным поверхностям и образование радиоактивной пыли при обработке [7–9]. Модификации химических методов с использованием разного вида дополнительных воздействий (ультразвукового, электролитического, ударно-волнового воздействия и др.) имеют все те же недостатки, что и чисто химические, т. к. приводят к формированию значительных объемов вторичных РАО. В последние годы стал развиваться лазерный метод дезактивации поверхности, который в настоящий момент является относительно дорогим, встречает сложности при улавливании и компактизации распыленного лазером облака радиоактивных отложений с обрабатываемой поверхности, а также обладает низкой производительностью вследствие малой площади обрабатываемой поверхности лазерным лучом в единицу времени.

Второй актуальной проблемой является переработка облученного реакторного графита и вывод из эксплуатации уран-графитовых реакторов. Мировой парк энергетических и промышленных

уран-графитовых реакторов насчитывает более 120 единиц (типы реакторов: РБМК – реактор большой мощности канальный, ЭГП – энергетический гетерогенный петлевой, АМБ – атомный мощный большой, MAGNOX – газоохлаждаемый реактор с графитовым замедлителем, GCR – газоохлаждаемый ядерный реактор, AGR – улучшенный реактор с газовым охлаждением, LWGR – легководный графитовый реактор и др.). Графит использовался в качестве замедлителя в таких распространенных типах энергетических реакторов как легководные реакторы LWGR (в СССР – РБМК), газоохлаждаемые MAGNOX и AGR (преимущественно в Великобритании), промышленные реакторы в США и др. Объем накопленных в мире запасов облученного графита оценивается до 260 тыс. тонн, в России – в 50–60 тыс. тонн [10–13]. В настоящее время в России остро стоит проблема вывода из эксплуатации 11 энергоблоков РБМК с общим объемом графита порядка 20 тыс. тонн при многомиллиардных расходах на консервацию в связи с планами просто содержать остановленные реакторы 25 лет и при отсутствии какой-либо принятой к исполнению технологии дезактивации графита после окончания этого срока.

Кроме этого, в настоящее время ведутся и новые разработки уран-графитовых реакторов: в Японии (HTTR – высокотемпературный инженерный испытательный реактор), Китае (реактор – TRIS-10) и ЮАР (PMBR – южноафриканская адаптация технологий высокотемпературных реакторов из Германии). Из всех энергетических уран-графитовых реакторов в настоящее время продолжают эксплуатироваться 8 реакторов РБМК и 3 реактора ЭГП в России, 14 реакторов AGR в Великобритании, 4 реактора в Китае и исследовательский реактор UNGG в Бельгии.

Эта проблема вывода из эксплуатации обостряется отсутствием в мире эффективного решения проблемы утилизации облученного реакторного графита. В качестве основной “технологии” рассматривается глубинное захоронение: например, для АЭС с реакторами типа РБМК концепция вывода из эксплуатации предусматривает демонтаж реактора с упаковкой графитовых отходов в контейнеры и их вывозом на захоронение. Графит кладок энергетических уран-графитовых реакторов, в основной массе – более 80%, относится к классу 2 опасности и подлежит захоронению в ПГЗРО (пунктах глубинного захоронения радиоактивных отходов) на глубине более 100 м от поверхности. Рассматривавшиеся методы переработки (компактирования или кондиционирования) графита представляют собой, в большинстве случаев, радиохимические методы, различные вариации термообработки (сжигания), высокотемпературного окисления или кислотного травления [14–18]. Данные подходы многостадийные, сложные и влекут в результате просто умножение объе-

мов радиоактивных отходов (порядка 8-ми кратно-го увеличения объемов ЖРО), а также приводят к проблеме сбора (улавливания) образующихся летучих соединений радиоуглерода. При этом долгоживущий радионуклид ^{14}C (период полураспада — 5730 лет), являющийся основным дозообразующим элементом в графитовой кладке, будучи выпущенным в атмосферу при сжигании, имеет свойство активно включаться в биологические цепочки и приводить к внутреннему облучению живых организмов.

Известно, что радионуклид ^{14}C формирует до 95% активности графитовой кладки и образуется в процессе эксплуатации реактора при нейтронном облучении азота, содержащегося в азотно-гелиевой газовой смеси, используемой для охлаждения (продувки) графитовых блоков промышленных и энергетических уран-графитовых реакторов. Экспериментальные исследования распределения активности в графитовых блоках показывают, что ^{14}C локализуется в приповерхностном слое графита на глубине не более 5 мм, что связано с адсорбцией молекулярного азота на поверхности, в порах графита, по границам кристаллитов и его нейтронной активацией с образованием радионуклида ^{14}C [19–23]. Доля радионуклида ^{14}C , образованного по этому механизму, оценивается до 90% от его общего содержания в объеме графитового блока, поэтому при разработке эффективной технологии дезактивации облученного реакторного графита необходимо, в первую очередь, принимать во внимание его приповерхностное распределение.

Для решения проблемы переработки облученного реакторного графита и дезактивации внутриконтурного оборудования реакторов нами разрабатывается принципиально новый подход — ионно-плазменная “сухая” технология дезактивации, основанная на применении укороченного разряда в инертном газе (аргон) для удаления радионуклидов с поверхностей и из приповерхностных слоев дезактивируемых элементов графитовой кладки и внутриконтурного оборудования.

ПРИНЦИПЫ ТЕХНОЛОГИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Физические принципы ионно-плазменной технологии заключаются в использовании процесса ионного распыления обрабатываемой (дезактивируемой) поверхности в “укороченном” разряде в среде инертного газа (аргон), который зажигается между дезактивируемой поверхностью (катодом) и электродом-коллектором (анодом) с дальнейшим переносом распыленных атомов в диффузионном режиме на электрод-коллектор. Экспериментально получено, что для различных типов обрабатываемых материалов — реакторного графита, металлов и их сплавов (например, реакторная сталь), усло-

вия зажигания “укороченного” разряда и распыления поверхностного слоя атомов обрабатываемых образцов варьируются в диапазонах: давление инертного газа 0.1–1 атм., плотность тока укороченного разряда 0.1–1 А/см², напряжение на разрядном промежутке 100–1000 В, межэлектродный промежуток — расстояние между анодом и катодом 0.1–2 мм. В момент горения “укороченного” разряда в среде аргона ионы аргона и быстрые атомы после резонансной перезарядки с кинетической энергией >100 эВ бомбардируют обрабатываемую (дезактивируемую) поверхность образца реакторного графита или металлического образца с поверхностными загрязнениями. Этой энергии достаточно, чтобы преодолеть энергию связи (<10 эВ) любых атомов на поверхности и вызвать ионное распыление слоя дезактивируемого (обрабатываемого) образца с последующим осаждением распыленных атомов в режиме диффузионного массопереноса на электроде-коллекторе. Основные результаты по дезактивации графита были нами доложены по приглашению секретариата Международного агентства по атомной энергии на международном техническом совещании Technical Meeting on Processing Technologies for Irradiated Graphite Waste [24]. Результаты экспериментов, подтверждающие работоспособность ионно-плазменной технологии, также представлено в статье [25].

Мощность, вкладываемая в разряд, определяет распределение температурного поля в дезактивируемом образце и распылительном устройстве, включая съемный электрод-коллектор (крепится к аноду), температура поверхности которого определяет эффективность осаждения и удержания распыленных атомов во время горения разряда. Выбор тугоплавкого металла (например, тантала) для изготовления электрода-коллектора обусловлен повышением температуры в процессе горения разряда при вкладе достаточной мощности и при отсутствии системы охлаждения. Ранее нами был выполнен расчет, позволяющий оценить распределение температурного поля в разряде, на поверхностях анода и катода. Было получено, что, во избежание перегрева дезактивируемой поверхности и анода более, чем до 1000 К, необходимо использовать импульсный режим зажигания разряда [26]. Чтобы исключить перегрев электрода-коллектора и увеличить эффективность конденсации и удержания распыленных атомов на его поверхности нами разработана система охлаждения распылительного устройства, встроенная в анод и расположенная над электродом-коллектором. Система охлаждения представляет собой водяную охлаждающую рубашку, по которой циркулирует поток воды с заданной начальной температурой и скоростью во внутренней полости анода. В частном случае, для дезактивации внутриконтурного оборудования, портативное устройство

для реализации ионно-плазменной технологии содержит корпус, диэлектрическую крышку и сменный анод, имеющий форму пластины, геометрически подобной выбранному участку дезактивируемой поверхности, а также подключенную к электроду-коллектору систему электрического питания “укороченного” разряда, отрицательный полюс которой соединен с дезактивируемой поверхностью (катод). Также устройство содержит эластичную прокладку, установленную по периметру корпуса и герметизирующую пространство между корпусом и дезактивируемой поверхностью, систему ввода и систему откачки рабочего инертного газа и трехкоординатный манипулятор для перемещения устройства по выбранным участкам дезактивируемой поверхности. Для охлаждения поверхности электрода-коллектора, изготовленного из металла с высокой теплопроводностью, электрод-коллектор имеет систему охлаждения, состоящую из внутренней полости для прокачки воды над всей его поверхностью, обращенной к дезактивируемой поверхности. Также к электроду-коллектору крепится сменная анодная пластина из фольги для конденсации и периодического извлечения распыленного материала. Циркуляция воды с заданной входной температурой и скоростью позволяет поддерживать необходимую для эффективной конденсации распыленных радионуклидов температуру на поверхности электрода-коллектора. Если через систему охлаждения прокачивать жидкий азот, то можно реализовать режим конденсации всех распыленных атомов металлов, включая радионуклиды с малой энергией связи, например, цезий. Более детальное описание технологии и устройства распылительной ячейки для ее осуществления приводится в наших патентах на изобретение полученных совместно с АО “Концерн Росэнергоатом” и ГК “Росатом” [27–30].

В данной работе мы решали задачу теплопроводности для портативного распылительного устройства, предназначенного для реализации ионно-плазменной технологии с удалением отложений на поверхности внутриконтурного оборудования и металлоконструкций реакторов. Была рассмотрена конфигурация плоского электрода-коллектора толщиной 1 мм и площадью 100 см², изготовленного из тантала. От танталового электрода-коллектора излишнее тепло отводится посредством системы охлаждения в виде внутренней полости в аноде, к которому вплотную присоединяется съемный электрод-коллектор. В упрощенном варианте система охлаждения может быть рассмотрена в форме полости внутри анода толщиной 1 см и протяженностью 10 см, в которую подается поток воды при заданной начальной температуре и скорости. В силу малости разрядного промежутка “укороченного” разряда (расстояние между электродом-коллектором и катодом составляет 0.1–2 мм) фактически вся подава-

емая электрическая мощность для поддержания разряда диссипирует в разрядном промежутке. В первом приближении нами рассмотрена и решена нестационарная задача теплопроводности с граничными условиями в виде заданной плотности потока тепловой энергии на поверхности электрода-коллектора, обращенной к разрядному промежутку, при этом расчет был сделан для нескольких величин плотности потока мощности “укороченного” разряда: $1 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^5$, $5 \cdot 10^5$ и $1 \cdot 10^6$ Вт/м². Принималось, что внешние границы поверхности анода отдают тепло в окружающее пространство. Расчет распределения поля температур выполнен для указанных значений плотности мощности разряда и для следующих значений скорости прокачки потока воды через полость внутри анода: 0.01, 0.1 и 1 м/с. Для решения поставленной задачи был использован программный пакет COMSOL Multiphysics, модуль Heat Transfer in Solids and Fluids, позволяющий рассчитывать распределение поля температуры в твердых и жидких средах с учетом заданных значений скоростей потока жидкостей.

На рис. 1 представлены результаты расчета: зависимости максимальных значений температуры (T , градус Кельвин) поверхности электрода-коллектора, обращенного к разрядному промежутку (заштрихованные квадраты) и температуры поверхности электрода-коллектора, обращенной к системе охлаждения (полые квадраты) от времени экспозиции (зажигания) разряда (t , секунда). Под временем экспозиции понимается фактически время обработки (дезактивации) поверхности, буквам (а), (б), (в) и (г) соответствуют расчеты, выполненные при значениях вкладываемой мощности в разряд $1 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^5$, $5 \cdot 10^5$, $1 \cdot 10^6$ Вт/м², соответственно. Символами (1), (2) и (3) помечены кривые температурной зависимости от времени, рассчитанные при значениях скорости прокачки потока воды 0.01, 0.1 и 1 м/с, соответственно.

Из рис. 1 видно, что после зажигания “укороченного” разряда при вкладываемой плотности мощности $1 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^5$ Вт/м² для скорости потока воды 0.1 и 1 м/с (пары кривых — 2 и 3, обозначенные синим и зеленым цветами, соответственно, на графиках а–б), наблюдается выход температуры на стационарное значение и отсутствие закипания потока водяного охлаждения (значение температуры поверхности электрода-коллектора, обращенной к воде, ниже 373 К), что является необходимым условием работоспособности системы охлаждения. При скорости потока воды 0.01 м/с в условиях зажигания разряда с плотностью мощности $1 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^5$ Вт/м² (пара кривых 1 на графиках а–б) эффективная работа системы охлаждения возможна в импульсном режиме воздействия “укороченного” разряда на дезактиви-

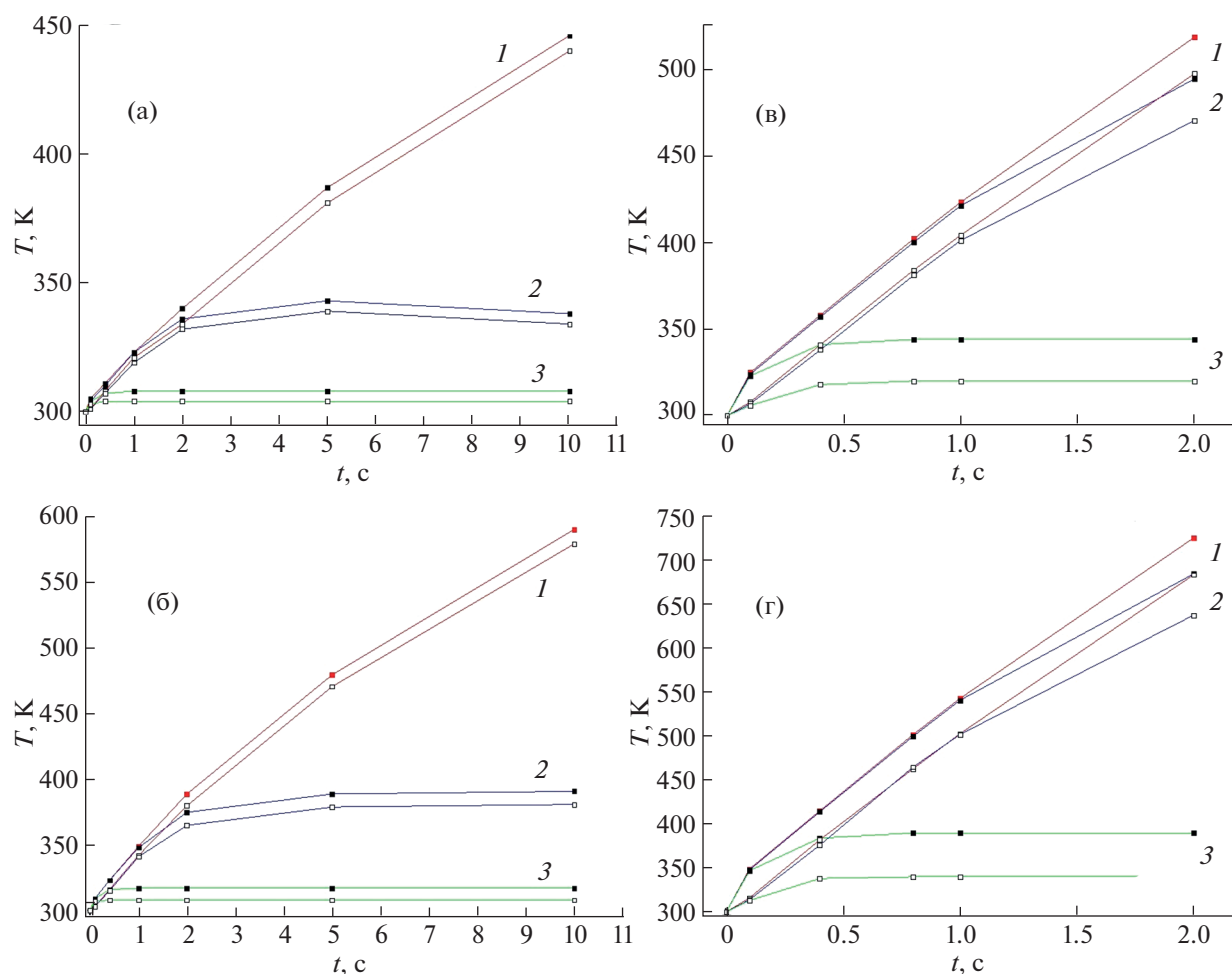


Рис. 1. Температурные зависимости электрода-коллектора от времени экспозиции разряда при различных скоростях прокачки охлаждающей жидкости.

руемую поверхность при длительности импульса не более 5 с. Аналогичное условие отсутствия закипания водяного охлаждения при непрерывном горении “укороченного” разряда при величинах мощностей $5 \cdot 10^5$ и $1 \cdot 10^6$ Вт/м² наблюдается при скорости потока водяного охлаждения в 1 м/с (пары кривых — 3 на графиках в–г), или при импульсном режиме воздействия “укороченного” разряда с длительностью импульса не более 0.3 с и скоростью потока воды 0.01 и 0.1 м/с.

Из представленных выше результатов расчета можно сделать вывод, что наиболее универсальным и эффективным режимом работы устройства дезактивации будет непрерывное горение “укороченного” разряда в диапазоне вкладываемой плотности мощности ($1 \cdot 10^5$ – $1 \cdot 10^6$) Вт/м² при скорости потока водяного охлаждения не менее 1 м/с. В этих условиях устройство быстро войдет в стационарный температурный режим, при этом максимальные значения температуры поверхности электро-

да-коллектора, обращенной к охлаждающей жидкости, не достигают точки кипения воды.

На рис. 2 приведены распределения температуры по толщине электрода-коллектора и потока воды в точке выхода из полости системы охлаждения, где величины температур имеют максимальные значения вследствие нагрева при прохождении через систему охлаждения. За начало отсчета по оси ОХ взята поверхность электрода-коллектора, обращенная к “укороченному” разряду: обозначения (1), (2), (3) и (4) соответствуют величинам вкладываемой плотности мощности в разряд $1 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^5$, $5 \cdot 10^5$, $1 \cdot 10^6$ Вт/м², соответственно.

Для полученных стационарных режимов при вкладываемой плотности мощности в разряд ($1 \cdot 10^5$ – $1 \cdot 10^6$) Вт/м² и скорости потока водяного охлаждения 1 м/с из распределения температуры поперек потока воды также можно определить конструктивно минимальный поперечный размер полости для прокачки охлаждающей жидко-

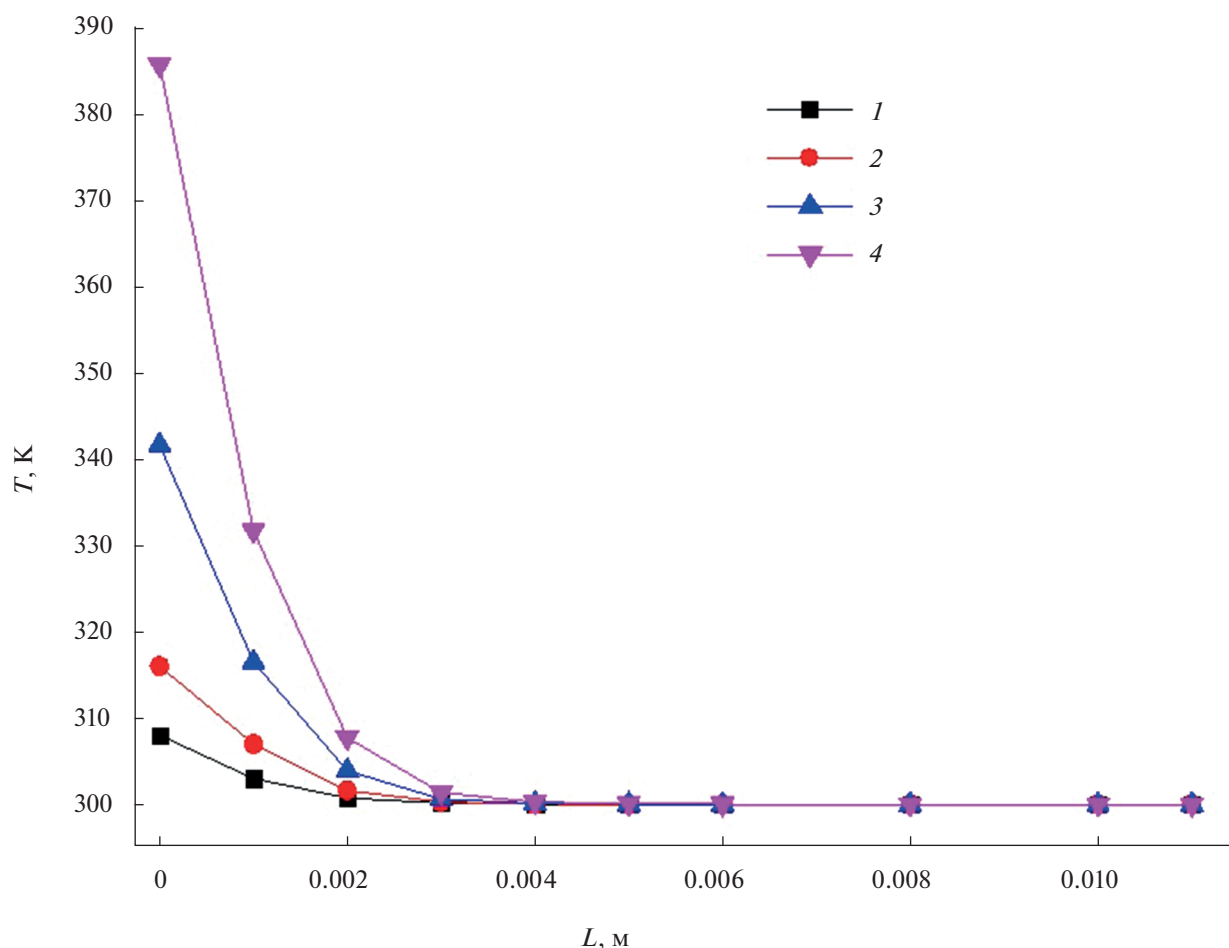


Рис. 2. Распределения температуры по толщине электрода-коллектора и слоя потока воды.

сти, равный порядка 0.4 см. Таким образом, полученная минимально допустимая для поглощения заданного теплового потока от разряда толщина потока водяного охлаждения должна учитываться при конструировании распылительного устройства. И использованная методика расчета распределения температур в потоке охлаждающей жидкости и в электроде-коллекторе может быть расширена на более сложные системы, включая учет всех элементов конструкции конкретного распылительного устройства, что является отдельной задачей. Данный шаг будет реализован в последующих этапах работы нашей научной группы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведен анализ физических и тепловых особенностей разрабатываемой авторами ионно-плазменной технологии для решения проблемы вывода из эксплуатации реакторных установок, дезактивации облученного реакторного графита и металлоконструкций реакторов. Физические принципы ионно-плазменной технологии

заключаются в применение “укороченного” разряда в инертных газах (в частности, аргона) высокого (атмосферного) давления для удаления поверхностного радиоактивного слоя, включая отложения в форме шпинелей и оксидов, посредством распыления его ионами плазмы с последующим диффузионным переносом на электрод-коллектор при рабочих параметрах: давление инертного газа 0.1–1 атм, плотность тока укороченного разряда 0.1–1 А/см², напряжение на разрядном промежутке 100–1000 В, межэлектродный промежуток — расстояние между анодом и катодом 0.1–2 мм. Рассмотрена модельная система водяного охлаждения поверхности электрода-коллектора для эффективного осаждения и удержания распыленных радионуклидов металлов с последующим извлечением и удалением. Выполнен численный расчет распределений температурного поля в электроде-коллекторе и системе водяного охлаждения, получено, что эффективным режимом охлаждения электрода-коллектора при вкладываемой плотности мощности в “укороченный” разряд $1 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^5$, $5 \cdot 10^5$ и $1 \cdot 10^6$ Вт/м² является скорость прокачки

воды 1 м/с, необходимая для предотвращения закипания потока охлаждающей воды и установления стационарного режима. Для стационарного режима работы системы охлаждения рассчитана минимальная толщина слоя потока водяного охлаждения в размере 4 мм. Полученные данные необходимы при конструировании системы прокачки охлаждающей жидкости в распылительном устройстве для плазменной дезактивации.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

- Орлов С.Н., Змитродан А.А., Кривобоков В.В. // Теплоэнергетика. 2021. Т. 5. С. 32. <https://doi.org/10.1134/S0040363621040044>
- Крицкий В.Г., Родионов Ю.А., Стяжкин П.С., Матвеев С.А. // Дезактивация АЭС и ЯЭУ с водным теплоносителем, Издательство: 2016. Москва: БукиВеди.
- Седов В.М., Нечаев А.Ф., Доильницын В.А. и др. // Химическая технология ядерных энергетических установок. 1985. Москва: Энергоиздат.
- Ампелогова Н.И., Симановский Ю.М., Трапезников А.А. // Дезактивация в ядерной энергетике. 1982. Москва: Энергоиздат.
- Liu S., He Y., Xie H., Ge Y., Lin Y., Yao Z., Jin M., Liu J., Chen X., Sun Y., Binhui W. // Sustainability. 2022. V. 14. P. 4021. <https://doi.org/10.3390/su14074021>
- Yastrebinsky R.N., Pavlenko V.I., Karnauhov A.A. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2019. V. 687. P. 066053. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/687/6/066053>
- Алешин А.М., Змитродан А.А., Кривобоков В.В. // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. 2019. № 4 (18). С. 34.
- Kim S.W., Park S.Y., Roh C.H. et al. // Nucl. Eng. Technol. 2022. V. 54. P. 2329.
- Wood C.J. // Prog. Nucl. Energy. 1990. V. 23. P. 35.
- Gurau D., Deju R. // Radiat. Phys. Chem. 2015. V. 106 (1). P. 371.
- Роменков А.А., Туктаров М.А., Карлина О.А. и др. // Патент РФ № 2546981. 2015.
- Cleaver J., McCrory S., Smith T.E., Dunzik-Gougar M.L. // WM Conf. 2012. Phoenix, Arizona, USA.
- El-Genk M.S., Tournier J.P. // J. Nucl. Mater. 2011. V. 41. P. 193.
- Fachinger J., von Lensa W., Podruzhina T. // Nucl. Eng. Des. 2008. V. 238. P. 3086.
- Mason J.B., Bradbury D. // Nucl. Energy. 2000. V. 39 (5). P. 305.
- Ojovan M.I., Lee W.E., Sobolev I.A. et al. // Proc. Inst. Mech. Eng., Part E. 2004. V. 218 (4). P. 261.
- Womack R.K. // Met. Mater. Soc. 1999. V. 51 (10). P. 14.
- Lee W.E., Ojovan M.I., Stennett M.C., Hyatt N.C. // Adv. Appl. Ceram. 2006. V. 105 (1). P. 3.
- LaBrier D., Dunzik-Gougar M.L. // J. Nucl. Mater. 2014. V. 448. P. 113.
- Dunzik-Gougar M.L., Smith T.E. // J. Nucl. Mater. 2014. V. 451. P. 328.
- LaBrier D., Dunzik-Gougar M.L. // J. Nucl. Mater. 2015. V. 460. P. 174.
- Vulpus D., Baginski K., Fischer C., Thomauske B. // J. Nucl. Mater. 2013. V. 438. P. 163.
- Payne L., Heard P.J., Scott T.B. // PLoS One. 2016. V. 11 (10). P. e0164159. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164159>
- Petrovskaya A.S. // Technical Meeting on Processing Technologies for Irradiated Graphite Waste. 2024. Vienna: IAEA.
- Petrovskaya A.S., Tsyganov A.B., Surov S.V., Blokhin D.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. P. 1552. <https://doi.org/10.3103/S1062873823703689>
- Петровская А.С., Цыганов А.Б. // Физ. тв. тела. 2023. Т. 65 (12). С. 2184. <https://doi.org/10.61011/FTT.2023.12.56755.5167k>
- Петровская А.С., Цыганов А.Б., Стахив М.Р. Патент РФ № 2711292. 2020.
- Петровская А.С., Цыганов А.Б., Стахив М.Р. РСТ/RU2019/000816. 2019.
- Петровская А.С., Цыганов А.Б., Стахив М.Р. WO2019RU00816, EP19888171.6, US20210272715, CA3105179A1, CN112655056A. 2021.
- Петровская А.С., Цыганов А.Б. Патент РФ № 2771172. 2022.

Analysis of Cooling System for Ion-Plasma Deactivation Technology

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

¹Plasma application laboratory, InnoPlasmaTech LLC, St. Petersburg, Russia

*e-mail: anita3425@yandex.ru

Received September 8, 2025; revised September 10, 2025; accepted September 16, 2025

Abstract—The article is devoted to the ion-plasma technology being developed to solve the problem of irradiated reactor graphite and reactor equipment deactivation, and to solve the problems of the various reactors decommissioning. Particular attention is paid to the technical implementation of the deactivation device and the cooling system of the electrode-collector for the most effective deposition of radionuclides removed by the “shortened” plasma discharge from the surface of the reactor equipment and irradiated graphite. The

physical and heat transfer principles of ion-plasma “dry” technology are discussed. Temperature distribution inside of the collector electrode and the cooling flow were calculated. The operating parameters of the ion-plasma technology of irradiated reactor graphite and metal structures of nuclear power plants, have been found: inert gas pressure of 0.1–1 atm., discharge current density of 0.1–1 A/cm², voltage of 100–1000 V. It was found that at discharge power density of $1 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^5$, $5 \cdot 10^5$ and $1 \cdot 10^6$ W/m², the water flow rate of 1 m/s is required to keep the collector electrode of deactivation device cool.

Keywords: irradiated reactor graphite, “dry” deactivation, metal structures of nuclear power plants, decommissioning, decontamination device, cooling system