

Технология ионно-термической дезактивации поверхности металлоконструкций реакторных установок

© А.С. Петровская, А.Б. Цыганов

ООО „ИнноПлазмаТех“,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: anita3425@yandex.ru

Поступила в Редакцию 17 мая 2023 г.

В окончательной редакции 16 сентября 2023 г.

Принята к публикации 30 октября 2023 г.

Актуальной проблемой ядерной энергетики является дезактивация внутриконтурного оборудования ядерных реакторов при выводе из эксплуатации и во время плановых ремонтов реакторных установок. Нами разрабатывается принципиально новая „сухая“ ионно-термическая технология дезактивации металлоконструкций и реакторного графита. В статье представлены результаты численных расчетов температуры внутренней поверхности дезактивируемого трубопровода первого конура реактора большой мощности канального (РБМК) в процессе применения ионно-термической технологии.

Ключевые слова: реакторные установки, ионно-термическая технология дезактивации, вывод из эксплуатации, дезактивация поверхности металлоконструкций.

DOI: 10.61011/FTT.2023.12.56755.5167k

1. Введение

Поиск эффективной технологии дезактивации внутренних поверхностей оборудования и трубопроводов первого контура реакторных установок (РУ) остается одной из актуальных проблем ядерной энергетики. Радиационные загрязнения внутренних поверхностей трубопроводов РУ состоят из активированных продуктов коррозии конструкционных материалов, а также продуктов деления ядерного топлива, появляющихся при нарушении герметичности оболочек тепловыделяющих элементов. Химический состав радиоактивных загрязнений и величина активности зависят от времени и режимов эксплуатации РУ и от ее типа. Например, при длительной эксплуатации РУ не менее 90% от общей активности слоя радионуклидов на поверхности дает изотоп ^{60}Co , образующегося при взаимодействии нейтронов со стабильным изотопом ^{59}Co , входящим в продукты коррозии нержавеющей стали, содержащей 10% никеля с большой природной примесью кобальта.

В настоящий момент для дезактивации внутриконтурного оборудования РУ применяются химические технологии и различные безреагентные методы, сочетающие ультразвуковые, электролитические, ударно-волновым воздействия [1–8], приводящие к увеличению объемов жидких радиоактивных отходов (ЖРО) и коррозии металла. Лазерные методы дезактивации металлических поверхностей РУ [9] являются относительно дорогими, низкоэффективными и трудоемкими в реализации. В данной статье мы предлагаем принципиально новый подход к дезактивации внутриконтурного оборудования РУ — ионно-термическую технологию.

2. Базовые принципы технологии

Ионно-термическая технология основана на применении микроплазменного разряда (длина разрядного промежутка порядка 1–5 мм) в инертном газе (аргон) при давлении 0.1–1 atm для дезактивации любой радиоактивно загрязненной токопроводящей поверхности, включая внутриконтурное оборудование РУ. Микроплазменный разряд зажигается между дезактивируемой поверхностью (катод) и электродом — коллектором (анод) распылительного устройства, устанавливаемого параллельно катодной поверхности, при этом поперечные размеры анода много больше зазора между катодом и анодом. Дезактивация поверхности осуществляется посредством ионного и термического распыления слоя радиоактивного осадка любого химического состава с токопроводящей металлической поверхности конструкций РУ с последующим диффузионным переносом распыленных атомов и осаждением в виде твердого осадка на аноде распылительного устройства, при этом распыленные атомы не образуют химических соединений с инертным газом. Например, для дезактивации внутренней поверхности трубопровода РУ сменный электрод-коллектор распылительного устройства представляет собой пластину, по форме подобную внутренней поверхности трубопровода. Для управления температурой и процессом осаждения распыленных атомов на электродо-коллекторе последний может быть снабжен системой охлаждения. Рабочие параметры ионно-термической технологии получены экспериментально на модельных образцах металлических сплавов: напряжение на разрядном промежутке 100–1000 V, давление инертного газа (аргон) 0.1–1 atm., плотность тока 0.1–1 A/cm², длина разрядного промежутка 1–5 мм. Скорость распыления

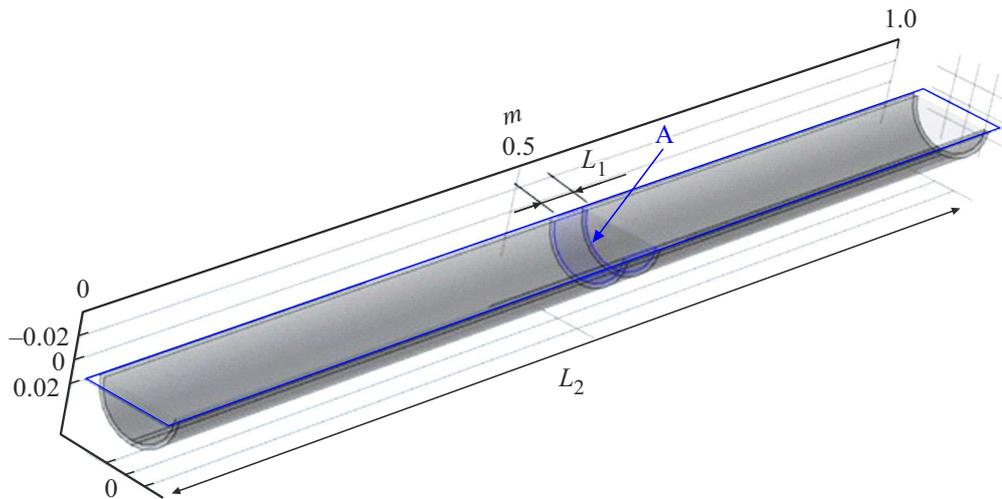


Рис. 1. Схема участка трубопровода с расположением анода в виде желоба.

и толщина распыленного слоя радиоактивных отложений управляется вкладываемой мощностью в разряд и временем экспозиции микроплазменного разряда. Ионно-термическая технология позволяет проводить дезактивацию непосредственно внутри РУ до момента ее полной разборки: распылительное устройство на манипуляторе перемещается последовательно, шаг за шагом, по всем внутренним поверхностям первого контура реактора. Более детальное описание технологии и распылительного устройства представлено в нашем совместном патенте с ГК „Росатом“ [10].

3. Результаты расчета температурных режимов ионно-термической технологии

Для предотвращения перегрева дезактивируемого фрагмента трубопровода РУ, выбора конструкционных материалов для изготовления распылительного устройства и определения значений температуры дезактивируемой поверхности трубопровода РУ решена задача теплопроводности при различных значениях вкладываемой мощности в микроплазменный разряд. При зажигании микроплазменного разряда фактически вся мощность, вкладываемая в разряд, выделяется в области катода, поэтому источник тепла может быть задан на участке площади обрабатываемой поверхности трубопровода. При этом боковые торцы трубопровода поддерживаются при фиксированной температуре 300 К. Граничное условие на внешней поверхности трубопровода заключается в охлаждении потоком воздуха со скоростью $u = 10$ м/с перпендикулярно поверхности трубопровода. Процесс теплообмена между трубопроводом, заполненным аргоном, распылительным устройством и внутренней поверхностью трубопровода может быть описан уравнением для теплового потока: $Q' = \langle \alpha \rangle \delta T F$, где $\langle \alpha \rangle$ —

средний по теплообменной внутренней поверхности стенок трубопровода коэффициент теплообмена, δT — разность температур стенок трубопровода и аргона, F — поверхность теплообмена. Фрагмент трубопровода, для которого проводился расчет, с указанием положения анода, приведен на рис. 1. Расчет выполнен для участка трубопровода первого контура реактора РБМК длиной $L_1 = 1$ м, изготовленного из нержавеющей стали X18H10T, с внутренним радиусом 36 мм и толщиной 4 мм. Анод изготовлен в виде желоба длиной $L_2 = 4$ см и радиусом 35 мм (анод обозначен синим цветом), расстояние между анодом и обрабатываемой поверхностью — 1 мм. Распыляемая область внутренней поверхности трубопровода расположена непосредственно под анодом. Аналогичные расчеты могут быть выполнены для дезактивации трубопроводов любой геометрии.

На рис. 2 представлены временные зависимости температуры внутренней поверхности стенки трубопровода в течении первых 4-х секунд воздействия микроплазменного разряда на дезактивируемую поверхность, располагающуюся непосредственно под анодом, при различных значениях вкладываемой мощности в разряд. Номера кривых 1, 2, 3, 4, 5 и 6 соответствуют величинам мощности $1 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$, $3 \cdot 10^6$, $4 \cdot 10^6$, $5 \cdot 10^6$ и $6 \cdot 10^6$ Вт/м². Согласно полученным данным, оптимальным является импульсный режим разряда при мощности $6 \cdot 10^6$ Вт/м² (например, при напряжении 600 В и плотности тока разряда 1 А/см²) с длительностью импульса не более 1–2 с. При величине мощности разряда менее $6 \cdot 10^6$ Вт/м² увеличивается длительность разрядного импульса, при которой достигается выбранная предельно допустимая температура распыляемой поверхности.

Скорость распыления при плотности тока на катод 1 А/см² составит 0.7 мкм/с, при этом необходимое время дезактивации заданной площади элемента РУ рассчитывается с учетом толщины радиоактивных отложений,

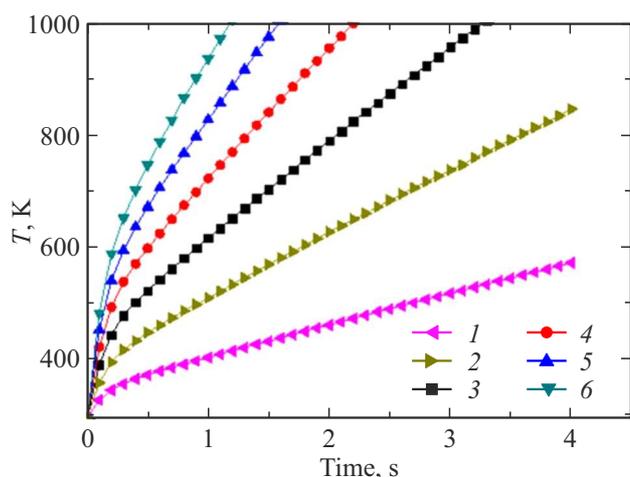


Рис. 2. Зависимости скорости нагрева внутренней поверхности стенки трубопровода.

скорости позиционирования манипулятора с распылительным устройством и площади анода. Также было рассчитано характерное время остывания нагретых стенок трубопровода первого контура реактора РБМК толщиной 4 мм, которое оказалось равно (36.2 ± 1.4) с. Характерное время остывания позволяет выбрать последовательность перемещения распылительного устройства по дезактивируемой поверхности (например, в шахматном порядке) так, чтобы при необходимости многократной обработки одного и того же участка поверхности его температура успела понизиться до 300 К.

4. Заключение

В настоящей статье предложен принципиально новый подход к дезактивации внутриконтурного оборудования РУ, основанный на распылении с поверхности катода радиоактивных отложений любого химического состава микроплазменным разрядом атмосферного давления в инертном газе с переносом в режиме диффузии распыленных атомов и их конденсацией на аноде-коллекторе. Толщина распыляемого слоя регулируется мощностью разряда и временем его экспозиции. Для предотвращения перегрева, в качестве примера, рассчитаны временные зависимости температуры внутренней поверхности стенки трубопровода РУ в зависимости от мощности разряда, также найдено характерное время остывания стенок трубопровода. Рекомендуемый режим ионно-термической технологии: мощность разряда $6 \cdot 10^6$ Вт/м², длительность разрядного импульса не более 1–2 с при выбранной предельно допустимой температуре 1000 К. При мощности разряда менее $6 \cdot 10^6$ Вт/м² длительность разрядного импульса увеличивается и снижается производительность. При более высоких температурах дезактивации (например, графита) анод рекомендуется изготовить из тугоплавкого металла

(например, Та) и оснастить распылительное устройство керамической тепловой изоляцией (например, керамикой на основе Al_2O_3 или ZrO_2). Преимуществами ионно-термической технологии дезактивации является: отсутствие ЖРО, распыление радиоактивного поверхностного загрязнения любого химического состава, сбор распыленного радиоактивного загрязнения на сменном аноде-коллекторе в виде твердого осадка. Основные принципы ионно-термической технологии применимы для дезактивации облученного реакторного графита [10] и эффективной переработки ОЯТ [11].

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R.N. Yastrebinsky, V.I. Pavlenko, A.A. Karnauhov. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **687**, 066053 (2019). DOI: 10.1088/1757-899X/687/6/066053
- [2] S.L. Vitkovsky, A.P. Danilov, M.G. Shchedrin, I.A. Kolyagina. Nucl. Eng. Technol. **3**, 4, 313 (2017). DOI: 10.1016/j.nucet.2017.11.007
- [3] S. Liu, Y. He, H. Xie, Y. Ge, Y. Lin, Z. Yao, M. Jin, J. Liu, X. Chen, Y. Sun, W. Binhui. Sustainability **14**, 4021 (2022). DOI: 10.3390/su14074021
- [5] Z. Tian, L. Song, X. Li. Int. J. Corros **2019**, ID 1206098 (2019).
- [6] G. Toader, D. Pulpea, T. Rotariu, A. Diacon, E. Rusen, A. Moldovan, A. Podaru, R. Gingham, F. Alexe, O. Iorga, S.A. Bajenaru, M. Ungureanu, F. Dirloman, B. Pulpea, L. Leonat. Polymers **13**, 4194 (2021). DOI: 10.3390/polym13234194
- [7] С.Н. Орлов, А.А. Змитродан, В.В. Кривообоков. Теплоэнергетика **5**, 32 (2021).
- [8] L. Chunhai, T. Qingfeng, C. Min, Z. Xuejuan, Z. Zhaofa. J. Radioanal. Nucl. Chem. **316**, 7, 1 (2018). DOI: 10.1007/s10967-018-5717-4
- [9] W. Qian, W. Feisen, C. Chuang, C. Hui, J. Fei, Y. Chen, L. Dasong. Nucl. Eng. Technol. **55**, 1, 12 (2023). DOI: 10.1016/j.net.2022.09.020
- [10] А.С. Петровская, А.Б. Цыганов, М.Р. Стахив. Патент РФ № 2711292. Заявка EP 19888171.6, US 20210272715, CA3105179A1, KHP CN112655056A и др.
- [11] A.S. Petrovskaya, A. B. Tsyganov, S.V. Surov, A.Yu. Kladkov. Nuclear Eng. Design **386**, 111561 (2022). DOI: 10.1016/j.nucengdes.2021.111561

Редактор Т.Н. Василевская