

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕЗАКТИВАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОБЪЕКТАМ РАДИОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Н. А. Кузнецова, Ю. В. Козина, Н. Р. Габбасова

ФГУП «ПО «Маяк», Озерск, Челябинская область

Статья поступила в редакцию 13 октября 2024 г.

*В статье представлены результаты работ по оценке применимости высокотемпературной дезактивации к оборудованию радиохимического производства. В ходе исследований установлены параметры, определяющие ее эффективность: температура, состав солевой композиции, а также длительность обработки. Количество образующихся в процессе дезактивации твердых РАО не превышает 0,1% от исходной массы образцов.*

**Ключевые слова:** дезактивация, радиоактивное загрязнение, микрометаллургический метод высокотемпературной дезактивации, радиоактивные отходы.

На радиохимическом производстве ФГУП «ПО «Маяк» для дезактивации емкостного и крупногабаритного оборудования достаточно часто и эффективно используются жидкостные методы и их модификации (например, с применением ультразвукового воздействия), основным недостатком жидкостной дезактивации является значительное количество вторичных жидких радиоактивных отходов (далее — ЖРО). Этому недостатку лишены так называемые «сухие» методы. Одним из них является высокотемпературная дезактивация (далее — ВТД), разработанная еще в середине 80-х годов прошлого века [1]. Несмотря на очевидные достоинства метода, а именно: высокую эффективность и небольшое количество образующихся вторичных радиоактивных отходов (далее — РАО), широкого распространения он не получил ввиду высокой энергоемкости. Однако данный метод может

оказаться оптимальным, а в некоторых случаях единственно возможным, например, при необходимости дезактивировать технологическую оснастку, используемую в высокотемпературных процессах, когда применение жидкостных методов проходит с большими трудностями. Также целесообразно рассмотреть именно высокотемпературную дезактивацию для небольших объектов, изготовленных из особо ценных коррозионно-стойких материалов, жидкостная дезактивация которых приведет к образованию химических агрессивных вторичных ЖРО.

Одним из наиболее легко реализуемых направлений ВТД является метод, основанный на проведении микрометаллургических процессов на поверхности загрязненного металла [1], [2]. Суть его состоит в использовании специальных обмазок для контролируемого окисления и перевода при нагревании загрязненного

поверхностного слоя металла с находящимися в его поверхностном слое радионуклидами в шлаковую фазу. После охлаждения дезактивируемого объекта образовавшаяся окалина растрескивается и вместе с находящимися в ней радионуклидами удаляется с поверхности очищаемого металла [2], [3]. Важно отметить, что при реализации этого метода нет необходимости в разработке специального оборудования.

С технологической точки зрения данный метод привлекателен, т. к. позволяет в довольно широком диапазоне изменять параметры термической обработки, что дает возможность контролировать скорость коррозии и, соответственно, влиять на эффективность дезактивации.

На ФГУП «ПО «Маяк» были проведены работы по оценке эффективности микрометаллургического способа применительно к образцам-свидетелям из нержавеющей стали, длительное время находившимся внутри теплообменника и экстрактора действующего радиохимического производства.

Цель исследования — оценка влияния параметров процесса (температуры, продолжительности обработки) и состава солевой композиции на эффективность дезактивации нержавеющей стали микрометаллургическим методом ВТД.

Дезактивацию образцов проводили в муфельной печи, перед этим на них последовательно наносили слой водного раствора поливинилового спирта с массовой концентрацией 12% толщиной 1–2 мм, а затем солевые композиции, предварительно измельчив и перемешав их в нужных пропорциях. Для загрузки образцов в печь использовали алундовые тигли. После выдержки в течение 10–30 мин образцы охлаждали и отделяли окислы в воде. После просушивания проводили радиометрические измерения остаточного загрязнения поверхности. В качестве основного показателя эффективности дезактивации использовали величину остаточного загрязнения образцов в процентах, рассчитанную как отношение этих величин после и до обработки.

Перед началом экспериментальных работ был проведен гамма-спектрометрический анализ исходного радиоактивного загрязнения извлеченных из действующего оборудования образцов-свидетелей. Основная его часть была обусловлена изотопами  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{106}\text{Ru}$ . Исходное загрязнение бета-излучающими нуклидами составляло около  $9 \cdot 10^4$  част/(см<sup>2</sup>·мин), МАЭД — от 16 до 28 мкЗв/ч.

При выборе состава солевых композиций руководствовались тем, что в них должны содержаться реагенты, провоцирующие коррозию

поверхностных слоев стали (сера, хлор), при этом смеси должны быть легкоплавкими. Таким образом, для дальнейших испытаний были выбраны следующие солевые композиции (мас. %):

Солевая композиция № 1:  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  — 25;  
NaCl — 25;  
KCl — 25;  
 $\text{K}_2\text{SO}_4$  — 25;  
Солевая композиция № 2: NaCl — 40;  
 $\text{K}_2\text{SO}_4$  — 60.

Для оценки влияния температуры использовали образцы, извлеченные из выпарного аппарата. Продолжительность обработки составляла 20 минут. Результаты экспериментов приведены на рис. 1 и 2.

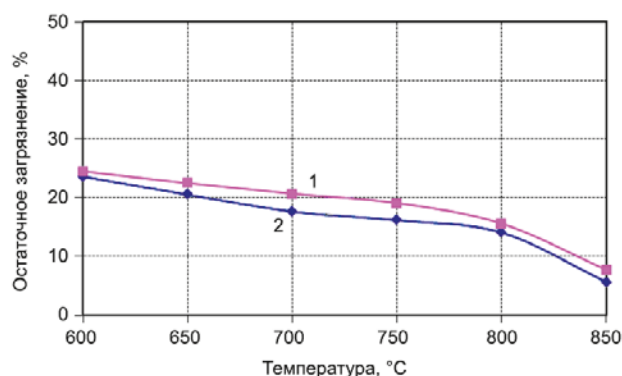


Рис. 1. Зависимость эффективности дезактивации образцов от бета-излучающих нуклидов от температуры при длительности цикла 20 мин: 1 — солевая композиция № 1; 2 — солевая композиция № 2

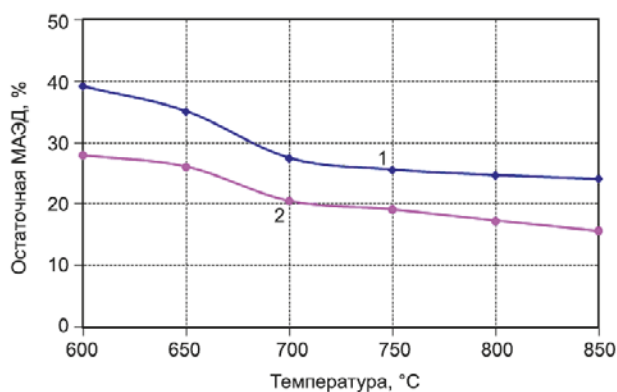


Рис. 2. Зависимость эффективности дезактивации от температуры при длительности цикла 20 мин: 1 — солевая композиция № 1; 2 — солевая композиция № 2

Анализируя полученные зависимости, мы можем сделать вывод, что обе солевые композиции близки по эффективности. С увеличением температуры эффективность дезактивации повышается. Так, при максимальной температуре 850 °C остаточное загрязнение

бета-излучающими радионуклидами составило от 5,6% до 7,7% от исходного. Таким образом, при использовании сухой солевой композиции, состоящей из хлорида натрия и сульфата калия, за один цикл обработки при температуре 850 °С удаляется до 95% бета-излучающих нуклидов, МАЭД снижается в 4–6 раз. Однако, как следует из представленных данных, за 20 мин дезактивировать образцы до допустимых значений не удалось даже при температуре 850 °С, поэтому в дальнейших исследованиях длительность цикла увеличили до 30 минут.

Для выявления кинетических закономерностей процесса высокотемпературной дезактивации были проведены исследования с изменением времени обработки. Полученные результаты представлены на рис. 3 и 4.

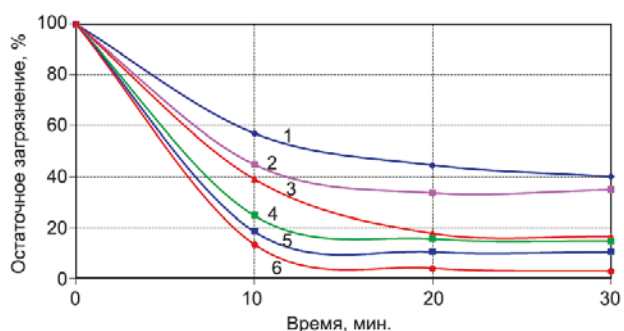


Рис. 3. Зависимость эффективности дезактивации от времени обработки солевой композицией №1 при различных температурах: 1 – 600 °С; 2 – 650 °С; 3 – 700 °С; 4 – 750 °С; 5 – 800 °С; 6 – 850 °С

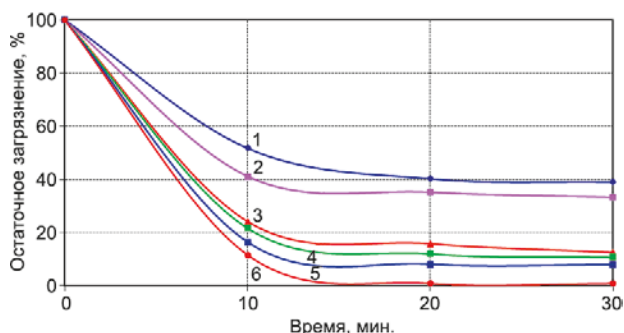


Рис. 4. Зависимость эффективности дезактивации от времени обработки солевой композицией №2 при различных температурах: 1 – 600 °С; 2 – 650 °С; 3 – 700 °С; 4 – 750 °С; 5 – 800 °С; 6 – 850 °С

Анализируя полученные результаты, мы можем отметить, что при всех исследуемых температурах в диапазоне от 600 °С до 850 °С скорость дезактивации изменяется со временем. Особенно активно процесс идет в течение первых 10 минут, затем скорость постепенно снижается и к 15-й минуте практически стабилизируется. Данный эффект можно объяснить тем, что количество

адсорбированных радионуклидов на поверхности образцов гораздо больше, чем в приповерхностном слое материала. При нагревании солевые композиции расплавляются и вступают во взаимодействие прежде всего с поверхностным оксидным слоем стали и адсорбированными на нем радионуклидами, тем самым повышая эффективность дезактивации на начальном этапе.

Также одной из причин снижения скорости дезактивации со временем может быть вторичное загрязнение образцов, обусловленное непосредственно самим процессом. Для проверки данного предположения была выполнена серия экспериментов, в которых проводили два цикла дезактивации. Результаты представлены на рис. 5 и 6.

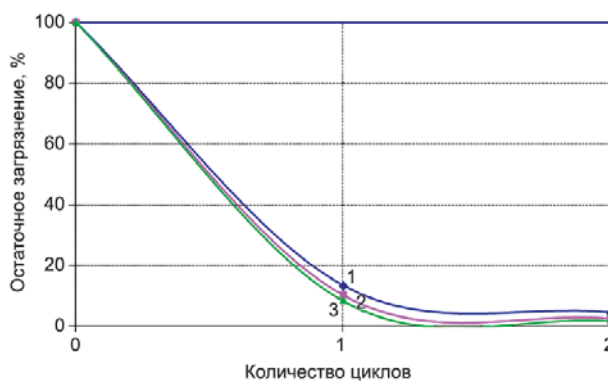


Рис. 5. Зависимость эффективности дезактивации от бета-излучающих радионуклидов солевой композицией №1 от количества и длительности циклов при температуре 850 °С: 1 – 10 мин; 2 – 20 мин; 3 – 30 мин

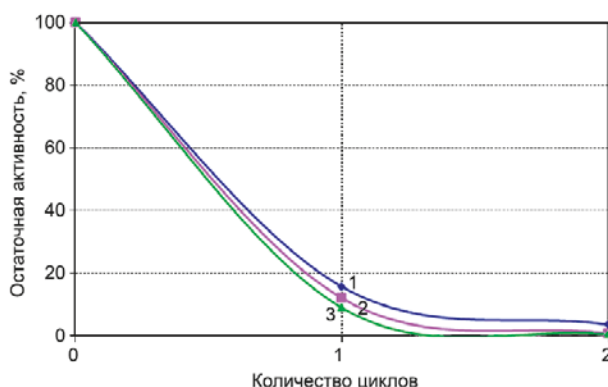


Рис. 6. Зависимость эффективности дезактивации от бета-излучающих радионуклидов солевой композицией №2 от количества и длительности циклов при температуре 850 °С: 1 – 10 мин; 2 – 20 мин; 3 – 30 мин

Представленные на рис. 5 и 6 данные подтверждают, что для достижения близких к фону значений остаточного загрязнения требуется проведение второго цикла ВТД, независимо от длительности первого. Данную закономерность, по-видимому, можно объяснить тем, что во

время проведения первого цикла концентрация радионуклидов в расплаве достаточно велика и происходит вторичное загрязнение более глубоких слоев конструкционного материала, поэтому для полного удаления загрязнения необходимо проведение второго цикла «свежей» солевой композицией.

Параллельно с оценкой эффективности дезактивации проводили исследование коррозионной стойкости нержавеющей стали в расплавленных солях. Контроль за изменением массы осуществляли после удаления слоя окислы. Необходимо отметить, что ее образование более интенсивно проходит при температуре, превышающей 750 °С, при 600–650 °С появляется тонкий слой шлаковой пленки, а при 850 °С — более плотная окислы, которая в ряде случаев удалялась с затруднениями. В целом за время проведения исследований потеря массы нержавеющей стали в виде окислы не превышала 0,1 % от исходной массы образца.

В табл. 1 приведены результаты оценки коррозионных потерь образцов в процессе микротермической дезактивации.

**Таблица 1. Потеря массы образцов из нержавеющей стали в процессе микротермической дезактивации**

Солевая композиция	Температура, °С	Продолжительность цикла, мин	Потеря массы образцов, г/м <sup>2</sup>	
			1 цикл	2 цикл
1	600	10	0	0
		20	0	0
		30	1,00	0
	700	10	24,9	21,3
		20	39,1	29,6
		30	42,7	31,0
	850	10	399	58,7
		20	727	133
		30	803	158
2	600	10	0	0
		20	0	0
		30	1,00	0
	700	10	15,9	10,1
		20	46,4	17,5
		30	47,0	29,2
	850	10	377	93,2
		20	529	151
		30	644	180

Анализ полученных результатов показывает, что на изменение массы образцов влияют состав расплава, температура и продолжительность обработки.

Поскольку выбранные для проведения экспериментов составы солевых композиций незначительно отличаются (в составе № 1 содержание

хлор-иона несколько выше, чем в составе № 2), то и потеря массы в первом случае больше, чем во втором.

Наиболее значимым фактором, определяющим коррозионные потери, является температура. В случае применения обеих солевых композиций при 600 °С нержавеющая сталь начинает корродировать только с ростом продолжительности обработки до 30 мин. При повышении температуры процесса потеря массы образцов значительно увеличивается. Так, при длительности воздействия 20 мин и изменении температуры от 700 °С до 850 °С данный показатель во время первого цикла дезактивации солевой композицией № 1 возрастает в 18,6 раз, при использовании солевой композиции № 2 — в 11,4 раза, а для второго цикла эти величины составляют 4,5 и 8,6 раз соответственно.

Также потеря массы образцов зависит от продолжительности цикла, причем при увеличении времени обработки с 10 до 30 мин коррозионные потери возрастают от 1,5 до 3 раз как при температуре 700 °С, так и при 850 °С. Следует отметить, что потеря массы образцов в одинаковых условиях обработки при втором цикле значительно ниже, чем при первом. Уменьшение скорости коррозии при втором цикле дезактивации, вероятнее всего, обусловлено структурными особенностями строения поверхностного слоя конструкционного материала. За время нахождения в действующем оборудовании радиохимического производства образцы-свидетели подвергались воздействию химических сред при высоких температурах, а также дезактивирующих растворов, что привело к разрушению структуры поверхностного слоя металла, сделало его менее коррозионно-стойким. При втором цикле дезактивации с расплавом контактировал более глубокий слой с плотной структурой, что привело к снижению коррозионного воздействия.

Таким образом, на основании проведенных исследований процесса микрометаллургической дезактивации на образцах-свидетелях из нержавеющей стали, загрязненных в реальных условиях работы радиохимического производства, можно сделать следующие выводы:

1. При использовании сухой солевой композиции, состоящей из смеси хлоридов и сульфатов щелочных металлов, за один цикл удаляется до 95 % радионуклидов. Коэффициенты дезактивации при температуре процесса 850 °С и продолжительности воздействия 30 мин составляют от 18 до 21. Для полного завершения процесса необходимо проведение двух циклов ВТД.

2. На эффективность дезактивации оказывают влияние температура, продолжительность

обработки, а также состав солевой композиции. Изменение указанных параметров позволяет регулировать скорость коррозии и, соответственно, влиять на эффективность процесса.

3. Масса образующихся при микрометаллургической дезактивации твердых РАО в виде окалина не превышает 0,1 % от исходной массы образцов.

### Литература

1. Крицкий В. Г., Родионов Ю. А. Основы дезактивации. Способы и технические средства

дезактивации / Гос. корпорация по атом. энергии «Росатом», ОАО «Вост.-Европ. головной науч.-исслед. и проект. ин-т энергет. технологий» (ОАО «Головной ин-т «ВНИПИЭТ»). — С.-Пб : КСИ-Принт, 2013. — 464 с.

2. Шапошников Н. Г., Зайцев А. И. Использование микрометаллургических процессов на поверхности для дезактивации металлического скрапа. — М. : ЦНИИ черной металлургии им. И. П. Бардина, 2001. — С. 4.

3. Мамаев Л. А., Храбров С. Л. и др. Высокотемпературная дезактивация металлических отходов. — М. : ГНЦ РФ ВНИИНМ, 2001. — С. 8.

---

### Информация об авторах

Кузнецова Наталья Анатольевна, начальник группы дезактивации оборудования и специзделий центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456780, Челябинская обл., Озерск, ул. Ермолаева, д. 18), e-mail: roniku@mail.ru.

Козина Юлия Войтеховна, инженер-технолог центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456780, Челябинская обл., Озерск, ул. Ермолаева, д. 18), e-mail: yuka\_iris@mail.ru.

Габбасова Надежда Руслановна, лаборант-радиохимик центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456780, Челябинская обл., Озерск, ул. Ермолаева, д. 18), e-mail: gabbasova.nadya@mail.ru.

### Библиографическое описание статьи

Кузнецова Н. А., Козина Ю. В., Габбасова Н. Р. Оценка эффективности высокотемпературной дезактивации с использованием солевых композиций применительно к объектам радиохимического производства // Радиоактивные отходы. 2025. № 1 (30) С. 14—19. DOI: 10 25283/2587-9707-2025-1-14-19.

---

## ASSESSMENT OF EFFECTIVENESS OF HIGH-TEMPERATURE DECONTAMINATION WITH SALT COMPOSITIONS AS APPLIED TO RADIOCHEMICAL PRODUCTION FACILITIES

Kuznetsova N. A., Kozina Yu. V., Gabbasova N. R.

FSUE Mayak PA, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, Russia

Article received on October 13, 2024

The article summarizes the studies on the applicability of high-temperature decontamination to radiochemical production equipment. It evaluates the parameters governing the decontamination effectiveness: temperature, salt composition and treatment duration. The study shows that the mass of solid radioactive waste resulting from decontamination does not exceed 0.1% of the initial sample mass.

**Keywords:** decontamination, radioactive contamination, micro-metallurgical high-temperature decontamination method, radioactive waste.

## References

1. Kritskiy V. G., Rodionov Yu. A. *Osnovy dezaktivatsii. Sposoby i tekhnicheskiye sredstva dezaktivatsii* [Fundamentals of Decontamination. Methods and Technical Means of Decontamination]. State Atomic Energy Corporation Rosatom, JSC Eastern European Leading Research and Design Institute of Power Technologies (JSC Leading Institute VNIPIET). Saint-Petersburg, KSI-Print Publ., 2013. 464 p.
2. Shaposhnikov N. G., Zaitsev A. I. *Ispol'zovaniye mikrometallurgicheskikh protsessov na poverkhnosti dlya dezaktivatsii metallicheskogo skrapa* [Micro-metallurgical Processes Applied on the Surface for Metal Scrap Decontamination]. Moscow, Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy Publ., 2001. P. 4.
3. Mamaev L. A., Khrabrov S. L. et al. *Vysokotemperaturnaya dezaktivatsiya metallicheskih otkhodov* [High-Temperature Decontamination of Metal Waste]. Moscow, SSC RF VNIINM, 2001. P. 8.

---

## Information about the authors

*Kuznetsova Natalya Anatolyevna*, Head of the Group on Decontamination of Equipment and Special Products of the Central Plant Laboratory, FSUE Mayak PA (18, Yermolayev st., Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456780, Russia), e-mail: poniku@mail.ru.

*Kozina Yuliya Voitekhovna*, process engineer of the Central Plant Laboratory, FSUE Mayak PA (18, Yermolayev st., Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456780, Russia), e-mail: yuka\_iris@mail.ru.

*Gabbasova Nadezhda Ruslanovna*, assistant radiochemist of the Central Plant Laboratory, FSUE Mayak PA (18, Yermolayev st., Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456780, Russia), e-mail: gabbasova.nadya@mail.ru.

## Bibliographic description

Kuznetsova N. A., Kozina Yu. V., Gabbasova N. R. Assessment of Effectiveness of High-Temperature Decontamination with Salt Compositions as Applied to Radiochemical Production Facilities. *Radioactive Waste*, 2025, no. 1 (30), pp. 14–19. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-1-14-19. (In Russian).