

УДК 621.039.75

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-138-145

## Исследования процесса дезактивации строительных конструкций, загрязненных радиоактивными материалами, сухим методом

В.Л. Софонов, В.В. Тинин, Е.Ю. Карташов, А.Д. Пак, С.А. Ткачук

Выполнены исследования по дезактивационной очистке поверхностей строительных конструкций, находившихся в контакте с радиоактивными материалами (РМ) с использованием передвижной модульной установки сухой механической дезактивации.

Использованы методы сухой дезактивации (установка BRAUN «Wall Shaver BWF Pneumatic»), радиометрического (дозиметр-радиометр ДКС-96) и гранулометрического (лазерный анализатор «Microtrack Bluewave») анализов, фотофиксации (Sony α-6000), шлифовальный и обрезной инструменты, электронные весы (СПВ-60), линейный измерительный инструмент. Разработаны методики проведения исследований процесса сухой дезактивации строительных конструкций, находившихся в контакте с РМ. Определены оптимальные параметры ведения процесса сухой дезактивации при обработке строительных конструкций из различных материалов. Построены графики зависимости степени зачистки различных поверхностей от глубины, времени обработки поверхности и скорости прохода шлифовальной установки. Сделаны выводы о целесообразности применения метода сухой дезактивации строительных конструкций, загрязненных радиоактивными веществами, и даны рекомендации по проведению процесса сухой дезактивации.

Результаты исследований и рекомендации могут быть использованы в реальных производственных условиях при дезактивационной очистке поверхностей строительных конструкций, находившихся в контакте с радиоактивными материалами.

В результате исследований установлено, что толщина слоя материала, снимаемого с очищаемой поверхности, зависит от скорости прохода шлиф-системы. При удалении первых слоев стройматериалов толщиной 3 мм  $\beta$ -активность поверхностей уменьшается в 2...15 раз. Для пористых материалов требуется повторная обработка,  $\alpha$ -активность значительно снижается за один проход. Основная активность распределяется между фракцией из циклона и фильтровально-вытяжным модулем.

**Ключевые слова:** дезактивация строительных конструкций, сухая и механическая дезактивации, шлифовальное оборудование.

**Для цитирования:** Софонов В.Л., Тинин В.В., Карташов Е.Ю., Пак А.Д., Ткачук С.А. Исследования процесса дезактивации строительных конструкций, загрязненных радиоактивными материалами, сухим методом // Вестник МЭИ. 2023. № 5. С. 138—145. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-138-145.

## Studies of the Dry Decontamination of Building Structures Fouled with Radioactive Materials

V.L. Sofronov, V.V. Tinin, E.Yu. Kartashov, A.D. Pak, S.A. Tkachuk

Studies of decontaminating the surfaces of building structures that were in contact with radioactive materials (RM) using a mobile modular installation of dry mechanical decontamination were carried out.

Dry decontamination techniques (BRAUN Wall Shaver BWF Pneumatic installation), radiometric analysis (dosimeter-radiometer DKS-96), granulometric analysis (Microtrack Bluewave laser analyzer), photo recording (Sony α-6000), grinding and cutting tools, electronic scales (SPV-60), and a linear measuring tool were used.

Techniques for studying the dry decontamination process of building structures that were in contact with RM have been developed. The optimal parameters for conducting the dry decontamination process in treating the building structures made of various materials have been determined. Graphs of the decontamination degree of various surfaces versus the treatment depth, surface treatment time, and the grinding unit passage speed have been plotted. Conclusions on the expediency of using the dry decontamination method of building structures fouled with radioactive substances have been drawn, and recommendations for carrying out the dry decontamination process have been given.

The obtained study results and recommendations can be used under real production conditions for decontaminating the surfaces of building structures that have been in contact with radioactive materials.

It has been found as a result of the studies that the thickness of the material layer removed from the surface to be decontaminated depends on the grinding system passage speed. In removing the first layers of building materials with a thickness of 3 mm, the  $\beta$ -activity of the surfaces decreases by 2 to 15 times. Porous materials require re-treatment;  $\alpha$ -activity is significantly reduced in one pass. The main activity is distributed between the fraction from the cyclone and the filter-exhaust module.

**Key words:** decontamination of building structures, dry decontamination, mechanical decontamination, grinding equipment.

**For citation:** Sofronov V.L., Tinin V.V., Kartashov E.Yu., Pak A.D., Tkachuk S.A. Studies of the Dry Decontamination of Building Structures Fouled with Radioactive Materials. Bulletin of MPEI. 2023;5:138—145. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-138-145.

## Состояние вопроса

В [1 — 6] отмечено, что многие радиационно-опасные объекты (ядерные энергоблоки, радиохимические производства, площадки научно-исследовательских организаций и т.п.) исчерпали свой ресурс и подлежат выводу из эксплуатации. Вывод из эксплуатации предприятия, как правило, предусматривает большой объем дезактивационных работ, проводимых с целью освобождения от радиационного контроля максимального количества материалов для снижения риска опасного облучения персонала, занятого выполнением демонтажа, а также во избежание распространения радиоактивных загрязнений (в частности, с радиоактивной пылью) по другим помещениям и территории предприятия в целом.

Способы дезактивации в зависимости от характера протекания процесса подразделяют на физико-механические (радиоактивное загрязнение удаляют с помощью механических или физических процессов без применения химических реагентов за исключением воды), химические (жидкостные способы, в которых основным средством воздействия является раствор химических реагентов) и физико-химические (сочетают в себе химические, физические и механические процессы) [7 — 12].

В настоящее время намечается тенденция к снижению жидкостных отходов, образующихся при дезактивации жидкостными методами [13, 14]. В связи с этим становится актуальным применение, так называемых, «сухих» методов дезактивации. К ним относят механические процессы обработки поверхностей, в результате которых поверхностный слой материала удаляется вместе с содержащимися в нем радиоактивными загрязнениями. Данные методы высокоеффективны, но вследствие больших потерь поверхностного материала подходят в основном для грубообработанных поверхностей или в целях использования очищенного металла в качестве вторичного сырья [15, 16].

Шлифование, крацевание и полирование — самые распространенные методы механической обработки поверхности. С помощью них достигается требуемое качество поверхности и повышается коррозионная стойкость изделий [17 — 20].

## Постановка задачи

Суть задачи — испытание установки «Wall Shaver BWF Pneumatic» фирмы «BRAUN Maschinenfabrik» (Австрия) (роторной дезактивационной установки) для сухой дистанционной очистки незагрязненных и загрязненных радиоактивными веществами поверхностей различных строительных материалов.

## Метод решения и допущения

Для решения поставленной задачи дезактивационную очистку строительных материалов предложено проводить при помощи высокопроизводительной ро-

торной шлифовальной дезактивационной установки со снятием слоя загрязненной поверхности целиком на контролируемую глубину. Отличительной особенностью установки является возможность обработки (шлифования) поверхностей материалов различной морфологии. Это даёт возможность апробации данной системы для дезактивации крупных строительных конструкций, имеющих поверхностное загрязнение радиоактивными веществами.

## Схема установки и методика проведения экспериментов

Установка сухой дистанционной дезактивации представляет собой механизированное устройство, шлифующее поверхности при помощи специальной вращающейся фрезы на определенную заданную глубину. Её производительность определяется, в первую очередь, сопротивлением обрабатываемого материала (его прочностью) и заглублением шлифовальной головки в материал. Роторная шлифовальная дезактивационная установка изображена на рис. 1.

Её основой является сборно-разборная рама, на которой смонтирована режущая головка — сегментная шлифовальная чашка диаметром 600 мм в пылесборном кожухе со съемными сегментами для шлифования. Рама крепится к зачищаемой поверхности при помощи вакуумных подушек, приводимых в действие вакуумным насосом, либо посредством механических башмаков и анкеров.

Пыль, образующаяся при обработке поверхности, захватывается потоком воздуха и поступает в фильтровально-вытяжной модуль (ФВМ), подсоединённый к пылесборному кожуху установки. Основной объем пыли отбивается на циклонном пресс-апараторе и собирается в мешке-сборнике, прикрепленном к нему. Затем мелкие частицы пыли поступают в фильтровальный модуль, оснащенный НЕРА-фильтром и собираются в мешке-сборнике.

## Технические характеристики оборудования

### Установка сухой роторной дезактивации:

Выходная мощность, кВт ..... 18

Максимальная глубина слоя, зачищаемого с одного прохода, мм ..... 10

Диаметр шлифовальной тарелки, мм ..... 600

Частота вращения выходного вала мотора, об/мин ..... 0...1200

Охлаждение ..... жидкостное

### Система фильтровально-вытяжного модуля:

Мощность, кВт ..... 9,2

Производительность, м<sup>3</sup>/ч ..... 800

Исследования на установке проходили в два этапа. На первом этапе замеряли основные параметры работы установки при шлифовании различных типов незагрязненных радиоактивными веществами (РВ) поверхностей, определяли оптимальные режимы её работы и оценивали скорость снятия загрязнений на заданной глубине. На втором — исследовали возможности

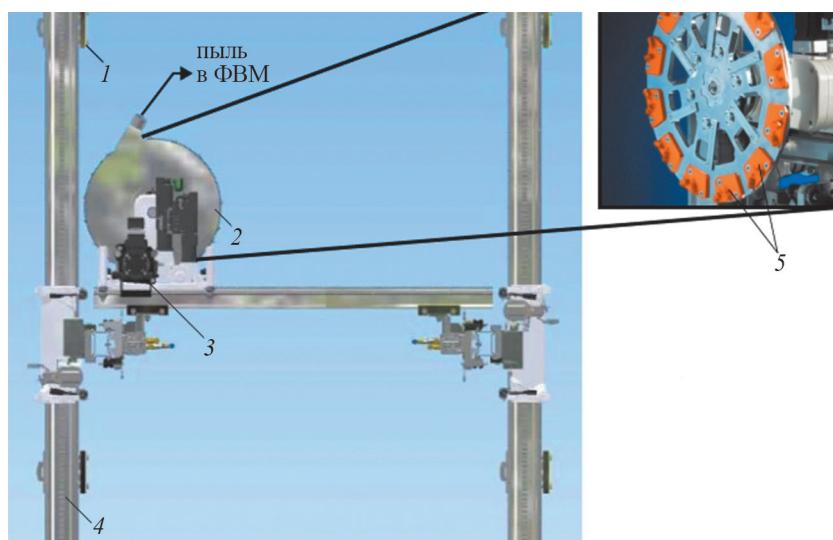


Рис. 1. Роторная дезактивационная установка:

1 — механические крепления анкерного типа; 2 — режущая головка в кожухе; 3 — двигатель с водяным охлаждением; 4 — направляющие рельсы; 5 — режущие сегменты (фреза)

установки по дезактивации строительных материалов, загрязненных РВ, а также определяли эффективность работы ФВМ.

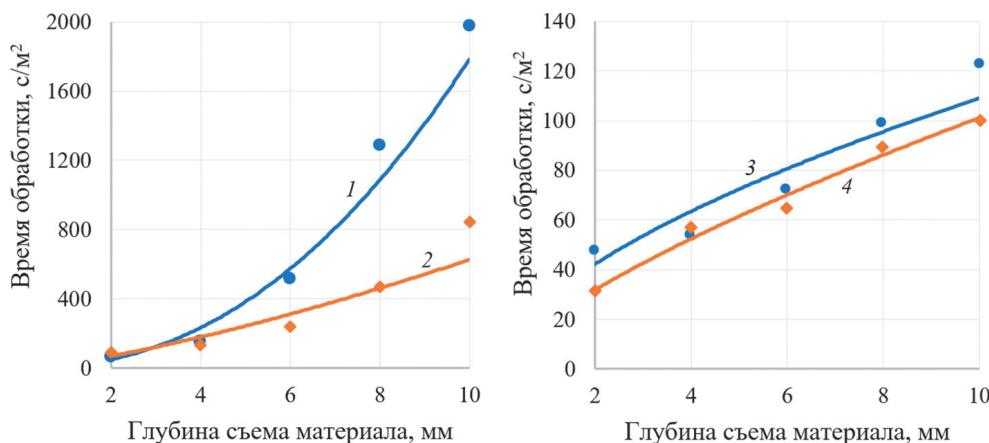
Исходя из диаметра шлифовальной головки и мощности двигателя производителем установки рекомендована работа фрезы при максимальной скорости вращения ротора, поэтому этот параметр был оставлен без изменения и соответствовал максимальному значению.

#### Результаты исследований и анализ полученных данных

Для проведения первого этапа работы выбраны следующие поверхности: железобетонная и керамзитобетонная плиты, кирпичи, оштукатуренные песчано-цементной штукатуркой и покрытые лакокрасочным

(ЛК) слоем. Исследования проводили как на горизонтально уложенных образцах (в том числе полах), так и на вертикальных поверхностях (стены). Толщина снимаемого слоя варьировалась в пределах 1...10 мм.

Зависимости времени зачистки различных поверхностей от глубины обработки и скорости перемещения фрезы (результаты экспериментов) представлены на рис. 2, 3. Каждое значение времени обработки поверхности соответствует среднему из полученных данных по 5 — 10 экспериментам. Различия по времени шлифования в каждой серии экспериментов не превышали 25%. Разброс показателя обработки для одинаковых поверхностей между сериями экспериментов объясняется неровностями последних, а также различными включениями (гравий, арматура), замедляющими процесс шлифования.

Рис. 2. Зависимости времени обработки 1 м<sup>2</sup> поверхности от глубины:

1 — железобетон ( $y = 10,699x^{2,2225}$ ;  $R^2 = 0,9671$ ); 2 — керамзитобетон ( $y = 27,03x^{1,3645}$ ;  $R^2 = 0,9055$ ); 3 — кирпич ( $y = 28,025x^{0,5899}$ ;  $R^2 = 0,8954$ ); 4 — штукатурка ( $y = 19,361x^{0,7118}$ ;  $R^2 = 0,9837$ )

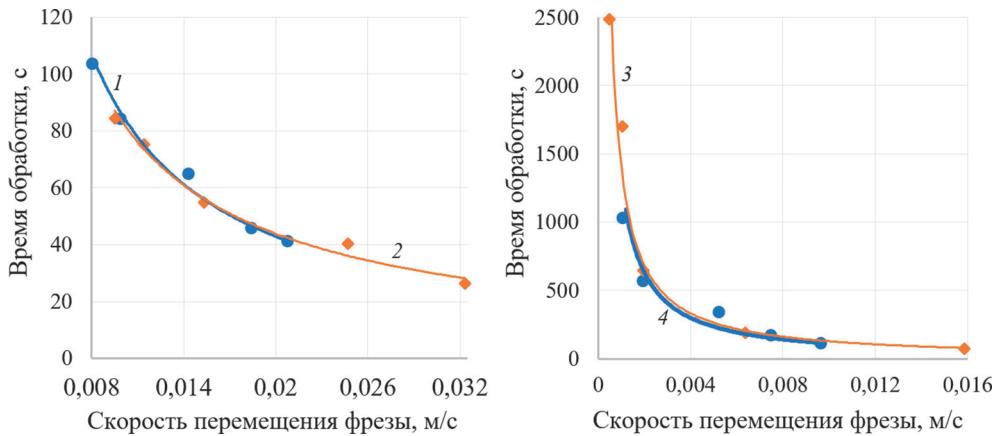


Рис. 3. Зависимости времени обработки поверхности от скорости перемещения фрезы:  
1 — кирпич ( $y = 0,8642x^{-0,998}$ ;  $R^2 = 0,987$ ); 2 — штукатурка ( $y = 1,1836x^{-0,923}$ ;  $R^2 = 0,9789$ ); 3 — железобетон ( $y = 1,0671x^{-1,04}$ ;  $R^2 = 0,9858$ ); 4 — керамзитобетон ( $y = 0,7996x^{-1,073}$ ;  $R^2 = 0,9326$ )

В результате обработки полученных данных установлено, что наиболее достоверно указанные выше зависимости описываются уравнением степенной функции

$$y = kx^n,$$

где  $y$  — время обработки  $1 \text{ м}^2$  поверхности, с/см $^2$  (см. рис. 2) (время обработки, с (см. рис. 3));  $k$  — коэффициент;  $x$  — глубина съема материала, мм (см. рис. 2) (скорость перемещения фрезы, м/с (см. рис. 3));  $n$  — показатель степени.

Из данных, приведенных на рис. 2, 3, следует, что в исследуемом диапазоне параметров время, необходимое для зачистки поверхностей, зависит как от толщины удаляемого слоя материала, скорости перемещения фрезы, так и от вида очищаемой поверхности. Оно возрастает с увеличением толщины удаляемого слоя последовательно от штукатурки к железобетону.

#### Исследование процессов дезактивации шлифованием

В качестве объектов исследования выбраны стены и полы производственных помещений загрязненных РМ. Шлифованию подверглись следующие загрязненные поверхности: керамзитобетон, штукатурка, кирпич красный полнотелый, железобетон, мраморная плитка. На основании полученных данных заглубление шлифовальной головки проводили на  $\sim 3$  мм. Результаты экспериментов представлены на рис. 4.

Из графиков на рис. 4 видно, что плотность потока  $\beta$ -частиц в начальные моменты времени составляет от 200 до 800 частиц/(мин·см $^2$ ). При удалении первых слоев стройматериалов толщиной 3 мм активность уменьшается от 2 до 15 раз. Величину поверхностного загрязнения измеряли дозиметром-радиометром ДКС-96. В случае с кирпичом и мраморной плиткой

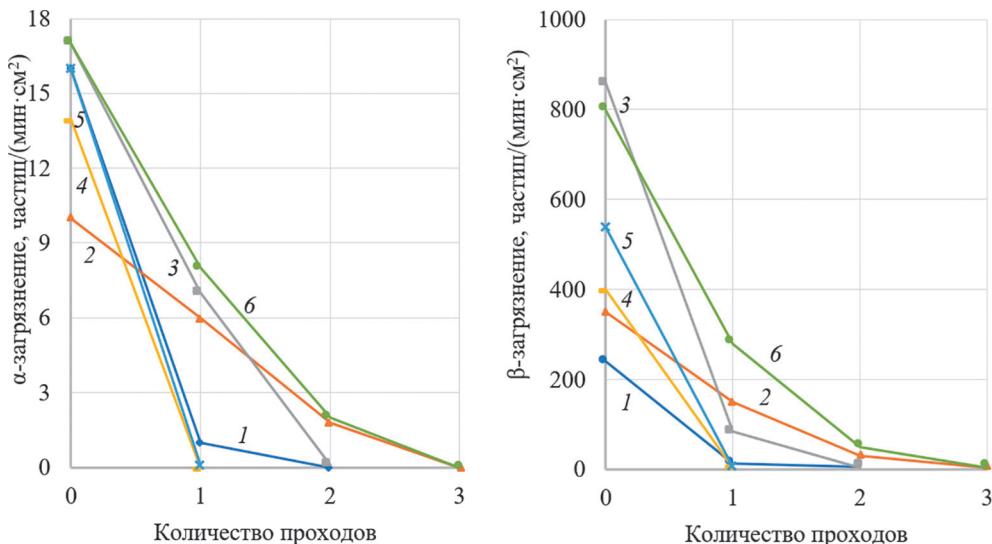


Рис. 4. Зависимости величины  $\alpha$ -,  $\beta$ -загрязнения от количества проходов шлифовальной установкой обрабатываемых материалов:  
1 — керамзитобетон № 1; 2 — керамзитобетон № 2; 3 — штукатурка; 4 — кирпич; 5 — мраморная плита; 6 — железобетон

снижение фона радиоактивного излучения до требуемых величин было достигнуто с первого захода. Для керамзитобетона, штукатурки и железобетона потребовался повторный съем материала, что объясняется повышенной сорбционной способностью веществ к различным загрязнениям. Измеренная  $\alpha$ -активность исходных образцов — невелика и варьируется в диапазоне от 10 до 17 частиц/(мин $\cdot$ см $^2$ ). Как и ожидалось, вся активность удалялась с поверхности за один проход.

Активность порошков стройматериалов, уловленных при обработке поверхностей системой фильтрации установки, составила по  $\alpha$ -активности — 0,2 частиц/(мин $\cdot$ см $^2$ ), по  $\beta$ -активности — 26...32 частиц/(мин $\cdot$ см $^2$ ). Данные показатели соответствуют классу опасности очень низкоактивных отходов (ОНАО). Отмечено удовлетворительное соответствие результатов экспериментов (в пределах  $\pm 15\%$ ) уравнениям зависимости времени обработки от скорости перемещения фрезы.

#### Оценка эффективности системы вакуумного пылеудаления

Порошки (пыль), выходящие из-под фрезы, были условно разделены на несколько видов:

- собранные на циклоне;
- собранные в мешки фильтровального модуля;
- шлифотходы, неуловленные системой.

Контролю подверглись следующие параметры: масса порошков, значения удельных  $\alpha$ -,  $\beta$ -активностей, анализ гранулометрического состава порошков. Проведен анализ пробы воздуха рабочей зоны на содержание  $\alpha$ -активных нуклидов.

На рисунке 5 продемонстрированы результаты по распределению количества порошка, улавливаемого при зачистке поверхностей со штукатуркой и кирпичной кладкой.

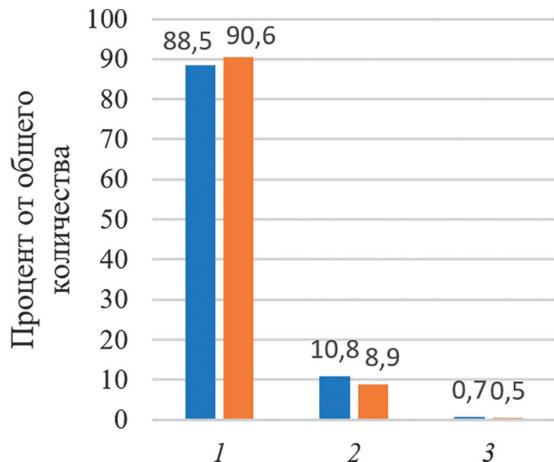


Рис. 5. Гистограмма распределения продуктов обработки на фильтре, циклоне и неуловленной части:

1 — циклон; 2 — ФВМ; 3 — просыпь; ■ — штукатурка; ■ — кирпич

Из данных рис. 5 следует, что основная масса шлифпорошка улавливается в циклоне (88...90%), до 11% оседает на фильтре и примерно 0,5...0,7% пыли (тонкого порошка) не захватывается системой и оседает на близлежащие поверхности (в том числе и на саму установку).

Определение гранулометрического состава порошка, собранного на разных стадиях улавливания шлифотходов, проводили лазерным анализатором «Microtrack Bluewave». Результаты гранулометрического анализа сведены в таблицу. Видно, что просыпи представлены частицами размером  $\sim 274\ldots324$  мкм, в циклоне собирается фракция  $\sim 202\ldots260$  мкм, а на фильтре тонкой очистки — фракция  $\sim 54\ldots57$  мкм.

В процессе испытаний измеряли удельную активность собранных порошков в местах наиболее за-

#### Результаты гранулометрического анализа и радиационного контроля

Обрабатываемая поверхность	Место отбора	Среднее значение объемного размера частиц, мкм	Стандартное отклонение относительно среднего значения	Удельная активность, Бк/г	
				$\alpha$	$\beta$
Керамзитобетон	Просыпь	324,2	0,80	2,20	15,90
	Циклон	232,7	1,72	2,10	15,80
	ФВМ	57,18	4,57	0,90	6,800
Кирпич	Просыпь	302,7	0,91	12,1	270,4
	Циклон	207,5	1,66	9,80	190,1
	ФВМ	55,92	4,81	1,50	27,30
Железобетон	Просыпь	317,2	0,82	8,10	201,8
	Циклон	202,2	1,93	7,90	140,0
	ФВМ	56,87	4,76	3,10	12,40
Штукатурка	Просыпь	274,7	1,04	17,4	450,9
	Циклон	259,5	1,18	18,2	395,4
	ФВМ	54,00	4,65	2,10	31,70

грязненных поверхностей. Установлено, что основная активность приходится на порошки, уловленные в циклоне.

### Заключение

Выполнены комплексные исследования по сухой очистке незагрязненных и загрязненных РВ поверхностей строительных материалов на передвижной модульной установке BRAUN «Wall Shaver BWF Pneumatic» с фильтровально-вытяжным модулем (ФВМ).

В процессе испытаний системы установлено, что:

- оптимальные параметры ведения процесса при обработке поверхностей из керамзитобетона, железобетона и кирпича достигаются в режиме, при котором фреза установки заглубляется в материал на 3...5 мм, а оштукатуренных поверхностей — до 10 мм;
- поверхности из керамзитобетона, железобетона и кирпича загрязнены РВ на глубину до 3 мм, поэтому они очищаются до допустимых норм от  $\beta$ - и  $\alpha$ -активностей за один проход. Пористые материалы (оструктурированные поверхности) загрязнены  $\beta$ -активными РВ на большую глубину (до 10 мм), поэтому потребовался повторный проход фрезой. При этом  $\alpha$ -активные РВ проникают, как и ожидалось, на меньшую глубину, следовательно, они полностью удаляются за один проход фрезы;

### Литература

1. Коряковский, Ю.С., Доильницын В.А., Акаторов А.А. Дезактивация: обеспечение радиационной безопасности на предприятиях ядерной отрасли. СПб: Изд-во СПБГТИ (ТУ), 2010.
2. Скачек М.А. Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС. М.: Издат. дом МЭИ, 2007.
3. Василенко В.А., Ефимов А.А., Степанов И.К. Технологии обеспечения радиационной безопасности на объектах с ЯЭУ. СПб: ООО НИЦ Моринтех, 2010.
4. Gafarova V., Kulagina T. Safe Methods of Radioactive Waste Utilization// J. Siberian Federal University: Engineering & Technol. 2016. V. 4. Pp. 585—597.
5. Шеленкова В.В., Кулагина Т.А. Совершенствование технологии дезактивации оборудования с радиоактивным загрязнением // Радиоактивные отходы. 2021. № 1(14). С. 28—38.
6. Kumar V., Goel R., Chawla R., Silambarsan M., Sharma R.K. Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear Decontamination: Recent Trends and Future Perspective // J. Pharmacy & Bioallied Sci. 2010. V. 3. Pp. 220—238.
7. Кулагина Т.А. Шеленкова В.В. Способы дезактивации поверхностей с радиоактивным загрязнением // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». 2017. № 3(10). С. 352—363.
8. Цыпышева М.В., Аксенов С.Г., Синагатуллин Ф.К. Средства и меры, применяемые для дезак-

• гранулометрический анализ продуктов зачистки поверхностей показал, что частицы просыпи представлены размером  $\sim 274\ldots24$  мкм, в циклоне собирается фракция  $\sim 202\ldots260$  мкм, а на фильтре тонкой очистки — фракция  $\sim 54\ldots57$  мкм;

• основная активность собранных порошков распределена между фракциями из циклона и фильтровально-вытяжного модуля.

В процессе испытаний выявлены следующие достоинства установки, которые выгодно отличают этот метод от существующих аналогов.

Применение роторной шлифовальной установки позволяет дезактивировать не только загрязнённые РВ участки различных поверхностей, но и проводить масштабные зачистки практически от любых, в том числе и нерадиоактивных, материалов. В отличие от других механических способов дезактивации возможно точное регулирование глубины обработки, что значительно уменьшает количество образующихся твердых радиоактивных отходов.

Установка эффективно используется на очистке прочных, устойчивых к механическим воздействиям материалов, например, бетона. Ее применение значительно сокращает время дезактивации и требует минимальное количество персонала.

### References

1. Koryakovskiy, Yu.S., Doil'nicyn V.A., Akatov A.A. Dezaktivaciya: Obespechenie Radiacionnoy Bezopasnosti na Predpriyatiyah Yadernoy Otrasli. SPB: Izd-vo SPBGTI (TU), 2010. (in Russian).
2. Skachek M.A. Obrashchenie s Otrabotavshim Yadernym Toplivom i Radioaktivnymi Otkhodami AES. M.: Izdat. Dom MEI, 2007. (in Russian).
3. Vasilenko V.A., Efimov A.A., Stepanov I.K. Tekhnologii Obespecheniya Radiacionnoy Bezopasnosti na Ob'ektakh s YAEU. SPb: OOO NIC Morintekh, 2010. (in Russian).
4. Gafarova V., Kulagina T. Safe Methods of Radioactive Waste Utilization. J. Siberian Federal University: Engineering & Technol. 2016;4:585—597.
5. Shelenkova V.V., Kulagina T.A. Sovremenstvovanie Tekhnologii Dezaktivacii Oborudovaniya s Radioaktivnym Zagryazneniem. Radioaktivnye Otkhody. 2021; 1(14):28—38. (in Russian).
6. Kumar V., Goel R., Chawla R., Silambarasan M., Sharma R.K. Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear Decontamination: Recent Trends and Future Perspective. J. Pharmacy & Bioallied Sci. 2010;3: 220—238.
7. Kulagina T.A. Shelenkova V.V. Sposoby Dezaktivacii Poverkhnostey s Radioaktivnym Zagryazneniem. Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo Universiteta. Seriya «Tekhnika i Tekhnologii». 2017;3(10):352—363. (in Russian).
8. Cypysheva M.V., Aksenov S.G., Sinagatullin F.K. Sredstva i Mery, Primenyayemye dlya Dezakti-

- тивации // Студенческий форум. 2021. № 42–2(178). С. 43—44.
9. Buckentin J., Darnkroger B., Schlienger M. Radioactive Scrap Metal Decontamination Technology Assessment Rep. Oak Ridge: Sandia National Lab., 1996.
10. Лашенова Т.Н. Семеновых С.В., Ермаков А.И. Обеспечение требования радиационной безопасности при выводе из эксплуатации радиационно опасных объектов // Гигиена и санитария. 2017. № 9(96). С. 818—821.
11. Fourie E. Decommissioning of Nuclear Fuel Cycle Facilities // Nuclear Decommissioning. Vienna: Intern. Atomic Energy Agency, 2012. Pp. 627—663.
12. Михайленко В.С., Кириллова Н.В., Кича М.А. Современные методы и средства дезактивации в военно-морском флоте // Вестник Международной академии экологии и безопасности жизнедеятельности. 2021. № 4(26). С. 15—18.
13. Алешин А.М., Змитродан А.А., Кривобоков В.В. Разработка и применение технологии дезактивации оборудования и трубопроводов наземного стенда-прототипа транспортной ЯЭУ // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. 2019. № 4(18). С. 34—49.
14. Ojovan M., Lee W., Kalmykov S. Pre-treatment of Radioactive Wastes // An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation. N.-Y.: Elsevier Sci. 2014. Pp. 217—230.
15. Корягин С.И., Пименов И.В., Худяков В.К. Способы обработки материалов. М.: Изд-во Калининградского ун-та, 2000.
16. Городинский С.М., Гольдштейн Д.С. Дезактивация полимерных материалов. М.: Атомиздат, 1981.
17. Зимон А.Д., Пикалов В.К. Дезактивация. М.: ИздАТ, 1994.
18. Noynaert L. Decontamination Processes and Technologies in Nuclear Decommissioning Projects // Nuclear Decommissioning. Vienna: Intern. Atomic Energy Agency, 2012. Pp. 319—345.
19. Mansiev G.G. Дезактивация радиоактивных загрязнений // Евразийский союз ученых. 2015. № 5–3(14). С. 123—125.
20. Широков С.С., Кузнецов А.Ю., Холопова О.В. Исследование процесса дезактивации металлических изделий с учетом обратной сорбции радионуклидов // Радиохимия. 2015. № 2. С. 154—156.
- vatci. Studencheskiy Forum. 2021;42–2(178):43—44. (in Russian).
9. Buckentin J., Darnkroger B., Schlienger M. Radioactive Scrap Metal Decontamination Technology Assessment Rep. Oak Ridge: Sandia National Lab., 1996.
10. Lashchenova T.N. Semenovykh S.V., Ermakov A.I. Obespechenie Trebovaniya Radiacionno Bezopasnosti pri Vyvode iz Ekspluatacji Radiacionno Opasnykh Ob'ektor. Gigiena i Sanitariya. 2017;9(96):818—821. (in Russian).
11. Fourie E. Decommissioning of Nuclear Fuel Cycle Facilities. Nuclear Decommissioning. Vienna: Intern. Atomic Energy Agency, 2012:627—663.
12. Mikhaylenko V.S., Kirillova N.V., Kicha M.A. Sovremennye Metody i Sredstva Dezaktivacii v Venno-morskom Flote. Vestnik Mezhdunarodnoy Akademii Ekologii i Bezopasnosti Zhiznedeyatel'nosti. 2021; 4(26):15—18. (in Russian).
13. Aleshin A.M., Zmitrodan A.A., Krivobokov V.V. Razrabotka i Primenenie Tekhnologii Dezaktivacii Oborudovaniya i Truboprovodov Nazemnogo Stenda-prototipa Transportnoy YAEU. Tekhnologii Obespecheniya Zhiznennogo Cikla Yadernykh Energeticheskikh Ustanovok. 2019;4(18):34—49. (in Russian).
14. Ojovan M., Lee W., Kalmykov S. Pre-treatment of Radioactive Wastes. An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation. N.-Y.: Elsevier Sci. 2014:217—230.
15. Koryagin S.I., Pimenov I.V., Khudyakov V.K. Sposoby Obrabotki Materialov. M.: Izd-vo Kaliningradskogo Un-ta, 2000. (in Russian).
16. Gorodinskiy S.M., Gol'dshteyn D.S. Dezaktivaciya Polimernykh Materialov. M.: Atomizdat, 1981. (in Russian).
17. Zimon A.D., Pikalov V.K. Dezaktivaciya. M.: IzdAT, 1994. (in Russian).
18. Noynaert L. Decontamination Processes and Technologies in Nuclear Decommissioning Projects. Nuclear Decommissioning. Vienna: Intern. Atomic Energy Agency, 2012:319—345.
19. Mansiev G.G. Dezaktivaciya Radioaktivnykh Zagravzeniy. Evraziyskiy Soyuz Uchenykh. 2015;5–3(14): 123—125. (in Russian).
20. Shirokov S.S., Kuznecov A.Yu., Kholopova O.V. Issledovanie Processa Dezaktivacii Metallicheskikh Izdeliy s Uchetom Obratnoy Sorbtsii Radionuklidov. Radiokhimiya. 2015;2:154—156. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Софронов Владимир Леонидович** — доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института — филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», e-mail: vlsorfonov@mephi.ru

**Тинин Василий Владимирович** — кандидат технических наук, технический директор АО «Сибирский химический комбинат», e-mail: shk@atomsib.ru

**Карташов Евгений Юрьевич** — кандидат технических наук, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и атомных производств Северского технологического института — филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», e-mail: kart.62@yandex.ru

**Пак Александр Дмитриевич** — аспирант кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института — филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», e-mail: pak.alex96@gmail.com

**Ткачук Семён Александрович** — преподаватель кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института — филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», e-mail: semenaleksandroviht@gmail.com

**Information about authors:**

**Sofronov Vladimir L.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Chemistry and Technology of Materials of Modern Power Engineering Dept., Seversk Technological Institute — Branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», e-mail: vlssofronov@mephi.ru

**Tinin Vasiliy V.** — Ph.D. (Techn.), Technical Director of JSC «Siberian Chemical Plant», e-mail: shk@atomsib.ru

**Kartashov Evgeniy Yu.** — Ph.D. (Techn.), Head of Machinery and Apparatus of Chemical and Nuclear Production Dept., Seversk Technological Institute — Branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», e-mail: kart.62@yandex.ru

**Pak Aleksandr D.** — Ph.D.-student of Chemistry and Technology of Materials of Modern Power Engineering Dept., Seversk Technological Institute — Branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», e-mail: pak.alex96@gmail.com

**Tkachuk Semen A.** — Teacher of Chemistry and Technology of Materials of Modern Power Engineering Dept., Seversk Technological Institute — Branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», e-mail: semenaleksandroviht@gmail.com

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 20.02.2023

**The article received to the editor:** 20.02.2023

**Статья принята к публикации:** 06.06.2023

**The article has been accepted for publication:** 06.06.2023