



Дезактивация загрязненных металлических поверхностей с помощью импульсных лазерных установок

В.П. Хантов[✉], К.В. Сергеев, В.В. Осипов, О.А. Рачкова, Е.Ф. Егоров

Федеральное государственное военное казенное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко (г. Кострома)»
Министерства обороны Российской Федерации
156015, Российская Федерация, г. Кострома, ул. Горького, д. 16
✉ e-mail: varhbz@mil.ru

Основные моменты

Существует необходимость совершенствования подходов удаления радиоактивных веществ с зараженных поверхностей, возникающих в ходе деятельности катастроф на ядерных объектах и применения ядерного оружия.

Актуальность. В процессе своего эволюционного развития традиционные технологии специальной обработки подошли к потенциальному технологическому пределу и не всегда в полной мере удовлетворяют нуждам войск РХБ защиты по технологическим, технико-экономическим и экологическим показателям.

Цель работы – оценить преимущества применения электромагнитного излучения лазера для дезактивации загрязненных поверхностей.

Материалы и методы исследования. Использовались англоязычные источники, доступные через базы данных Google Scholar. Анализ информации проводился от частного к общему. Рассматривались принципы электромагнитного излучения.

Обсуждение. Термические способы специальной обработки основаны на подводе к загрязненной (зараженной) поверхности высокоинтенсивных потоков энергии в виде светового излучения ИК-диапазона, обработке поверхности высокотемпературным газовым потоком и т.п. Это является основной предпосылкой для дезактивации объектов высокотемпературным воздействием – электромагнитным излучением с использованием лазера. Лазерная дезактивация делает возможным не только снижение дозовых нагрузок на личный состав, но и может обеспечить возврат в производство применяемой при ликвидации последствий техногенных катастроф дорогостоящей техники. В связи с этим возникает закономерный вопрос возможности и целесообразности применения лазеров для реализации специальной обработки ВВСТ. Хорошей интегрируемости волоконных лазеров в технологию специальной обработки способствует возможность транспортировки луча лазера по оптоволокну на расстояние в несколько десятков метров практически без потери мощности. Отсутствие в волоконных лазерах юстируемых узлов, а также расходных элементов и материалов обеспечивает высокую надежность их работы.

Заключение. Современные оптоволоконные лазеры имеют небольшие геометрические размеры, низкое энергопотребление, небольшой вес, не требуют создания специальных условий по климатическим характеристикам и загрязненности атмосферы, поэтому, как ожидается, достаточно легко интегрируются в технологические линии технических средств специальной обработки.

Ключевые слова: волоконные лазеры; радиоактивное вещество; специальная обработка; техническое средство; электромагнитное излучение

Для цитирования: Хантов В.П., Сергеев К.В., Осипов В.В., Рачкова О.А., Егоров Е.Ф. Дезактивация загрязненных металлических поверхностей с помощью импульсных лазерных установок. Вестник войск РХБ защиты. 2025;9(1):92–100. EDN:atbjyw.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-1-92-100>

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов: нет.

Финансирование: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко (г. Кострома)» Министерства обороны Российской Федерации.

Поступила 05.10.2024 г. Исправленный вариант 20.10.2024 г. Принята к публикации 27.11.2024 г.

Deactivation of Contaminated Metal Surfaces by Means of Pulsed Laser Systems

Vyacheslav P. Khantov✉, Konstantin V. Sergeyev, Vladimir V. Osipov, Olga A. Rachkova, Evgenii F. Egorov

Nuclear Biological Chemical Defence Military Academy Named after Marshal of the Soviet Union S.K. Timoshenko (Kostroma), the Ministry of Defence of the Russian Federation, Gorkogo Str. 16, Kostroma 156015, Russian Federation
✉ e-mail: varhbz@mil.ru

Highlights

It is necessary to improve methods that permit to eliminate radioactive substances from surfaces that are being contaminated as a result of nuclear industry activity.

Relevance. In the course of development, conventional decontamination methods have reached their potential technological limit and nowadays may not totally meet the needs of Russian NBC Protection Troops in technological, economic and ecological aspects.

Purpose of the study is to evaluate advantages of laser electromagnetic emission in terms of contaminated surfaces deactivation.

Materials and methods. The authors of this paper have analyzed the English language sources available on Google Scholar. Particular-to-general analysis was employed. The article has addressed electromagnetic emission laws.

Discussion. The essence of thermal decontamination methods is that contaminated surface is treated with energy flows of high intensity in the form of infrared light emissions or hyperthermal gas flow, etc. This is the basic premise for deactivation of items by hyperthermal impact or electromagnetic emission to be exact. It should be emphasized that deactivation by laser permits to decrease radiation burden for military personnel as well as helps to return to production expensive equipment used to eliminate the consequences of technological disasters. Considering the mentioned above, we should think over the possibility and necessity of use of lasers to decontaminate armaments and military and special purpose equipment. The optical fiber lasers can be easily integrated into processing lines for decontamination devices due to the fact that a laser beam can go along optic fiber at a distance of several tens of meters without losing power. There are no adjustable knots and expendable materials in optical fiber lasers, that is why they are very reliable and efficient.

Conclusions. Modern optical fiber lasers have small dimensions, low power consumption and low weight. They don't require special climatic or air clarity conditions that is why they are supposed to be easily integrated into processing lines for decontamination devices.

Keywords: optical fiber laser; radioactive substance; decontamination; device; electromagnetic emission

For citation: Khantov V.P., Sergeyev K.V., Osipov V.V., Rachkova O.A., Egorov E.F. Deactivation of Contaminated Metal Surfaces by Means of Pulsed Laser Systems. *Journal of NBC Protection Corps*. 2025;9(1):92–100. EDN:atbjyw. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-1-92-100>

Financial disclosure: The authors have no financial interests in the submitted materials or methods.

Conflict of interest statement: The authors declare no conflict of interest.

Funding: Nuclear Biological Chemical Defence Military Academy Named after Marshal of the Soviet Union S.K. Timoshenko (Kostroma), the Ministry of Defence of the Russian Federation.

Received October 5, 2024. Corrected October 20, 2024. Accepted November 27, 2024

Учитывая возможные масштабы боевого применения оружия массового поражения (ОМП), а также трудоемкость и наличие большого количества этапов процесса дезактивации, можно говорить о том, что проведение данного мероприятия на уровне современных требований, как по срокам, так и по технической эффективности возможно только при наличии соответствующей системы средств и способов специальной обработки [1].

Цель работы – оценить преимущества применения электромагнитного излучения лазера для дезактивации загрязненных поверхностей.

Материалы и методы исследования. Использовались англоязычные источники, доступные через базы данных Google Scholar. Анализ информации проводился от частного к общему. Рассматривались принципы электромагнитного излучения. Первичный поиск публикаций проводился с помощью логических операторов: Radiological contamination; Decontamination methods; Laser beam decontamination; Laser cleaning; Fiber-optics lasers. Ручным поиском и исследованием библиографии найденных источников, отбирались источники, релевантные цели исследования. После удаления дубликатов и нерелевантных источников осталось 23. Их анализ проводился от частного к общему.

Средства и способы специальной обработки

Под системой средств и способов специальной обработки нужно понимать совокупность закономерно связанных между собой способов обработки и технических средств, предназначенных, в том числе, для дезактивации.

Очевидно, что подобная система уже разработана и внедрена в войска, но вопросы ее постоянного совершенствования могут решаться только на базе четкого представления и понимания научно-технических основ специальной обработки.

Данные основы представляют собой совокупность знаний о:

- закономерностях и механизмах процессов загрязнения (заражения) и дезактивации (дегазации, дезинфекции) тех или иных объектов;

- решении задач, обеспечивающих создание и совершенствование системы способов и средств дезактивации (дегазации, дезинфекции).

При этом особенности радиоактивного загрязнения объектов, физико-химические основы способов дезактивации, возможности, эффективность и организационные формы ее проведения, а также тенденции развития дезактивации базировались долгое время на опыте проведения масштабных работ после Чернобыльской катастрофы.

К настоящему времени появилось много практического материала по дезактивации радиоактивно-загрязненных объектов, требующего обобщения и оценки [2–4].

Следует отметить, что функционирование атомных электростанций, ротация исчерпавших свой ресурс узлов и агрегатов, логистическое перемещение ядерного топлива, производство ядерных боеприпасов – процессы, требующие постоянного отслеживания и оценки состояния указанных объектов, а также применения современных и эффективных технологических циклов дезактивации [5].

По этой причине одной из главных задач является возврат к первоначальному состоянию радиационно-загрязненных в процессе ядерно-топливного цикла конструкционных материалов и узлов, их дальнейшее функциональное применение. При проведении плановых, регламентных работ на электростанциях происходит скопление большого количества сложных в изготовлении, дорогостоящих радиационно-загрязненных конструкций [6].

При этом специалистами принято классифицировать загрязнения радиацией на «наведенную» радиацию и поверхностные загрязнения. К последнему относят свыше 80 % объектов, подвергшихся загрязнению, где частицы радионуклидов (РН) находятся в поверхностном слое и могут быть удалены без деструкции обрабатываемого объекта [7].

Показано, что покрытия и пленки толщиной 120–180 мкм, содержат более 90 % РН, загрязняющих металлическую поверхность. Массообменные механизмы диффузии вызывают проникновение части РН из пленки в кристаллическую решетку металлоподложки, тем самым делая загрязнение глубоким.

Очистка конструкции от коррозионной пленочной составляющей способствует снижению уровня ее радиоактивности и создает предпосылки последующего применения без угрозы вторичного загрязнения [8–10].

В истории развития специальной обработки известна масса способов проведения дезактивации, наделенных своими достоинствами и недостатками: струей воды, пенами, сорбентами, абразивный обдув, ультразвуковая дезактивация и т.д. [11].

Современная дезактивационная методология поверхностных радиоактивных (РА) загрязнений включает химический и электрохимический методы, реализация которых приводит к образованию огромного количества жидких отходов.

Например, при дезактивации химическим методом компонентов контура АЭС с реактором РБМК образуется до 5000 м³ жидких радиоактивных отходов. Их последующая переработка потребует больших экономических, технологических и трудовых затрат, не говоря уже о мероприятиях по обеспечению радиационной и экологической безопасности [12].

Лазерная дезактивация металлических поверхностей

Весомой альтернативой химической дезактивации, и другим традиционным методам, является лазерная дезактивация металлических поверхностей, при которой общий объем твердой фракции РА отходов не превышает 2 м³ [13].

Первоначально в Российской Федерации задача дезактивации электромагнитным излучением начала решаться еще в 2002 году НИИ «Прометей» для утилизации атомных субмарин. Сотрудниками института ядерной физики в Гатчине была организована лаборатория «Лазерной Дезактивации». В ней выполнялись первые работы и эксперименты по

применению источников ЭМИ для очистки элементов атомных подлодок. Лазерная чистка осуществлялась в камере с необходимыми условиями защиты от излучения и специальной вентиляцией [8, 14].

Оптический квантовый генератор был установлен вне данной камеры, лазерный луч подавался к обрабатываемой поверхности через иллюминатор (рисунок 1).

Было применено устройство, генерирующее электромагнитное излучение в диапазоне длин волн от ультрафиолетового до инфракрасного за счет вынужденного испускания или рассеяния света активной средой, помещенной в оптический резонатор.

Лабораторные испытания позволили сделать вывод о возможности и эффективности лазерной дезактивации. Уровень загрязнений на металлической поверхности детали снизился до уровня, не превышающего предельно допустимых концентраций. Такую дезактивацию следует считать эффективной. Количественная оценка эффективности лазерной дезактивации приведена на графике (рисунок 2) [7, 15].

Элемент узла атомной субмарины после лазерной дезактивации показан на рисунке 3, на котором наглядно представлена отличительная особенность применения описываемого подхода. На разрезе узла, указанного на рисунке 3, представляется возможным увидеть ощутимую разницу, где слева представлена область элемента атомной субмарины после дезактивации с применением электромагнитного импульса, а справа – без необходимой обработки.

Следующим этапом стало применение мобильного лазерного комплекса, работающего в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульсов 10 нс.

В настоящее время лазеры, оснащенные оптоволоконными системами доставки из-

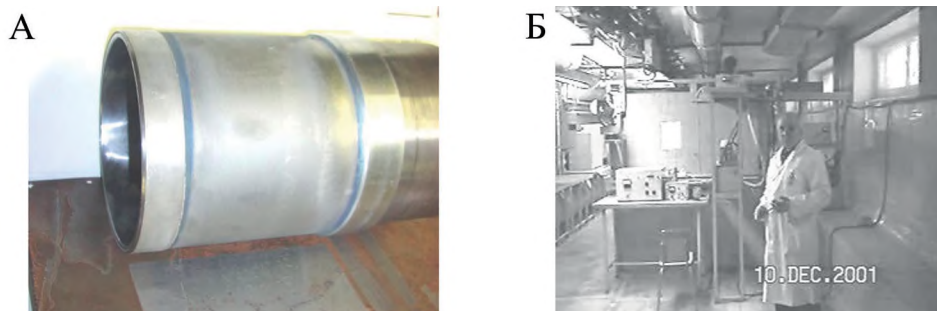


Рисунок 1 – Пример обработанного металлического изделия (А), камера лазерной дезактивации (Б) (рисунок подготовлен авторами по [8])

Figure 1: (A) A treated metal product, (Б) laser deactivation chamber (the figure is compiled by the authors according to [8])

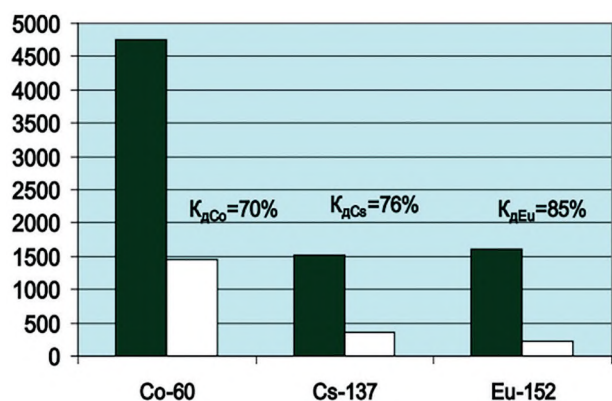


Рисунок 2 – Количественная оценка эффективности лазерной дезактивации, где по оси ординат представлена площадь фото пика, а на оси абсцисс показаны зеленые и белые области, описывающие эффективность обработки «До дезактивации», «После дезактивации» соответственно (рисунок подготовлен авторами по [8])

Figure 2: A quantitative evaluation of laser deactivation efficiency, where Y-axis presents the photo peak area, and X-axis presents green and white regions that mean the treatment efficiency "Before deactivation", "After deactivation", respectively (the figure is compiled by the authors according to [8])

лучения в зону обработки и имеющие небольшие геометрические размеры, открыли новую технологическую страницу развития и внедрения лазерных технологий в сферу специальной обработки объектов (рисунок 4) [16, 17].

Основой механизма лазерной дезактивации импульсными лазерными установ-



Рисунок 3 – Элемент узла атомной субмарины после лазерной дезактивации (рисунок подготовлен авторами по [8])

Figure 3: A part of nuclear submarine unit after laser deactivation (the figure is compiled by the authors according to [8])



Рисунок 4 – Лазерная ручная машина 100 Вт (фотография из архива ФГКВООУВО «ВА РХБ защиты» Минобороны России)

Figure 4: A laser power hand tool 100 Wt (the photo is taken from the archives Military Academy of Nuclear, Biological and Chemical Defence named after Marshal of the Soviet Union S.K. Timoshenko of the Ministry of Defense of the Russian Federation)

ками являются нагрев, испарение и абляция материала с образованием плазмы, а также быстрое тепловое расширение и возникновение ударных волн [18, 19].

При этом свечение плазмы и акустический сигнал в воздухе могут быть использованы для контроля режимов и степени очистки (рисунок 5).



Рисунок 5 – Ионизированный газ, образующийся при лазерной очистке поверхности (рисунок подготовлен авторами по [17])

Figure 5: An ionized gas generated during surface laser treatment (the figure is compiled by the authors according to [17])

Чрезпленочная дезактивация

Стоит учесть, что важным технологическим критерием здесь является возможность улавливания продуктов дезактивации, формируемых рабочим органом. В этой связи разработан способ, заключающийся в обработке радиационно-загрязненных поверхностей сквозь прозрачные для лазерного излучения полимерные сорбирующие пленки [10, 20].

Установлено, что радиационное загрязнение металлических поверхностей предполагает накопление большого количества РН в объеме, образующейся на поверхности, оксидной пленки. Ее компонентный состав дифференцирован: различные коррозионные продукты, соединения кальция и другие элементы с включениями РН [15].

Чаще всего образование таких пленок происходит вследствие диффузионного потока и отложения РА продуктов в ходе коррозии металлической поверхности.

В этом случае нерастворимые продукты коррозии отлагаются непосредственно из циркулирующего теплоносителя, а растворимые – по достижении определенного уровня концентрации ионов тех или иных химических элементов.

Для данной пленки характерна двухслойная структура. На металлической подложке образуется достаточно плотный, сплошной слой, с которым сопряжен пористый наружный (рисунок 6). Именно абсорбционный пористый наружный слой имеет ключевое значение в скоплении на поверхности радиационных источников [21, 22].

Имеющиеся данные свидетельствуют о лазерной дезактивации как об эффективном и производительном процессе, с указанием на обязательность в ходе ее проведения прозрачных для излучения сорбирующих пленок. Первоначальный уровень радиационного загрязнения поверхности совпадает с суммарным уровнем загрязнения, оставшимся на детали и на сорбирующей пленке после завершения процесса.

Широко распространенные и управляемые робототехнические комплексы в совокупности с лазерными дезактивационными установками могут быть применены для производства работ в местах с большим радиационным уровнем [23].

Таким образом, лазерная дезактивация с применением сорбирующих пленок позволяет снизить дозовые нагрузки на личный состав и может обеспечить повторное применение дорогостоящей техники, участвовавшей в ликвидации последствий техногенных аварий.

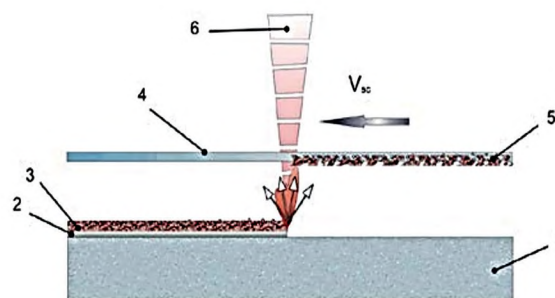


Рисунок 6 - Схема чрезпленочной дезактивации: 1 - обрабатываемый материал; 2 - нижний слой окислов (твердый); 3 - верхний слой окислов (рыхлый); 4 - прозрачная сорбирующая пленка; 5 - продукты очистки на пленке; 6 - лазерный луч; V - направление движения лазерного пучка (рисунок подготовлен авторами по [4])

Figure 6: A pattern for deactivation through film. (1) Material under processing; (2) oxide sublayer (hard); (3) oxide upper layer (soft); (4) a transparent absorbing film; (5) wastes on the film; (6) a laser beam; V, laser beam direction (the figure is compiled by the authors according to [4])

Преимуществом лазерной дезактивации радиационно-загрязненных металлических поверхностей является возможность ее проведения, как в газовых, так и в оптически прозрачных жидких средах, поскольку при этом «естественным образом» решается задача сбора и аккумуляции радиоактивных отходов в небольшом объеме покровной жидкой среды (пленки) [20]. Данное технологическое решение оптимально, поскольку в отличие от проведения лазерной дезактивации в атмосферной среде (либо вакуумной), задача сбора «грязных» частиц (капель, паров) решается средствами технических сложных, габаритных фильтровентиляционных систем.

Количественная оценка эффективности лазерной дезактивации – усредненные значения коэффициентов дезактивации, полученные при лазерной дезактивации металлических поверхностей в жидкости, составляют:

- по альфа-излучателям – 50–60, практически независимо от того, в какой жидкости находился металл;

- по бета-излучателям – коэффициент дезактивации зависит от жидкости, в которую погружен металл, и составил ≈ 30 для воды и ≈ 130 для технического глицерина.

Выводы

1. Развитие промышленных лазерных излучателей позволяет на современном этапе

рассматривать процессы лазерной очистки как реальную, экономически целесообразную альтернативу классическим методам дезактивации поверхности.

2. Лазерные методы дезактивации представляют собой наиболее экологически чистый процесс, обеспечивающий дополнительную возможность высокой степени автоматизации.

3. Современные оптоволоконные лазеры имеют небольшие геометрические размеры, низкое энергопотребление, небольшой вес, не требуют создания специальных условий по климатическим условиям и загрязненности атмосферы, поэтому достаточно легко интегрируются в технологические линии технических средств специальной обработки.

Ограничения исследования / Limitations of the study

Данный аналитический обзор имеет ряд ограничений, а именно: 1) исследование основывается на анализе открытых источников, включая литературные источники, технические описания, патентно-изобретательскую базу и открытую научную литературу; 2) анализ технических описаний и предлагаемых изобретений на основе электромагнитного импульса может не охватывать все аспекты их функционирования и потенциальных ограничений; 3) интеграция предлагаемого метода дезактивации в рамках выполнения задач РХБ защиты требует тщательного проектирования и может иметь технические ограничения; 4) анализ внедрения метода дезактивации загрязненных металлических поверхностей с помощью импульсных лазерных установок иностранными специалистами основывается на открытых источниках и может не отражать полную картину их применения и эффективности / This analytical review has a number of limitations, such as: (1) the study is based on the analysis of the available sources, including academic ones, as well as technical specifications, database for patents and inventions, accessible scientific publications; (2) The analysis of technical specifications and proposed inventions performance of which are based on electromagnetic emissions user manuals of personal protective devices may not cover all aspects of their functionality and potential limitations; (3) The integration of proposed deactivation method into Russian NBC Protection Troops routine requires careful design and may have technical limitations; (4) The analysis of method of deactivation of contaminated metal surfaces by means of pulsed laser systems that has been made by foreign experts is based on open sources data and may not reflect the complete picture of their application and efficiency.

Список источников / References

1. Vičar D, Princ I, Mašek I, Mika OJ. *Nuclear, radiological and chemical weapons, radiation and chemical accidents*. Zlín: Tomas Bata University in Zlín; 2021. 372 p.
<https://doi.org/10.7441/978-80-7678-053-8>
2. Barton DNT, Johnson T, Callow A, Carey T, Bibby SE, Watson S, et al. A review of contamination of metallic surfaces within aqueous nuclear waste streams. *Progress in Nuclear Energy*. 2023;155:104637.
<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104637>
3. Софронов ВЛ, Карташов ЕЮ, Ткачук СА, Пак АД, Тинин ВВ, Галата АА. Исследования по лазерной дезактивационной очистке поверхностей металлов, загрязненных радиоактивными материалами. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022;333(11):171–182. EDN:ELCHAP.
<https://doi.org/10.18799/24131830/2022/11/3734>
4. Sofronov VL, Kartashov EU, Tkachuk SA, Pak AD, Tinin VV, Galata A.A. Research on laser deactivation cleaning of metal surfaces contaminated with radioactive materials. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(11):171–182. EDN:ELCHAP (in Russian).
<https://doi.org/10.18799/24131830/2022/11/3734>
4. Вейко ВП, Мутин ТЮ, Смирнов ВН, Никишин ГД, Шахно ЕА. Лазерная очистка и дезактивация поверхностей металлов: физические процессы и применения. *Лазер-Информ*. 2008;(1):8–16.
 Veiko VP, Mutin TYu, Smirnov VN, Nikishin GD, Shakhno EA. Laser cleaning and decontamination of metal surfaces: physical processes and applications. *Journal of Laser-Inform*. 2008;(1):8–16. (in Russian). Available from: <https://cyberleninka.ru> [Accessed 28 August 2024]
5. Yu J. et al. Research on large-scale decontamination methods and design criteria for decontamination stations in emergency scenarios of off-site nuclear accidents. Fifth International Conference on Green Energy, Environment, and Sustainable Development (GEESD 2024). SPIE. 2024;132796:299–305.
6. Вейко ВП, Либенсон МН, Червяков ГГ, Яковлев ЕБ. *Взаимодействие лазерного излучения с веществом (Силовая оптика)*. М.; 2008. С. 16–32. EDN:LNPFPPE.
 Veiko VP, Libenson MN, Chervyakov GG, Yakovlev EB. *Interaction of laser radiation with a substance (Power optics)*. Moscow; 2008. P. 16–32. EDN:LNPFPPE (in Russian).

7. Журба ВМ, Журба ДВ, Пуйша АЭ. Способ лазерной очистки металлических поверхностей от окалины. Патент Российской Федерации № 2812150; Заявл. 29.08.2023; Опубл. 23.01.2024. Бюл. № 3.
Zhurba VM, Zhurba DV, Puisha AE. Method of laser cleaning of metal surfaces from scale. Patent of the Russian Federation No. 2812150; Bid. 29.08.2023; Publ. 23.01.2024. Newsletter № 3 (in Russian).
8. Вейко ВП, Смирнов ВН, Чирков АМ, Шахно ЕА. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении. СПб: НИУ ИТМО; 2013:20–74. EDN:ZVDDRP
Veiko VP, Smirnov VN, Chirkov AM, Shakhno EA. *Laser cleaning in machine building and instrument engineering*. Saint-Petersburg: NIU ITMO; 2013:20–74. EDN:ZVDDRP (in Russian)
9. Олегин МО, Никитин АС. Устройство для лазерной очистки. Патент Российской Федерации на промышленный образец № 206647; Заявл. 28.12.2020; Опубл. 20.09.21. Бюл. № 26.
Olegin MO, Nikitin AS. Laser cleaning equipment. Industrial design patent of the Russian Federation No. 206647 RU; Bid. 28.12.2020; Publ. 20.09.21. Newsletter № 26 (in Russian).
10. Романцов АИ, Федоров МА, Черняев АА, Булыгин АА. Способ лазерной очистки поверхности. Патент Российской Федерации № 2668619; Заявл. 14.08.2017; Опубл. 10.02.2018. Бюл. № 6. EDN:PBGBKH
Romantsov AI, Fedorov MA, Chernyaev AA, Bulygin AA. Laser surface cleaning method. Patent of the Russian Federation No. 2668619 RU; Bid. 14.08.2017; Publ. 10.02.2018. Newsletter № 6. EDN:PBGBKH (in Russian).
11. Lin Z, Jieheng L, Jian D, Zeyong L, Lin L, Xiaoshan X. Existing and potential decontamination methods for radioactively contaminated metals – A Review. *Progress in Nuclear Energy*. 2021;139:103854.
<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103854>
12. Gossard A, Lilin A, Faure S. Gels, coatings and foams for radioactive surface decontamination: State of the art and challenges for the nuclear industry. *Progress in Nuclear Energy*. 2022;149:104255.
<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104255>
13. Qian W, Feisen W, Chuang C, Hui C, Fei J, Chen Y, Dasong L. Laser decontamination for radioactive contaminated metal surface: A review. *Nuclear Engineering and Technology*. 2023;55:12–24.
<https://doi.org/10.1016/j.net.2022.09.020>
14. Суслов АГ. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение; 2000. 320 с. EDN:PRXAQD
Suslov AG. *Quality of machine components' surface layer*. Moscow: Mashinostroyeniye; 2000. 320 p. EDN:PRXAQD (in Russian).
15. Вейко ВП, Шахно ЕА. Индуцированное лазером локальное осаждение тонких пленок. *Оптический журнал*. 1998;65(10):102–7.
Veiko VP, Shakhno EA. Laser induced local deposition of thin films. *Journal of Optical Technology*. 1998;65(10):102–7 (in Russian).
16. Лукьянчук БС, Жэнг ЮВ, Лу ИФ. К вопросу о механизме сухой лазерной очистки. *Известия РАН, сер. физ.* 2001;65(4):591–600.
Luk'yanchuk BS, Zheng YuV, Lu IF. Revisiting the mechanism of dry laser cleaning. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2001;65(4):591–600 (in Russian).
17. Вейко ВП, Никишин ГД, Смирнов ВН. Мобильный лазерный комплекс для дезактивации атомных подводных лодок. *Межотраслевой информационно-аналитический журнал «Индустрия»*. 2006;1(43):18–25.
Veiko VP, Nikishin GD, Smirnov VN Mobile laser system for nuclear submarines' decontamination. *Cross-industry information-analitical journal "Industry"*. 2006;1(43):18–25 (in Russian).
18. Carvalho L, Pacquentin W, Tabarant M, Semerok A, Maskrot H. Metal decontamination by high repetition rate nanosecond fiber laser: application to oxidized and Eu-contaminated stainless steel. *Applied Surface Science*. 2020;526:146654.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146654>
19. Григорьянц АГ, Шиганов ИН, Мисюров АИ. Технологические процессы лазерной обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2006. EDN:WPEVRY
Grigir'yants AG, Shiganov IN, Misyurov AI. *Technological processes of laser machining*. Moscow: N.E. Bauman Moscow State Technical University Publ.; 2006. EDN:WPEVRY (in Russian).
20. Cheban M, Filatova S, Kravchenko Y, Scherbakov K, Mamonov D, Klimentov S, et al. Laser surface cleaning of simulated radioactive contaminants in various technological environments. *Nuclear Engineering and Technology*. 2024;56:2775–80.
<https://doi.org/10.1016/j.net.2024.02.039>
21. Reinecke A-M, Acker M, Taut S, Herrmann M, Lippmann M, Hurtado A. Laser beam decontamination of metallic surfaces with a pulsed (150 W) Nd:YAG laser. *Nuclear Engineering and Technology*. 2023;55(11):4159–66.
<https://doi.org/10.1016/j.net.2023.07.037>
22. Смирнов ВН, Скрипченко АИ, Медвецкий ВМ. Очистка лазерным излучением. *РИТМ*. 2008;33:64–6. EDN:TIBTEN

Smirnov VN, Skripnichenko AI, Medvetsky VM. Laser radiation cleaning. *RITM*. 2008;33:64–6. EDN:TIBTEN (in Russian).

23. Tsitsimpelisa I, Taylor CJ, Lennox B, Joyce MJ. A review of ground-based robotic systems for the characterization of nuclear environments. *Progress in Nuclear Energy*. 2019;111:109–24. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.10.023>

Вклад авторов / Authors' contributions

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Наибольший вклад распределен следующим образом: **В.П. Хантов** – формирование концепции статьи, написание текста рукописи, редактирование статьи, приведение терминологии современным требованиям руководящих документов; **К.В. Сергеев** – сбор и анализ сведений о дезактивации загрязненных металлических поверхностей с помощью импульсных лазерных установок, редактирование текста рукописи, разработка иллюстративного материала, формулировка выводов; **В.В. Осипов** – анализ данных научной литературы, написание статьи, критический пересмотр и коррекция текста рукописи; **О.А. Рачкова** – редактирование статьи, приведение терминологии современным требованиям руководящих документов; **Е.Ф. Егоров** – доработка текста, окончательное утверждение версии рукописи для публикации / All authors confirm that they meet the International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE) criteria for authorship. The most significant contributions are as follows: **V.P. Khantov** has formulated the concept of the study, has written the text of the article, has edited the article, has chosen proper terms for the article to be in line with the applicable modern regulatory documents; **K.V. Sergeyev** has collected and analyzed the data on deactivation of contaminated metal surfaces by means of pulsed laser systems, has edited the text of the article, has provided illustrations, has drawn conclusions; **V.V. Osipov** has analyzed the scientific data, has written the text of the article, has made a critical review of the paper and has made necessary amendments to it; **O.A. Rachkova** has edited the article, has chosen proper terms for the article to be in line with the applicable modern regulatory documents; **E.F. Egorov** has made follow-on revision, has approved a final version of the article for publication.

Сведения о рецензировании / Peer review information

Статья прошла двустороннее анонимное «слепое» рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и в РИНЦе / The article has been doubleblind peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Об авторах/ Authors

Федеральное государственное военное казенное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко (г. Кострома)», 156015, Российская Федерация, г. Кострома, ул. Горького, д. 16.

Хантов Вячеслав Павлович. Начальник кафедры ВА РХБЗ, канд. хим. наук, доцент.

Сергеев Константин Владимирович. Доцент кафедры ВА РХБЗ, канд. техн. наук, доцент.

Осипов Владимир Викторович. Доцент кафедры ВА РХБЗ, канд. техн. наук, доцент.

Рачкова Ольга Александровна. Доцент кафедры ВА РХБЗ, канд. биол. наук, доцент.

Егоров Евгений Федорович. Начальник отделения ВА РХБЗ, канд. хим. наук.

Контактная информация для всех авторов: varhbz@mil.ru

Контактное лицо: Хантов Вячеслав Павлович; varhbz@mil.ru

Nuclear Biological Chemical Defence Military Academy Named after Marshal of the Soviet Union S.K. Timoshenko (Kostroma) of the Ministry of Defence of the Russian Federation. Gorkogo Street, 16, Kostroma 156015, Russian Federation.

Vyacheslav P. Khantov. Head of Department, Military Academy of NBC Defence, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor.

Konstantin V. Sergeyev. Assistant professor of Department, Military Academy of NBC Defence, Cand. Sci. (Techn.). Associate Professor.

Vladimir V. Osipov. Assistant professor of Department, Military Academy of NBC Defence, Cand. Sci. (Techn.). Associate Professor.

Olga A. Rachkova. Assistant professor of Department, Military Academy of NBC Defence, Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor.

Evgenii F. Egorov. Chief of Section, Military Academy of NBC Defence, Cand. Sci. (Chem.).

Contact information for all authors: varhbz@mil.ru

Contact person: Vyacheslav P. Khantov; varhbz@mil.ru