

Научная статья

УДК 621.45.042:532.592.2:544.772

doi: 10.17223/7783494/4/4

Модельный ряд нейтрализационных аэрозольных распылителей с использованием ВЭМ

Ольга Ильинична Гаенко¹, Евгений Викторович Муравлев²,
Ольга Борисовна Кудряшова³, Виктор Александрович Клименко⁴

^{1, 2, 3, 4} *Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Россия*

³ *Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *yuu-95@mail.ru*

² *evvimv@gmail.com*

³ *olgakudr@inbox.ru*

⁴ *klimenko@siberia.design.ru*

Аннотация. Опасность экологических и террористических угроз делает актуальной задачу разработки устройств быстрой нейтрализации вредных аэрозолей. Предлагается модельный ряд генераторов нейтрализующих аэрозолей на основе ВЭМ, быстро создающих облако высокодисперсных частиц или дезинфицирующих паров. Результаты работы помогут решить задачу быстрой нейтрализации вредных веществ в воздухе.

Ключевые слова: аэрозоль, распылитель, нейтрализация

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-69-00108, <https://rscf.ru/project/22-69-00108/>

Для цитирования: Гаенко О.И., Муравлев Е.В., Кудряшова О.Б., Клименко В.А. Модельный ряд нейтрализационных аэрозольных распылителей с использованием ВЭМ // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 4. С. 35–42. doi: 10.17223/7783494/4/4

Original article

doi: 10.17223/7783494/4/4

Model range of neutralizing aerosol sprayers using HEMs

Olga I. Gaenko¹, Eugene V. Muravlev², Olga B. Kudryashova³, Victor A. Klimenko⁴

^{1, 2, 3, 4} *Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk, Russian Federation*

³ *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *yuu-95@mail.ru*

² *evvimv@gmail.com*

³ *olgakudr@inbox.ru*

⁴ *klimenko@siberia.design.ru*

Abstract. Currently, the danger of environmental and terrorist threats associated with aerosol emissions of hazardous substances, as well as the spread of biological aerosols carrying bacteria and viruses, is growing. Therefore, it is necessary to develop new methods and devices to quickly neutralize such emissions. Spraying a neutralizing aerosol using HEM energy has a number of advantages associated with a high rate of aerosol generation and a high dispersion of neutralizing particles. The high dispersion of the particles provides them with a large specific surface, which increases the efficiency of their interaction with harmful substances in the air. The paper proposes a number of atomizers based on HEM. Some of them allow you to spray powders for adsorption or catalytic neutralization of harmful substances. Others create a cloud of liquid droplet neutralizing aerosols (such as disinfectants to kill viruses and bacteria). The third approach is the development of special nanothermic mixtures containing a disinfectant. When such thermite burns in the air, a cloud of disinfectant vapors is formed. The results of experiments on the spraying of nanostructured titanium oxide, a disinfectant liquid, are presented. In the experiment, the concentration and particle size of the sprayed aerosol were determined in real time. It has been experimentally and theoretically shown that the sprayed particles have a mass-average diameter of less than 1 µm and remain in the air for at least 10 minutes. A series of experiments was carried out to create an iodine vapor cloud using iodine-containing nanothermites. It has been shown that the use of iodine-containing nanothermites can significantly reduce the microbicidal activity of lactobacilli. Further work will be related to improving the efficiency of the proposed devices. For this, mathematical models will be developed that describe the interaction of titanium oxide particles with harmful substances, and describe the death of microorganisms under the action of disinfectant vapors. The most effective iodine-containing nanothermic compositions for the disinfection of indoor space will be developed.

Keywords aerosol, sprayer, neutralization

Acknowledgments: The study was funded by the Russian Science Foundation, Project No. 22-69-00108, <https://rscf.ru/project/22-69-00108/>

For citation: Gaenko, O.I., Muravlev, E.V., Kudryashova, O.B. & Klimenko, V.A. (2023) Model range of neutralizing aerosol sprayers using HEMs. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 3. pp. 35–42. doi: 10.17223/7783494/3/4 (In Russian).

Введение

В настоящее время экологические угрозы, связанные с опасными аэрозольными и газовыми выбросами, становятся все более актуальными. Рост опасности террористических атак, сопровождающихся такими выбросами, а также угроза распространения инфекционных аэрозолей требуют новых методов и средств борьбы с токсичными или биологически опасными аэрозольными и газовыми облаками [1–4].

Существует множество методов нейтрализации опасных аэрозольных и газовых выбросов. Одним из наиболее распространенных является использование химических абсорбентов, которые поглощают токсичные газы и пары. Другим методом является использование фильтров, которые улавливают частицы аэрозолей и газов [5–7]. Еще одним методом является применение ультрафиолетового излучения, которое может уничтожать бактерии и вирусы в аэрозолях. Однако этот метод неэффективен против токсичных газов [8, 9].

Метод нейтрализации токсичных веществ, основанный на использовании частиц диоксида титана, называется фотокаталитической очисткой воздуха [10]. Диоксид титана является полупроводником, который может взаимодействовать с ультрафиолетовым светом и создавать электроны и дырки. Это приводит к образованию свободных радикалов, которые разлагают токсичные вещества на более безопасные соединения. другим перспективным материалом, обладающим фотокаталитической активностью, является оксид цинка [11, 12]. Как вариант можно использовать наночастицы диоксида цинка, модифицированного серебром [11]. Для этого метода обычно применяют поверхности, такие как стекло или керамика, покрытые слоем фотоактивного вещества. Когда ультрафиолетовый свет попадает на этот слой, происходит фотокаталитическая реакция, которая очищает воздух [10]. Этот метод имеет несколько преимуществ. Во-первых, он может обрабатывать большие объемы воздуха. Во-вторых, он не требует использования химических абсорбентов или фильтров, что делает его более экологически чистым. В-третьих, он может работать длительное время без необходимости замены или обслуживания. Однако этот метод имеет и некоторые недостатки. Во-первых, он неэффективен в условиях низкой освещенности или при

отсутствии ультрафиолетового света. Во-вторых, он может быть дорогим в установке и поддержании. В-третьих, для достижения максимальной эффективности он требует определенных условий, таких, например, как высокая влажность. Интересным и еще не отработанным вариантом метода является распыление частиц диоксида титана в воздухе с последующим облучением источником ультрафиолета.

Метод нейтрализации вредных газов на основе адсорбции частицами специально распыленного адсорбента основан на использовании способности адсорбента улавливать вредные газы и пары [13]. Адсорбент – это вещество, которое способно удерживать на своей поверхности молекулы других веществ. В процессе нейтрализации вредных газов адсорбент распыляется в виде тонких частиц в зону загрязнения. При контакте с вредными газами и парами адсорбент улавливает их на своей поверхности, образуя слой. При этом происходит физическое превращение вредных газов и паров в безвредные соединения, которые не наносят вреда окружающей среде. Хорошими сорбционными свойствами обладают нанопорошки оксидов металлов (MgO , Al_2O_3 , $AlOOH$, Fe_2O_3) [14–16]. После насыщения загрязняющими веществами адсорбент удаляется и заменяется новым. Одним из преимуществ этого метода является его высокая эффективность в нейтрализации различных видов вредных газов и паров. Кроме того, он не оставляет остатков химических веществ и не вызывает аллергических реакций. Однако этот метод также имеет некоторые недостатки. Во-первых, он может быть дорогим в установке и поддержании. Во-вторых, часто для каждого типа вредных газов требуется отдельный адсорбент, что может усложнять процесс его выбора и замены, хотя существуют и неспецифические адсорбенты, поглощающие широкий спектр веществ. В-третьих, он не эффективен при высокой концентрации вредных газов в воздухе.

Одним из видов нейтрализации опасных веществ является распыление в воздухе дезинфицирующих жидкостных аэрозолей [17]. Такие аэрозоли применяются для профилактической или вынужденной дезинфекции помещений, транспортных средств, тары и т.д. Главная задача распыления таких аэрозолей – равномерное покрытие поверхностей тонкой пленкой дезинфицирующего раствора. При этом распыление дезинфицирующих жидкостей с помощью форсунок

требует большого расхода жидкости и небезопасно для слизистых оболочек человека. Ультразвуковое распыление жидких дезинфектантов лишено этих недостатков, но это очень медленный процесс, что не всегда приемлемо.

Метод дезинфекции воздуха с помощью облака паров йода основан на использовании его антимикробных свойств [18]. Когда пары йода попадают в контакт с микробами, они разрушают их клеточные мембраны и белки, что приводит к их гибели. Этот метод также может уничтожать вирусы и грибки. Одним из преимуществ этого метода является его быстрота и эффективность. Облако паров йода может дезинфицировать большие объемы воздуха за короткий промежуток времени. Кроме того, он не оставляет остатков химических веществ и не вызывает аллергических реакций. Однако этот метод также имеет некоторые недостатки. Во-первых, он может быть опасен для людей при длительном вдыхании. Во-вторых, он может повредить некоторые материалы, такие как текстильные изделия и электронные устройства. В-третьих, он может быть сложным в реализации.

В ряде случаев, особенно связанных с внезапными выбросами опасных веществ, встает задача быстрой нейтрализации этих веществ [19]. Лучшим способом для этого является распыление нейтрализующих аэрозолей в воздухе с помощью энергии ВЭМ. Этот метод использует специальные распылители, которые быстро рассеивают частицы нейтрализующего аэрозоля в воздухе. Некоторые варианты таких распылителей были рассмотрены в работах авторов [20–26]. Для быстрого создания облака паров йода мы предлагаем использовать сжигание нанотермитных смесей, содержащих йод [27, 28]. Применение энергии ВЭМ имеет ряд преимуществ. Во-первых, позволяет быстро, почти мгновенно, распылить нейтрализующий порошок или жидкость или создать облако паров в воздухе. Во-вторых, преимуществом является высокая дисперсность созданного таким способом аэрозоля, так как большая удельная поверхность частиц позволяет им эффективно взаимодействовать с вредными агентами. Недостатком данного способа нейтрализации вредных веществ является его относительно сложная реализация. Для этого необходимо использовать специальные устройства, на отработку которых авторы потратили немало усилий.

Цель работы – описать модельный ряд распылителей нейтрализующих аэрозолей, использующих энергию ВЭМ, включая особенности их применения и механизмы нейтрализации вредных веществ. В работе предлагается ряд распылителей на основе ВЭМ. Одни из них позволяют распылять порошки для адсорбции или каталитической нейтрализации вредных веществ.

Другие создают облако жидкокапельных нейтрализующих аэрозолей (например, дезинфицирующих веществ для уничтожения вирусов и бактерий). Третий подход – разработка специальных нанотермитных смесей, содержащих дезинфицирующее вещество. При сгорании такого термита в воздухе образуется облако дезинфицирующих паров.

Материалы и методы

Распылители порошков на основе энергии ВЭМ

Для адсорбции или каталитической нейтрализации вредных веществ в воздухе требуется распылить специальный порошок. Это могут быть диоксид титана (фотокаталитическая нейтрализация), гидроксид алюминия (неспецифическая адсорбция) или другой порошок. Порошок должен некоторое время находиться в воздухе, вступая во взаимодействие с вредными веществами. Затем его нужно собрать и утилизировать. Для быстрого распыления таких порошков разработана следующая конструкция на основе энергии ВЭМ (рис. 1). Рабочим телом в данной конструкции является газогенерирующий состав (высокоэнергетический материал, который производит большое количество газов в процессе сгорания). При воспламенении газогенерирующего состава 3 продукты сгорания повышают давление в корпусе 1, при превышении давления предела прочности мембраны 5 она срезается на ноже 6; происходит импульсное истечение нанопорошка 2 в пространство помещения.

Распылители жидкостей на основе энергии ВЭМ

Использование энергии ВЭМ позволяет получить облако дезинфицирующих капель высокой дисперсности в воздухе за короткое время. Для этого разработана конструкция, схема которой приведена на рис. 2. После воспламенения ВЭМ в основании корпуса в жидкости реализуется серия акустических волн, приводящих к кавитации этой жидкости. Для более постепенного истечения кавитированной жидкости из сопла распылителя организуется сопловой блок с различными вариантами сужения канала. Распыление жидкости происходит за доли секунды и приводит к образованию в воздухе облака капель микронных размеров (менее 10 мкм в диаметре). Преимущество данного распылителя заключается еще и в возможности работы с жидкостями различных физико-химических свойств, в том числе с вязкими или поверхностно-активными жидкостями.

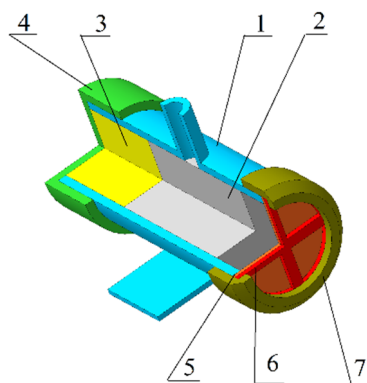


Рис. 1. Схема распылителя порошков: 1 – корпус; 2 – нанопорошок; 3 – газогенерирующий состав (ВЭМ); 4 – донная часть с воспламенителем; 5 – мембрана; 6 – нож; 7 – сопловой блок

Fig. 1. Powder sprayer scheme: 1 – body; 2 – nanopowder; 3 – gas-generating composition (HEM); 4 – bottom part with igniter; 5 – membrane; 6 – knife; 7 – nozzle block

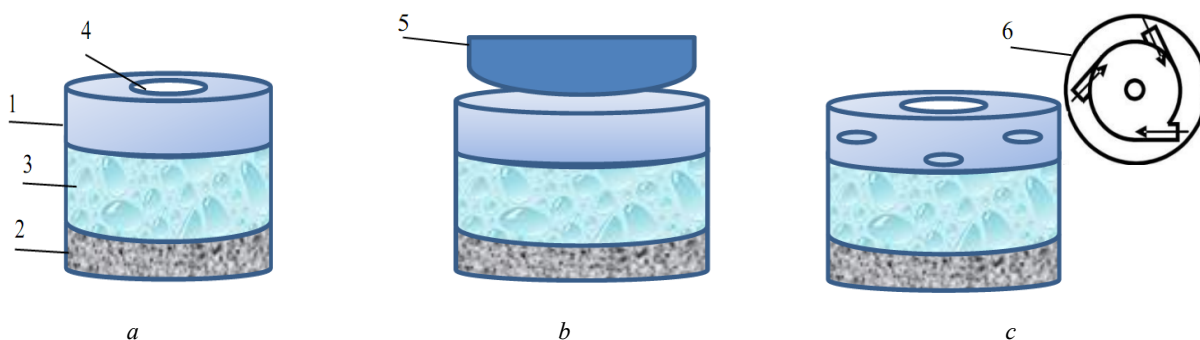


Рис. 2. Схема распылителя жидкостей: 1 – корпус; 2 – ВЭМ; 3 – жидкость; 4 – выходное отверстие; 5 – отражатель; 6 – камера закручивания

Fig. 2. Liquid sprayer scheme: 1 – body; 2 – HEM; 3 – liquid; 4 – outlet; 5 – reflector; 6 – swirling chamber

Вариация распылителя жидкости заключается прежде всего в изменении конструкции соплового блока. Он может быть представлен центральным отверстием (1, *a*), либо центральным отражателем с кольцевым зазором (1, *b*), либо камерой закручивания подобно центробежной форсунке (1, *c*). Данные варианты позволяют регулировать угол распыла материала [29].

Йодсодержащие нанотермиты

Соединения йода используются для дезинфекции поверхностей и оборудования, а также в качестве кожных антисептиков. Известно, что двухатомный йод I_2 является самым активным антимикробным агентом из йодсодержащих соединений. Его активность проявляется в том, что он разрушает связи, удерживающие вместе протеины в клетке и ингибирует синтез протеинов. При сгорании соединений

йода образуются пары йода, имеющие спектр цвета от светло-коричневого до фиолетового, которые обладают высокой проникающей способностью и оказывают эффективное saniрующее действие на атмосферу помещений и дыхательных путей организмов. Для образования паров йода необходимо нагреть твердый йод до температуры его точки плавления ($113,5^\circ\text{C}$) или выше. [30]. Возникает потребность создания йодсодержащего состава высокоэнергетического материала, который нагревается до температуры плавления твердого йода. Для этого подходит использование нанотермитных составов, так как данные смеси обладают высокой скоростью горения и низкой энергией инициирования [31]. В композицию нанотермита (наноалюминий и оксид металла) добавляется препарат йода (кристаллический йод, йодоформ). Такой нанотермит при сгорании образует пары йода. На рис. 3 показана схема генератора паров йода на основе йодсодержащих нанотермитов.

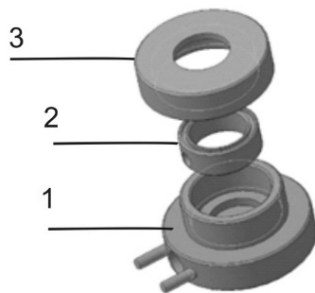


Рис. 3. Схема генератора паров йода на основе йодсодержащих нанотермитов:
1 – инициатор, 2 – контейнер для порошка, 3 – сопло

Fig. 3. Scheme of an iodine vapor generator based on iodine-containing nanothermites:
1 – initiator, 2 – powder container, 3 – nozzle

Результаты и обсуждение

В работах [21–26] описана модель взрывного кавитационного распыления. Процесс проходит в два этапа. В результате первого быстротекущего процесса в жидкости происходит мощная кавитация (или псевдокавитация в порошке). Образующиеся в результате взрыва ВЭМ газы выталкивают распыляемый материал, разорванный кавитационными пузырьками, в сопловой блок подобно поршню. По теоретическим оценкам, подтвержденным экспериментально, длительность первого этапа составляет несколько микросекунд, а длительность этапа истечения материала из соплового блока составляет, в зависимости от размера конструкции и объема распыляемого материала, от 0,1 до 10 с.

Для описанных выше конструкций распылителей максимальное давление продуктов сгорания ВЭМ составит около 10 МПа, а минимальный диаметр капель – около 0,1 мкм. Дисперсность твердофазного аэрозоля определится начальной дисперсностью распыляемого порошка и хрупкостью его агломератов. В процессе распыления под воздействием ударной волны агломераты разрушаются, и дисперсность аэрозоля увеличивается [23]. Это экспериментально подтверждено в работе по распылению гидроксида алюминия с целью адсорбции токсичных веществ [20]: площадь удельной поверхности распыленного порошка выше, чем при распылении другими методами: 258 м²/г по сравнению с 183 м²/г (распыление с помощью пескоструйного аппарата или порошковым огнетушителем).

Угол распыла зависит от вариации модели распылителя. В варианте с центральным соплом распыление происходит в виде направленной струи с минимальным углом. В тех практических приложениях, где необходимо получить аэрозоль в виде относительно узкого «луча», этот тип распылителя наиболее

пригоден. В тех приложениях, где нужно получить объемное облако аэрозоля, подходят другие варианты распылителя – с центральным отражателем и с узлом закручивания. Максимальный угол распыла, полученный в эксперименте для этих вариантов распылителя, составляет 37° [29].

Скорость распространения аэрозоля в пространстве и скорость осаждения зависят от размера и плотности частиц. Получены теоретические оценки, подтвержденные экспериментально, что при распылении частиц диоксида титана и при распылении воды образуются частицы с характерным размером менее 10 мкм [32, 33]. Такие частицы находятся в воздухе без осаждения в течение десятков минут.

Проведены предварительные эксперименты по образованию паров йода с помощью йодсодержащих нанотермитов (содержание препаратов йода в композите от 20 до 41,3 масс. %). Облако паров йода при сжигании термитов образовывалось практически мгновенно (за доли секунды), распространяясь по экспериментальному объему (1 м³), и оставалось в этом объеме без снижения начальной концентрации в течение десятков минут.

Выводы

Опасность распространения инфекций, экологические и террористические угрозы делают актуальной задачу разработки способов быстрой ликвидации таких угроз.

В работе предлагается модельный ряд распылителей нейтрализующих (дезинфицирующих, адсорбирующих) веществ на основе энергии ВЭМ. Преимущество применения энергии ВЭМ заключается в высокой скорости создания нейтрализующего облака. Кроме того, разработанные распылители обеспечивают высокую дисперсность образующихся

аэрозолей, что позволяет частицам долго находиться в воздухе и взаимодействовать с вредными субстанциями.

Варианты распылителей позволяют диспергировать дезинфицирующие жидкости, адсорбирующие или фотокаталитические порошки, образовывать облако дезинфицирующих паров. При этом нет ограничений, связанных с физико-химическими свойствами жидкостей (например, высокая вязкость) или порошков.

Представлены три варианта распылителей. Первый вариант позволяет распылять порошки для адсорбции или каталитической нейтрализации вредных веществ. Другой распылитель создает облако жидких капельно-нейтрализующих аэрозолей (например, дезинфицирующих средств для уничтожения вирусов и бактерий). Распылители жидкости представлены в

трех модификациях, отличающихся конструкцией соплового блока, что позволяет регулировать угол распыла. Третий тип распылителей позволяет создавать облако паров дезинфицирующего средства (йода) на основе сжигания специальных нанотермитных смесей (например, йодсодержащих).

Для отработки оптимальных конструкций распылителей необходимо проведение дальнейших экспериментов с имитацией вредных веществ и с образцами бактерий. Предполагается также разработка математических моделей, описывающих взаимодействие частиц аэрозолей с вредными веществами, а также гибель микроорганизмов под действием паров дезинфицирующих средств. Будут разработаны наиболее эффективные йодсодержащие нанотермические композиции для дезинфекции помещений.

Список источников

1. Романов В.И., Романова Р.Л. Выбросы вредных веществ и их опасность для живых организмов. М.: Физматкнига, 2009. 376 с.
2. Kwon H.S., Ryu M.H., Carlsten C. Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease // *Experimental & molecular medicine*. 2020. Vol. 52 (3). P. 318–328. doi: 10.1038/s12276-020-0405-1
3. Jarvis M. C. Aerosol transmission of SARS-CoV-2: physical principles and implications // *Frontiers in public health*. 2020. Vol. 8. Art. no. 590041. P. 1–8. doi: 10.3389/fpubh.2020.590041
4. Kudryashova O.B., Muravlev E.V., Antonnikova A.A., Titov S.S. Propagation of viral bioaerosols indoors // *PloS one*. 2021. Vol. 16 (1). Art. no. e0244983. P. 1–13. doi: 10.1371/journal.pone.0244983
5. Пурумов А.И. Обеспыливание воздуха. М.: Рипол Классик, 1974. 207 с.
6. Sublett J.L., Seltzer J., Burkhead R., Williams P.B., Wedner H.J., Phipatanakul W. Air filters and air cleaners: rostrum by the American academy of allergy, asthma & immunology indoor allergen committee // *Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 2010. Vol. 125 (1). P. 32–38. doi: 10.1016/j.jaci.2009.08.036
7. Fox R.W. Air cleaners: a review // *Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 1994. Vol. 94 (2). P. 413–416.
8. Василяк Л.М. Физические методы дезинфекции (обзор) // *Успехи прикладной физики*. 2018. Т. 6, № 1. С. 5.
9. Luo H., Zhong L. Ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) for in-duct airborne bioaerosol disinfection: Review and analysis of design factors // *Building and environment*. 2021. Vol. 197. Art. no. 107852. P. 1–14. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107852
10. Hay S.O., Obee T., Luo Z., Jiang T., Meng Y., He J., Suib S. The viability of photocatalysis for air purification // *Molecules*. 2015. Vol. 20 (1). P. 1319–1356. doi: 10.3390/molecules20011319
11. Бакина О.В., Глазкова Е.А., Сваровская Н.В., Волков А.М., Ворожцов А.Б., Лернер М.И. Электровзрывной синтез наночастиц ZnO-Ag с высокой антибактериальной активностью // *Технологии безопасности жизнедеятельности*. 2023. № 1. С. 82–90. doi: 10.17223/7783494/1/11
12. Kumar S., Pandit V., Bhattacharyya K., Krishnan V. Sunlight driven photocatalytic reduction of 4-nitrophenol on Pt decorated ZnO-RGO nanoheterostructures // *Materials Chemistry and Physics*. 2018. Vol. 214. P. 364–376. doi: 10.1016/j.matchemphys.2018.04.113
13. Qiao C., Ji K., Zhang Z. Research progress of indoor air purification technology // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2020. Vol. 474 (5). Art. no. 052024. P. 1–5. doi: 10.1088/1755-1315/474/5/052024.
14. Ram E.S.M. Nanotechnology for Environmental Decontamination. New York: McGraw-Hill. 2011. 448 с.
15. Stoimenov P.K., Zaikovski V., Klabunde K.J. Novel halogen and interhalogen adducts of nanoscale magnesium oxide // *Journal of the American Chemical Society*. 2003. Vol. 125 (42). P. 12907–12913. doi: 10.1021/ja030195l.
16. Matai I., Garg D., Agrawal S., Sachdev A. Nanoengineering-based approaches for antimicrobial materials and coatings // *Emerging Nanotechnologies for Medical Applications*. Elsevier. 2023. P. 189–226. doi: 10.1016/B978-0-323-91182-5.00008-5.
17. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А., Тертишников П.П., Генне Д.В. Ультразвуковое распыление для санитарной обработки дезинфицирующими растворами // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2020. № 3. С. 37–45. doi: 10.25699/SSSB.2020.21.3.006.
18. Измайлов Т.Х. Новые эффективные термовозгонные средства дезинфекции для ветеринарии // *Эффективное животноводство*. 2017. № 9. С. 8–8.
19. Сакович Г.В., Комаров В.Ф., Ворожцов А.В., Матвиенко О.В., Пармон В.Н., Воронцов А.В. Нейтрализация токсических веществ при террористических актах и техногенных катастрофах // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2005. Т. 48, № S11. С. 109–115.
20. Kudryashova O.B., Stepkina M.Y., Korovina N.V., Antonnikova A.A., Muravlev E.V., Pavlenko A.A. Atomization of nanopowders for adsorption of toxic substances // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2015. Vol. 88. P. 833–838. doi: 10.1007/s10891-015-1258-7
21. Kudryashova O., Sokolov S., Zhukov I., Vorozhtsov A. Mathematical Model of the Pulse Generation of Decontaminating Aerosols // *Materials*. 2022. Vol. 15 (22). Art. no. 8215. P. 1–13. doi: 10.3390/ma15228215

22. Kudryashova O.B., Vorozhtsov B.I., Ishmatov A.N., Akhmadeev I.R., Muravlev E.V., Pavlenko A.A. Physicomathematical modeling of the explosion-induced generation of submicron liquid-droplet aerosols // *Aerosols: Properties, Sources and Management Practices*. N.Y. : Nova Science Publishers, 2012. P. 227–247.
23. Муравлев Е.В., Степкина М.Ю., Титов С.С., Ахмадеев И.Р., Павленко А.А., Кудряшова О.Б. Исследование процессов диспергирования компактированных порошков // *Ползуновский вестник*. 2016. № 4. С. 64–67.
24. Kudryashova O.B., Vorozhtsov B.I., Muravlev E.V., Akhmadeev I.R., Pavlenko A.A., Titov, S.S. Physicomathematical modeling of explosive dispersion of liquid and powders // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2011. Vol. 36 (6). P. 524–530. doi: 10.1002/prep.200900101
25. Vorozhtsov B.I., Kudryashova O.B., Ishmatov A.N., Akhmadeev I.R., Sakovich G.V. Explosion generation of microatomized liquid-drop aerosols and their evolution // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2010. Vol. 83 (6). P. 1149–1169. doi: 10.1007/s10891-010-0439-7
26. Kudryashova O.B., Muravlev E.V., Vorozhtsov B.I. Generation of a Fine Aerosol in a Cavitation Regime // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020. Vol. 93 (5). P. 1138–1146. doi: 10.1007/s10891-020-02215-3
27. Johnson C.E., Higa K.T. Iodine-rich biocidal reactive materials // *MRS Online Proceedings Library (OPL)*. 2013. Vol. 1521. Art. no. mrsf12-1521-oo03-07. doi: 10.1557/opl.2013.46
28. Wu T., Wang X., Zavalij P.Y., DeLisio J.B., Wang H., Zachariah M.R. Performance of iodine oxides/iodic acids as oxidizers in thermite systems // *Combustion and Flame*. 2018. Vol. 191. P. 335–342. doi: 10.1016/j.combustflame.2018.01.017
29. Muravlev E.V., Pavlenko A.A., Kudryashova O.B., Titov S.S., Korovina N.V., Antonnikova A.A. Model range of devices for creating aerosols using energy of high-energy materials // *The 6th International Symposium on Energetic Materials and their Applications*, 6–10 November, 2017, Tohoku University, Sendai, Japan. Sendai : Tohoku University, 2017. P. 73.
30. Gottardi W. Iodine as disinfectant // *Iodine chemistry and applications*. 2014. P. 375–410. doi: 10.1002/9781118909911.ch20
31. Гордеев В.В., Казутин М.В., Козырев Н.В., Каишаров А.О., Рубцов И.А., Тен К.А., Рафейчик С.И. Исследование механизма горения нанотермитных систем // *Ползуновский вестник*. 2018. № 2. С. 96–101.
32. Kudryashova O., Sokolov S., Vorozhtsov A. Mathematical Model of Propagation of an Aerosol Created by an Impulse Method in Space // *Materials*. 2023. Vol. 16 (16). Art. no. 5701. P. 1–11. doi: 10.3390/ma16165701
33. Kudryashova O.B., Korovina N.V., Pavlenko A.A., Arkhipov V.A., Gol'din V.D., Muravlev E.V. Aerosol Cloud Propagation in a Closed Space // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2015. Vol. 88 (3). P. 568–575. doi: 10.1007/s10891-015-1224-4

References

1. Romanov, V.I. & Romanova, R.L. (2009) *Vybrosy vrednykh veshchestv i ikh opasnost' dlia zhivykh organizmov* [Emissions of harmful substances and their danger to living organisms]. Moscow : Fizmatkniga.
2. Kwon, H.S., Ryu, M.H. & Carlsen, C. (2020) Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease. *Experimental & Molecular Medicine*. 52(3). pp. 318–328. doi: 10.1038/s12276-020-0405-1
3. Jarvis, M.C. (2020) Aerosol transmission of SARS-CoV-2: physical principles and implications. *Frontiers in Public Health*. 8. Art. no. 590041. pp. 1–8. doi: 10.3389/fpubh.2020.590041
4. Kudryashova, O.B., Muravlev, E.V., Antonnikova, A.A. & Titov, S.S. (2021) Propagation of viral bioaerosols indoors. *PloS One*. 16(1). Art. no. e0244983. pp. 1–13. doi: 10.1371/journal.pone.0244983
5. Pirumov, A.I. (1974) *Obespylivanie vozdukh* [Air dedusting]. Moscow : Ripol Classic.
6. Sublett, J.L., Seltzer, J., Burkhead, R., Williams, P.B., Wedner, H.J. & Phipatanakul, W. (2010) Air filters and air cleaners: rostrum by the American academy of allergy, asthma & immunology indoor allergen committee. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 125(1). pp. 32–38. doi: 10.1016/j.jaci.2009.08.036
7. Fox, R.W. (1994) Air cleaners: a review. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 94(2). pp. 413–416.
8. Vasilyak, L.M. (2018) Physical methods of disinfection (review). *Advances in Applied Physics*. 6(1). pp. 5. (In Russian)
9. Luo, H. & Zhong, L. (2021) Ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) for in-duct airborne bioaerosol disinfection: Review and analysis of design factors. *Building and environment*. 197. Art. no. 107852. pp. 1–14. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107852
10. Hay, S.O., Obee, T., Luo, Z., Jiang, T., Meng, Y., He, J. & Suib, S. (2015) The viability of photocatalysis for air purification. *Molecules*. 20(1). pp. 319–1356. doi: 10.3390/molecules20011319
11. Bakina, O.V., Glazkova, E.A., Svarovskaya, N.V., Volkov, A.M., Vorozhtsov, A.B. & Lerner, M.I. (2023) Electroexplosive synthesis of ZnO-Ag nanoparticles with high antibacterial activity. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 1. pp. 82–90. (In Russian). doi: 10.17223/7783494/1/11
12. Kumar, S., Pandit, V., Bhattacharyya, K. & Krishnan, V. (2018) Sunlight driven photocatalytic reduction of 4-nitrophenol on Pt decorated ZnO-RGO nanoheterostructures. *Materials Chemistry and Physics*. 214. pp. 364–376. doi: 10.1016/j.matchemphys.2018.04.113
13. Qiao, C., Ji, K. & Zhang, Z. (2020) Research progress of indoor air purification technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 474(5). Art. no. 052024. pp. 1–5. doi: 10.1088/1755-1315/474/5/052024
14. Ram, E.S.M. (2011) *Nanotechnology for Environmental Decontamination*. New York : McGraw-Hill.
15. Stoimenov, P.K., Zaikovski, V. & Klabunde, K.J. (2003) Novel halogen and interhalogen adducts of nanoscale magnesium oxide. *Journal of the American Chemical Society*. 125(42). pp. 12907–12913. doi: 10.1021/ja030195l
16. Matai, I., Garg, D., Agrawal, S. & Sachdev, A. (2023) Nanoengineering-based approaches for antimicrobial materials and coatings. In: *Emerging Nanotechnologies for Medical Applications*. Elsevier. pp. 189–226. doi: 10.1016/B978-0-323-91182-5.00008-5
17. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Nesterov, V.A., Tertishnikov, P.P. & Genne, D.V. (2020) Ultrasonic spraying for sanitizing solutions. *South Siberian Scientific Bulletin*. 3. pp. 37–45. (In Russian). doi: 10.25699/SSSB.2020.21.3.006
18. Izmailov, T.Kh. (2017) New effective thermo-sublimating disinfectants for veterinary medicine. *Efficient Livestock Production*. 9. pp. 8-8. (In Russian).

19. Sakovich, G.V., Kamarov, V.F., Vorozhtsov, A.V., Matvienko, O.V., Parmon, V.N. & Vorontsov, A.V. (2005) Neutralization of toxic substances during terrorist attacks and man-made disasters. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*. 48(S11). pp. 109–115. (In Russian).
20. Kudryashova, O.B., Stepkina, M.Y., Korovina, N.V., Antonnikova, A.A., Muravlev, E.V. & Pavlenko, A.A. (2015) Atomization of nanopowders for adsorption of toxic substances. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 88. pp. 833–838. doi: 10.1007/s10891-015-1258-7
21. Kudryashova, O., Sokolov, S., Zhukov, I. & Vorozhtsov, A. (2022) Mathematical Model of the Pulse Generation of Decontaminating Aerosols. *Materials*. 15(22). Art. no. 8215. P. 1–13. doi: 10.3390/ma15228215
22. Kudryashova, O.B., Vorozhtsov, B.I., Ishmatov, A.N., Akhmadeev, I.R., Muravlev, E.V. & Pavlenko, A.A. (2012) Physicomathematical modeling of the explosion-induced generation of submicron liquid-droplet aerosols. In: *Aerosols: Properties, Sources and Management Practices*. New York : Nova Science Publishers. pp. 227–247.
23. Muravlev, E.V., Pavlenko, A.A., Akhmadeev, I.R., Kudryashova, O.B., Stepkina, M.Yu. & Korovina, N.V. (2016) Study of dispersion processes of compacted powders. *Polzunovskiy Vestnik*. 1(4). pp. 64–67. (In Russian).
24. Kudryashova, O.B., Vorozhtsov, B.I., Muravlev, E.V., Akhmadeev, I.R., Pavlenko, A.A. & Titov, S.S. (2011) Physicomathematical modeling of explosive dispersion of liquid and powders. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 36(6). pp. 524–530. doi: 10.1002/prep.200900101
25. Vorozhtsov, B.I., Kudryashova, O.B., Ishmatov, A.N., Akhmadeev, I.R. & Sakovich, G.V. (2010) Explosion generation of microatomized liquid-drop aerosols and their evolution. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 83. pp. 1149–1169. doi: 10.1007/s10891-010-0439-7
26. Kudryashova, O.B., Muravlev, E.V. & Vorozhtsov, B.I. (2020) Generation of a Fine Aerosol in a Cavitation Regime. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 93. pp. 1138–1146. doi: 10.1007/s10891-020-02215-3
27. Johnson, C.E. & Higa, K.T. (2013) Iodine-rich biocidal reactive materials. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*. 1521. mrsf12-1521-oo03-07. doi: 10.1557/opl.2013.46
28. Wu, T., Wang, X., Zavalij, P.Y., DeLisio, J.B., Wang, H. & Zachariah, M.R. (2018) Performance of iodine oxides/iodic acids as oxidizers in thermite systems. *Combustion and Flame*. 191. pp. 335–342. doi: 10.1016/j.combustflame.2018.01.017
29. Muravlev, E.V., Pavlenko, A.A., Kudryashova, O.B., Titov, S.S., Korovina, N.V. & Antonnikova, A.A. (2017) Model range of devices for creating aerosols using energy of high-energy materials. In: *The 6th International Symposium on Energetic Materials and their Applications, 6-10 November, 2017, Tohoku University, Sendai, Japan*. Sendai : Tohoku University. pp. 73.
30. Gottardi, W. (2014) Iodine as disinfectant. *Iodine chemistry and applications*. pp. 375–410. doi: 10.1002/9781118909911.ch20
31. Gordeev, V.V., Kazutin, M.V., Kozyrev, N.V., Kashkarov, A.O., Rubtsov, I.A., Ten, K.A. & Rafeichik, S.I. (2018) Study of the combustion mechanism of nanothermite systems. *Polzunovskiy Vestnik*. 2. pp. 96–101. (In Russian).
32. Kudryashova, O., Sokolov, S. & Vorozhtsov, A. (2023) Mathematical Model of Propagation of an Aerosol Created by an Impulse Method in Space. *Materials*. 16(16). Art. no. 5701. P. 1–11. doi: 10.3390/ma16165701
33. Kudryashova, O.B., Korovina, N.V., Pavlenko, A.A., Arkhipov, V.A., Gol'din, V.D. & Muravlev, E.V. (2015) Aerosol cloud propagation in a closed space. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 88. pp. 568–574. doi: 10.1007/s10891-015-1224-4

Информация об авторах:

Гаенко Ольга Ильинична – аспирант, младший научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН (Бийск, Россия). E-mail: yuu-95@mail.ru

Муравлев Евгений Викторович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН (Бийск, Россия). E-mail: evvimv@gmail.com

Кудряшова Ольга Борисовна – доктор физ.-мат. наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН (Бийск, Россия), старший научный сотрудник Томского государственного университета (Томск, Россия) E-mail: olgakudr@inbox.ru

Клименко Виктор Александрович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН (Бийск, Россия). E-mail: klimenko@siberia.design.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Gaenko Olga I., postgraduate student, junior researcher, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Biysk, Russian Federation). E-mail: yuu-95@mail.ru

Muravlev Eugene V., Cand. Sc. (Engineering), senior researcher, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Biysk, Russian Federation). E-mail: evvimv@gmail.com

Kudryashova Olga B., Dr. Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, leading researcher, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Biysk, Russian Federation); senior researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation) E-mail: olgakudr@inbox.ru

Klimenko Victor A., Cand. Sc. (Engineering), leading researcher, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Biysk, Russian Federation). E-mail: klimenko@siberia.design.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 8.11.2023; одобрена после рецензирования 28.11.2023; принята к публикации 12.12.2023

The article was submitted 8.11.2023; approved after reviewing 28.11.2023; accepted for publication 12.12.2023