

Научная статья
УДК 544.452:615.28
doi: 10.17223/7783494/4/3

Бактерицидная активность йодсодержащих нанотермитов

Ольга Ильинична Гаенко¹, Евгений Викторович Муравлев², Илья Евгеньевич Конюхов³,
Сергей Сергеевич Титов⁴, Виктор Александрович Клименко⁵, Ольга Борисовна Кудряшова⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} *Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Россия*

⁶ *Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *yuu-95@mail.ru*

² *evvimv@gmail.com*

³ *ilyakon008@gmail.com*

⁴ *titov.sergey.s@gmail.com*

⁵ *klimenko@siberia.design.ru*

⁶ *olgakudr@inbox.ru*

Аннотация. Опасность распространения вирусных и бактериальных инфекций делает актуальной задачу разработки способов быстрой нейтрализации инфекционных аэрозолей. Для этого предлагается использовать нанотермитные йодсодержащие смеси. Авторы исследовали ряд таких смесей на микробицидную активность. Результаты работы помогут решить задачу быстрой нейтрализации инфекционных аэрозолей.

Ключевые слова: нанотермит, микробицидная активность, йод

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., Конюхов И.Е., Титов С.С., Клименко В.А., Кудряшова О.Б. Бактерицидная активность йодсодержащих нанотермитов // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 4. С. 28–34. doi: 10.17223/7783494/4/3

Original article
doi: 10.17223/7783494/4/3

Bactericidal activity of iodine-containing nanothermits

Olga I. Gaenko¹, Eugene V. Muravlev², Ilya E. Konyukhov³, Sergey S. Titov⁴,
Victor A. Klimenko⁵, Olga B. Kudryashova⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} *Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk, Russian Federation*

⁶ *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *yuu-95@mail.ru*

² *evvimv@gmail.com*

³ *ilyakon008@gmail.com*

⁴ *titov.sergey.s@gmail.com*

⁵ *klimenko@siberia.design.ru*

⁶ *olgakudr@inbox.ru*

Abstract. An important problem is the spread of viral aerosols and bacterial spores, the danger of which has been shown by the coronavirus pandemic. The biological hazard of such aerosols is beyond doubt, and the methods of combating them are still not effective enough. Halogen-containing reactive materials can be used to mitigate the spread of dangerous microorganisms. Iodine vapor is one of the most effective means for air disinfection in areas of high risk of infection. Their activity is manifested in the fact that iodine is able to destroy the bonds that hold proteins together in the cell and inhibit protein synthesis. To deactivate biogenic agents, we use a nanostructured thermite mixture based on aluminum nanoparticles, metal oxide (calcium, manganese or iron) and containing an iodine preparation. The novelty of the work lies in the use of metal nanoparticles, since an increase in the dispersion of thermite powder particles leads to an increase in the combustion rate and an increase in the reactivity of the material. The aim of the work is to find the optimal composition of iodine-containing nanothermite, which has the highest microbicidal activity. We conducted a series of experiments to study the microbicidal activity of iodine-containing thermite systems in relation

to the B-11948 strain of lactobacilli. A sample of the thermite mixture was burned in the volume of the experimental chamber with the formation of iodine vapor. After exposure in the chamber, lactobacilli were cultivated for 48 hours. We assessed microbicidal activity by counting colonies on a microbiological counter. We found that samples with iodoform (CHI₃) content of more than 30% have high microbicidal activity (more than 50 %). Microbicidal activity also depends on the composition of the nanothermite. The compositions with CuO-Al create the best iodine cloud. Thermite mixtures based on iron oxide showed the least microbicidal activity; in addition, such thermite mixtures did not always ignite. In the future, we plan to continue work on improving the compositions of nanothermite iodine-containing mixtures to neutralize infectious aerosols in the air.

Keywords: nanothermite, microbicidal activity, iodine

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., Konyukhov, I.E., Titov, S.S., Klimenko, V.A. & Kudryashova O.B. (2023) Bactericidal activity of iodine-containing nanothermits *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 4. pp. 28–34. doi: 10.17223/7783494/8/3 (In Russian).

Введение

Бактерии и вирусы, наиболее распространенные и опасные патогены, часто распространяются воздушно-капельным путем [1]. Это наблюдалось в течение недавней пандемии COVID-19, вызванной коронавирусом SARS-CoV-2, новые штаммы которого все еще распространяются по планете [2]. Больной человек выделяет в воздух аэрозольные частицы, содержащие вирусы. Такие капли могут оставаться в воздухе долгое время, не осажаясь и не испаряясь, и служить источником заражения [3]. Воздушно-капельным путем также распространяются инфекции среди сельскохозяйственных животных (например, опаснейшая инфекция ящура) [4]. Поэтому актуальной задачей сегодня является поиск способов борьбы с вирусными и бактериальными аэрозолями.

Традиционные способы дезинфекции (ручная уборка помещений, обработка поверхностей специальными средствами) не всегда эффективны. Среди современных методов очистки воздуха от органических загрязнений [5] и для уничтожения бактерий [6] используются фотокаталитические вещества, такие как оксид титана [7], оксид цинка [8]. В работе [8] показана высокая бактерицидная активность наночастиц диоксида цинка, модифицированного серебром. Для использования фотокаталитического метода очистки на поверхности, такие как стекло или керамика, наносят слой фотоактивного вещества. Когда ультрафиолетовое излучение попадает на этот слой, воздух очищается в результате фотокаталитической реакции [9].

Новые технологии обеззараживания *no-touch* («без прикосновения», автоматизированные) включают аэрозоль и испаряющуюся перекись водорода, мобильные устройства, излучающие непрерывный ультрафиолетовый свет, систему импульсного ксенонового ультрафиолетового излучения и использование высокоинтенсивного света узкого спектра [10].

Дезинфекция воздуха с помощью паров и аэрозолей является одним из современных способов борьбы с бактериями и вирусами [11]. Однако известные способы такой дезинфекции не отличаются высокой скоростью работы, которая требуется во многих практических случаях. Например, если обнаружена вероятность заражения особо опасными инфекциями, когда необходимо срочно обработать помещение. Таким образом, поиск новых способов дезинфекции воздуха, а также оптимизация существующих способов остается актуальной задачей. Помимо скорости работы, важным требованием к способам дезинфекции остается безопасность и экологическая чистота. Заметим, что традиционные способы дезинфекции после обработки могут оставлять в помещении следы стерилизующих веществ, небезопасные для человека.

В последнее время активно ведутся исследования по разработке реактивных материалов с биоцидными продуктами сгорания, способных инактивировать аэрозоли, содержащие микроорганизмы [12]. Основное внимание уделяется добавкам к энергетическим составам (в первую очередь, термитам), содержащим галогены, которые, как известно, обладают сильными биоцидными свойствами. Очевидно, чем больше галогена содержится в энергетическом составе, тем большим биоцидным эффектом он будет обладать. Однако разработка стабильных материалов с содержанием галогена свыше 20% встречается с трудностями [13].

Пары йода – одно из наиболее эффективных средств для дезинфекции воздуха в зонах возможного заражения [12]. Как и другие галогены, йод способен разрушать связи, удерживающие протеины в клетке бактерии вместе и ингибирует синтез протеинов. В ветеринарной практике для дезинфекции сельскохозяйственных помещений применяют сжигание йодсодержащих порошков, при котором в воздухе помещения постепенно формируется облако паров йода [14, 15].

Одним из перспективных методов является использование наноструктурного композиционного термитного порошка, содержащего металл, оксид металла и йод. При сжигании этого порошка образуется облако паров йода, способных нейтрализовать бактерии и вирусы. В работе предлагается использовать нанотермитный порошок на основе алюминия и оксида металла (меди, молибдена, железа), содержащий препарат йода (йодид аммония, йодоформ). При использовании нанопорошков в термитной смеси содержание препарата йода удастся довести до 40 масс. %. Также нанотермиты, в отличие от порошков меньшей дисперсности, горят существенно быстрее и реагируют активнее [16–18]. Это позволяет достичь быстрого создания облака йода в помещении. Но насколько эффективно будет снижаться микробицидная активность бактерий при использовании той или иной рецептуры нанотермита?

Цель данной работы – установить закономерности влияния состава йодсодержащего нанотермита на индекс микробицидной активности.

Материалы и методы

Облако паров йода создается при сжигании 1,5 г йодсодержащего нанотермита в конструкции, схема которой приведена на рис. 1.

Нанотермит создавался путем смешивания порошков наноалюминия с порошком оксида металла и препарата йода. Для повышения гомогенности смеси использовалась ультразвуковая обработка мощностью 50 Вт в течение 30 мин. Модальный диаметр частиц алюминия в композитах составлял порядка 100 нм, частиц окислителя – около 500–800 нм.

Термитный порошок поджигается специальным запалом путем подачи напряжения на воспламенитель (нихромовая спираль) генератора. Продукты

горения повышают давление в конструкции, мембрана разрывается, и продукты реакции термита истекают в экспериментальную камеру (куб размером 1 м³, рис. 2). Продукты сгорания представляют собой пары йода и другие газообразные, жидкие и твердые элементы (мелкие частицы). Сгорание термита происходит, практически, мгновенно, за доли секунды. За 1–2 секунды пары йода равномерно распределяются в объеме экспериментальной камеры, что наблюдается визуально.

В экспериментальной камере размещаются чашки Петри с культурой лактобактерий (рис. 2).

Исследовались три серии нанотермитов. В качестве топлива во всех применялся нанодисперсный алюминий, а в качестве окислителя – три вещества: оксид меди CuO, оксид железа Fe₂O₃ и оксид молибдена MoO₃. Компоненты горючей смеси брались в стехиометрическом соотношении. Йод в композиции присутствовал в виде трех препаратов: кристаллический йод I₂, йодоформ CHI₃ и йодид аммония NH₄I. Содержание препаратов йода в смеси варьировалось от 20 до 41,3 масс. %. Верхняя граница исследуемого диапазона выбрана в соответствии с условиями обеспечения стабильности зажигания термитного состава. Подготовку бактериологического препарата «Лактобакагар» осуществляли в соответствии с инструкцией, разливали в чашки Петри слоем 4–5 мм. Перед посевом чашки с питательной средой выдерживались при комнатной температуре 48 ч. Затем материал засеивали в чашки Петри, распределяли по поверхности среды, инкубировали при температуре 37 °С в атмосфере CO₂ 5%.

Экспозицию чашек Петри с материалом проводили в течение 35 мин в экспериментальной камере. Затем чашки Петри с лактобактериями культивировали в течение 48 ч в CO₂-инкубаторе. Результаты получали с помощью визуального подсчета колоний на счетчике Scan 300, Interscience (China).

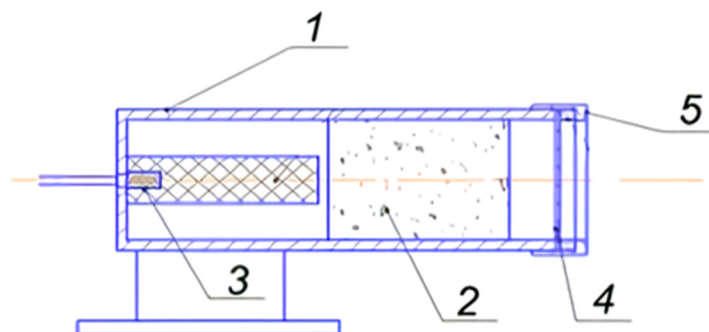


Рис. 1. Устройство для сжигания термитного порошка:

1 – корпус; 2 – йодсодержащий нанотермит; 3 – электровоспламенитель; 4 – мембрана; 5 – крышка

Fig. 1. Thermite powder burning device:

1 – body; 2 – iodine-containing nanothermite; 3 – electric igniter; 4 – membrane; 5 – cover

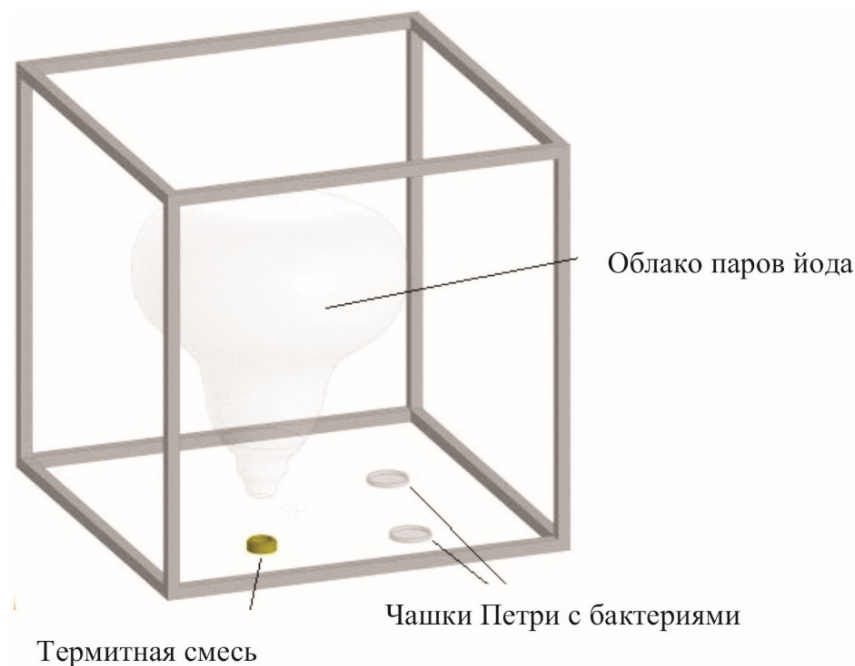


Рис. 2. Экспериментальная камера

Fig. 2. Experimental chamber

Индекс микробицидной активности Z рассчитывали по формуле:

$$Z = (K - O) / K \cdot 100\%,$$

где O – количество колоний опытной пробы; K – количество колоний контрольной пробы (не подвергавшейся экспозиции в камере).

Отношение количества колоний V рассчитывали по формуле:

$$V = O / K \cdot 100\%.$$

Результаты и обсуждение

Предполагается, что колонии бактерий снижают свою микробицидную активность из-за воздействия паров йода. Но на них также могут оказывать влияние и другие продукты реакции горения термитов: пары металлов (железа, меди), капли расплавов металлов. Хотя такие частицы присутствуют в небольших количествах из-за небольшой массы используемого термита, они могут попадать на поверхности, в том числе на образцы бактерий. В этом случае они могут повлиять на активность колоний бактерий, если несут достаточный запас тепла. Этими эффектами отличается данный эксперимент от такого, в котором бы создавалась чистая атмосфера паров йода другим способом (например, медленной сублимацией кристаллического йода в экспериментальную камеру). Предполагается, что вся масса йода, содержащегося в термитной смеси, окажется в воздухе камеры в виде паров,

однако это зависит от эффективности реакции конкретной термитной композиции и, возможно, от формы препарата йода, входящего в ее состав.

В результате экспериментов найдена зависимость индекса микробицидной активности от процентного соотношения йода в термитной композиции, но отдельно для каждого типа термитов, отличающихся оксидом, входящим в его состав (рис. 3).

Если разбить исследуемые термиты на три группы в соответствии с разными формами препарата йода, входящими в их состав, то зависимости микробицидной активности от процентного содержания йода не обнаружено. Для таких групп термитов средняя величина Z составляла около 43–45%. Следовательно, форма препарата йода в составе термита не имеет значения.

Для составов на основе оксида железа не обнаружено микробицидной активности при содержании йода более 20,7% (~60% экспериментов). Кроме того, были случаи отказа зажигания для этого состава. В экспериментах с данным типом термитов наблюдался относительно крупный размер частиц–продуктов сгорания, поэтому результаты с ненулевым индексом микробицидной активности нельзя считать достоверными, так как они могут быть обусловлены попаданием горячих частиц на образцы.

Для двух других видов термитных смесей наблюдается ожидаемая зависимость от содержания йода: с ростом содержания йода растет микробицидная активность термита.

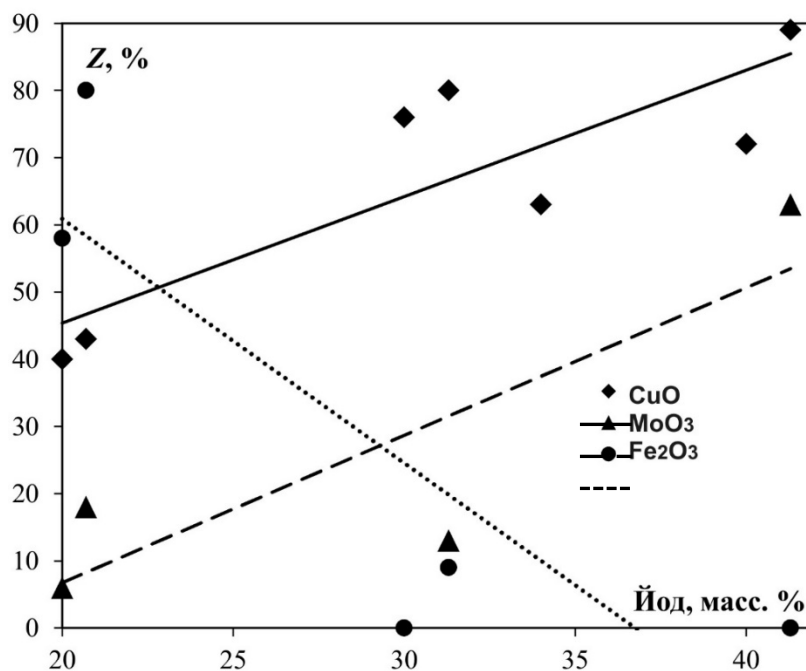


Рис. 3. Зависимость индекса микробицидной активности Z от массового процентного содержания йода для трех типов нанотермитов – на основе CuO , MoO_3 и Fe_2O_3

Fig. 3. Dependence of the microbicidal activity index Z on the mass percentage of iodine for three types of nanothermites - based on CuO , MoO_3 and Fe_2O_3

При этом наибольшей микробицидной активностью обладают термиты на основе оксида меди. В облаке паров, помимо паров йода, будут присутствовать и пары меди, которые также обладают микробицидной активностью.

Заключение

При борьбе с бактериальными и вирусными инфекциями людей и животных актуальной остается задача поиска новых средств предотвращения инфекций. Одним из способов борьбы с патогенами является дезинфекция воздуха.

Исследуется новый способ дезинфекции, основанный на применении йодсодержащих нанотермитов. При сжигании такой композиции в воздухе практически мгновенно создается облако паров йода, пагубно влияющее на жизнеспособность бактерий и вирусов.

В работе исследовались термитные композиции на основе наноалюминия и порошков оксидов меди, железа, молибдена, с содержанием различных препаратов йода от 20 до 41,3 масс. %. Как и следовало ожидать, обнаружен рост микробицидной активности с увеличением содержания йода в составе композита. Но каждый тип термитов, в соответствии с используемым в составе оксидом металла, демонстрировал свои особенности.

Составы с CuO -Al достоверно демонстрируют наибольшую микробицидную активность – индекс во всех экспериментах больше нуля, меняется от 40 до 90% при изменении содержания йода в составе от 20 до 41,3 масс. %.

В составах с оксидом молибдена индекс микробицидной активности ниже – от 0 до 63%.

Железоалюминиевые термиты не показали микробицидной активности при содержании в них йода свыше 20,7 масс. %.

Зависимости микробицидной активности термитов от формы препарата йода в их составе (кристаллический йод, йодоформ, йодид аммония) не обнаружено.

Таким образом, в результате исследований выявлен наиболее перспективный термитный состав для создания дезинфицирующего облака паров йода – CuO -Al с максимальной долей йодсодержащего компонента. Наиболее распространенный железоалюминиевый термит, напротив, показал наихудшие результаты с точки зрения снижения микробицидной активности бактерий.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых способов дезинфекции помещений, отличающихся высокой скоростью и эффективностью.

Список источников

1. Stevenson A., Freeman J., Jermy M., Chen J. Airborne transmission: a new paradigm with major implications for infection control and public health // *The New Zealand Medical Journal*. 2023. Vol. 136 (1570). P. 69–77.
2. Борисевич С.В., Сизикова Т.Е., Сыромятникова С.И., Пантюхов В.Б., Лебедев В.Н. Некоторые опасные и особо опасные эмерджентные вирусные инфекции начала XXI века: возникновение, распространение, опасность для здравоохранения // *Вестник войск РХБ защиты*. 2018. Т. 2, № 2. С. 61–69.
3. Baboli Z., Neisi N., Babaei A.A., Ahmadi M., Sorooshian A., Birgani Y.T., Goudarzi G. On the airborne transmission of SARS-CoV-2 and relationship with indoor conditions at a hospital // *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 261. Art. no. 118563. P. 1–10. doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118563
4. Paton D.J., Gubbins S., King D.P. Understanding the transmission of foot-and-mouth disease virus at different scales // *Current opinion in virology*. 2018. Vol. 28. P. 85–91. doi: 10.1016/j.coviro.2017.11.013
5. Ollis D.F., Al-Ekabi H. (Eds.). *Photocatalytic Purification of Water and Air*. Amsterdam : Elsevier, 1993. 432 p.
6. Xu M., Huang N., Xiao Z., Lu Z. Photoexcited TiO₂ nanoparticles through OH-radicals induced malignant cells to necrosis // *Supramolecular Science*. 1998. Vol. 5 (5-6). P. 449–451. doi: 10.1016/S0968-5677(98)00048-0
7. Hay S.O., Obee T., Luo Z., Jiang T., Meng Y., He J., Murphy S.C., Suib S. The viability of photocatalysis for air purification // *Molecules*. 2015. Vol. 20 (1). P. 1319–1356. doi: 10.3390/molecules20011319
8. 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
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. Boyce J.M. Modern technologies for improving cleaning and disinfection of environmental surfaces in hospitals // *Antimicrobial Resistance & Infection Control*. 2016. Vol. 5 (1). P. 1–10. doi: 10.1186/s13756-016-0111-x
11. Суворин Д.А., Жуйков Н.Н., Смирнова С.С., Краюхин Д.В., Кожарская Г.В., Поплавских С.Ю. Аэрозольная дезинфекция в системе противэпидемических (профилактических) мероприятий в медицинских организациях // *Контроль и профилактика инфекций, связанных с оказанием медицинской помощи (ИСМП-2021)*. 2021. С. 118–119.
12. Reverberi A.P., Meshalkin V.P., Butusov O.B., Chistyakova T.B., Ferretti M., Cardinale A. M., Fabiano B. Organic and inorganic biocidal energetic materials for agent defeat weapons: An overview and research perspectives // *Energies*. 2023. Vol. 16 (2). Art. no. 675. P. 1–26. doi: 10.3390/en16020675
13. Abraham A., Schoenitz M., Dreizin E.L. Metal-based reactive materials with biocidal reaction products // *Particle Technology Forum 2013-Core Programming Area at the 2013 AIChE Annual Meeting: Global Challenges for Engineering a Sustainable Future*. AIChE. 2013. P. 441–442.
14. Лобанов С.М. Дезинфекция объектов животноводства препаратами на основе йода : дис. ... канд. биол. наук. М., 2001. 114 с.
15. Фокин А.И., Петрова А.А. Разработка новых эффективных методов дезинфекции (санации) воздуха и поверхностей объектов ветеринарного надзора препаратом газообразного йода // *Птицеводство*. 2019. № 6. С. 56–60. doi: 10.33845/0033-3239-2019-68-6-52-55
16. Sanders V.E., Asay B.W., Foley T.J., Tappan B.C., Pacheco A.N., Son S.F. Reaction Propagation of Four Nanoscale Energetic Composites (Al/MoO₃, Al/WO₃, Al/CuO, and Bi₂O₃) // *Journal of Propulsion and Power*. 2007. Vol. 23 (4). P. 707–714. doi: 10.2514/1.26089
17. Piercey D.G., Klappoetke T.M. Nanoscale aluminum-metal oxide (thermite) reactions for application in energetic materials // *Central European Journal of Energetic Materials*. 2010. Vol. 7 (2). P. 115–129.
18. Кудряшова О.Б., Торонков Н.Е., Лернер М.И. Реакционная способность нанотермитов при зажигании горячим телом // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2023. № 2. С. 87–92. doi: 10.25699/SSSB.2023.48.2.006

References

1. Stevenson, A., Freeman, J., Jermy, M. & Chen, J. (2023) Airborne transmission: a new paradigm with major implications for infection control and public health. *The New Zealand Medical Journal*. 1570(136). pp. 69–77.
2. Borisevich, S.V., Sizikova, T.E., Syromyatnikova, S.I., Pantukhov, V.B. & Lebedev, V.N. (2018) Hazardous and Extremely Hazardous Emergent Viral Infections of the Beginning of XXI Century: Rise, Spread, Hazard for Public Health. *Journal of NBC Protection Corps*. 2(2). pp. 61–69. (In Russian).
3. Baboli, Z., Neisi, N., Babaei, A.A., Ahmadi, M., Sorooshian, A., Birgani, Y.T. & Goudarzi, G. (2021). On the airborne transmission of SARS-CoV-2 and relationship with indoor conditions at a hospital. *Atmospheric Environment*. 261. Art. no. 118563. pp. 1–10. doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118563
4. Paton, D.J., Gubbins, S. & King, D.P. (2018) Understanding the transmission of foot-and-mouth disease virus at different scales. *Current opinion in virology*. 28. pp. 85–91. doi: 10.1016/j.coviro.2017.11.013
5. Ollis, D.F., Al-Ekabi, H. (1993). *Photocatalytic Purification of Water and Air*. Amsterdam : Elsevier.
6. Xu, M., Huang, N., Xiao, Z. & Lu, Z. (1998). Photoexcited TiO₂ nanoparticles through OH-radicals induced malignant cells to necrosis. *Supramolecular Science*. 5(5-6). pp. 449–451. doi: 10.1016/S0968-5677(98)00048-0
7. Hay, S.O., Obee, T., Luo, Z., Jiang, T., Meng, Y., He, J., Murphy, S.C. & Suib, S. (2015). The viability of photocatalysis for air purification. *Molecules*. 20(1). pp. 1319–1356. doi: 10.3390/molecules20011319
8. 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

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. Boyce, J.M. (2016). Modern technologies for improving cleaning and disinfection of environmental surfaces in hospitals. *Antimicrobial Resistance & Infection Control*. 5(1). pp. 1–10. doi: 10.1186/s13756-016-0111-x
11. Suvorin, D.A., Zhuikov, N.N., Smirnova, S.S., Krayukhin, D.V., Kozharskaya, G.V. & Poplavskikh, S.Yu. (2021) Aerosol'naya dezinfektsiia v sisteme protivoepidemicheskikh (profilakticheskikh) meropriatii v meditsinskikh organizatsiiakh [Aerosol disinfection in the system of anti-epidemic (preventive) measures in medical organizations]. In: *Control and prevention of infections associated with health care (HAIs-2021)*. Moscow. pp. 118–119.
12. Reverberi, A.P., Meshalkin, V.P., Butusov, O.B., Chistyakova, T.B., Ferretti, M., Cardinale, A.M. & Fabiano, B. (2023). Organic and inorganic biocidal energetic materials for agent defeat weapons: An overview and research perspectives. *Energies*. 16(2). Art. no. 675. pp. 1–26. doi: 10.3390/en16020675
13. Abraham, A., Schoenitz, M. & Dreizin, E.L. (2013). Metal-based reactive materials with biocidal reaction products. In: *Particle Technology Forum 2013-Core Programming Area at the 2013 AIChE Annual Meeting: Global Challenges for Engineering a Sustainable Future*. AIChE. pp. 441–442.
14. Lobanov, S.M. (2001) *Dezinfektsiia ob'ektov zhivotnovodstva preparatami na osnove ioda* [Disinfection of livestock objects with iodine-based preparations]. Cand. Sc. Thesis. Moscow.
15. Fokin, A.I. & Petrova, A.A. (2019). Razrabotka novykh effektivnykh metodov dezinfektsii (sanatsii) vozdukha i poverkhnostei ob'ektov veterinarnogo nadzora preparatom gazoobraznogo ioda [Development of new effective methods for disinfection (sanitization) of air and surfaces of veterinary surveillance objects using a gaseous iodine preparation]. *Pitsevodstvo –Poultry Science*. 6. pp. 56–60. doi: 10.33845/0033-3239-2019-68-6-52-55
16. Sanders, V.E., Asay, B.W., Foley, T.J., Tappan, B.C., Pacheco, A.N. & Son, S.F. (2007). Reaction propagation of four nanoscale energetic composites (Al/MoO₃, Al/WO₃, Al/CuO, and B₂O₃). *Journal of Propulsion and Power*. 23(4). pp. 707–714. doi: 10.2514/1.26089
17. Piercey, D.G. & Klappoetke, T.M. (2010). Nanoscale aluminum-metal oxide (thermite) reactions for application in energetic materials. *Central European Journal of Energetic Materials*. 7(2). pp. 115–129.
18. Kudryashova, O.B., Toropkov, N.E. & Lerner, M.I. (2023). Reactivity of nanothermits when ignition by a hot body. *South Siberian Scientific Bulletin*. 2. pp. 87–92. (In Russian). doi: 10.25699/SSSB.2023.48.2.006

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

Конюхов Илья Евгеньевич – аспирант, младший научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий (Бийск, Россия). E-mail: ilyakon008@gmail.com

Титов Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией физики преобразования энергии высоко-энергетических материалов Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН (Бийск, Россия). E-mail: titov.sergey.s@gmail.com

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

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

Konyukhov Ilya E., 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: ilyakon008@gmail.com

Titov Sergey S., Cand. Sc. (Engineering), head of the Laboratory of physics of energy conversion of high-energy materials, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Biysk, Russian Federation). E-mail: titov.sergey.s@gmail.com

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

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 8.11.2023; одобрена после рецензирования 27.11.2023; принята к публикации 12.12.2023

The article was submitted 8.11.2023; approved after reviewing 27.11.2023; accepted for publication 12.12.2023