

Научная статья

УДК 544.772.3

doi: 10.17223/24135542/37/3

## Синтез и исследование свойств нанотермитных систем с биоцидными добавками

Сергей Дмитриевич Соколов<sup>1</sup>, Ольга Борисовна Кудряшова<sup>2</sup>,  
Роман Андреевич Нефедов<sup>3</sup>, Александр Борисович Ворожцов<sup>4</sup>

<sup>1, 3, 4</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2, 3</sup> Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения  
Российской академии наук, Бийск, Россия

<sup>1</sup> sokolovsd95@yandex.ru

<sup>2</sup> olgakudr@inbox.ru

<sup>3</sup> ronef88@yandex.ru

<sup>4</sup> abv1953@mail.ru

**Аннотация.** Исследовалась эффективность инактивации *Lactobacillus casei* с помощью нанотермитов на основе  $nAl + CuO/Fe_2O_3/MoO_3$  в сочетании с биоцидными добавками, такими как кристаллический йод ( $I_2$ ), йодоформ ( $CHI_3$ ) и оксид цинка ( $ZnO$ ). Показано, что продукты реакции ( $> 98\%$ ) осели в течение 660 с на стенках и дне камеры, оставив во взвешенном состоянии лишь 1–2% аэрозольных частиц размером 3–4 мкм. Среди окислителей  $CuO$  продемонстрировал наиболее устойчивое горение, создав плотное облако аэрозоля и достигнув индекса бактерицидной активности 33% при расстоянии от эпицентра взрыва 125 мм, по сравнению с  $\sim 9\%$  для  $Fe_2O_3$  и  $\sim 3\%$  для  $MoO_3$ . При введении 20 мас. %  $I_2$  образование продуктов реакции привело к высокой эффективности инактивации, при этом индекс бактерицидной активности составил 72% при расстоянии 125 мм от эпицентра взрыва. Однако увеличение содержания  $I_2$  до 40 мас. % снизило индекс бактерицидной активности до 50%. Аналогично 20 мас. %  $CHI_3$  усиливали инактивацию за счет образования белково-комплексных видов йода, достигая максимального значения 73% при 125 мм от эпицентра взрыва; более высокая концентрация  $CHI_3$  снижает эффективность за счет снижения температуры реакции и создания биоцидных продуктов реакции. Изменение концентрации  $ZnO$  не оказало заметного влияния на инактивацию, что свидетельствует о пороговом эффекте в генерации биоцидных соединений цинка. Для всех добавок эффективность инактивации снижалась на больших расстояниях (например, от 125 до 445 мм) из-за быстрого рассеивания облака продуктов реакции. Результаты экспериментальных исследований подчеркивают важность баланса между концентрацией биоцидных добавок и эффективностью сгорания. Оптимальные составы, включающие 20 мас. %  $I_2$ ,  $CHI_3$  или  $ZnO$  в нанотермиты  $nAl + CuO$ , сохраняют надежные энергетические характеристики и создают биоцидные продукты реакции, способные значительно снизить жизнеспособность *Lactobacillus casei*.

**Ключевые слова:** нанотермиты, оксиды металлов, бактерицидная активность, горение, очистка атмосферы, биоциды

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

Для цитирования: Соколов С.Д., Кудряшова О.Б., Нефедов Р. А., Ворожцов А.Б. Синтез и исследование свойств нанотермитных систем с биоцидными добавками // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2025. № 37. С. 29–47. doi: 10.17223/24135542/37/3

Original article

doi: 10.17223/24135542/37/3

## Synthesis and characterization of nanothermite systems with biocidal additives

Sergei D. Sokolov<sup>1</sup>, Olga B. Kudryashova<sup>2</sup>,  
Roman A. Nefedov<sup>3</sup>, Alexander B. Vorozhtsov<sup>4</sup>

<sup>1, 3, 4</sup> Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>2, 3</sup> Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk, Russia

<sup>1</sup> sokolovsd95@yandex.ru

<sup>2</sup> olgakudr@inbox.ru

<sup>3</sup> ronef88@yandex.ru

<sup>4</sup> abv1953@mail.ru

**Abstract.** The efficiency of *Lactobacillus casei* inactivation using nanothermites based on nAl+CuO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MoO<sub>3</sub> in combination with biocidal additives such as crystalline iodine (I<sub>2</sub>), iodoform (CHI<sub>3</sub>) and zinc oxide (ZnO) was investigated. It was shown that the reaction products (>98%) settled within 660 s on the walls and bottom of the chamber, leaving only 1-2% of 3-4 μm aerosol particles in suspension. Among the oxidizing agents, CuO showed the most stable combustion, producing a dense aerosol cloud and achieving a bactericidal activity index of 33% at a distance of 125 mm from the explosion epicenter, compared to ~9% for Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ~3% for MoO<sub>3</sub>. When 20 wt% I<sub>2</sub> was introduced, the formation of reaction products resulted in high inactivation efficiency, with a bactericidal activity index of 72% at a distance of 125 mm from the blast epicenter. However, increasing the I<sub>2</sub> content to 40 wt% decreased the bactericidal activity index to 50%. Similarly, 20 wt% CHI<sub>3</sub> enhanced inactivation through the formation of protein-complex iodine species, reaching a maximum value of 73% at 125 mm from the blast epicenter; higher concentration of CHI<sub>3</sub> reduced the efficiency by lowering the reaction temperature and creating biocidal reaction products. Changing the concentration of ZnO had no appreciable effect on inactivation, indicating a threshold effect in the generation of zinc biocidal compounds. For all additives, the inactivation efficiency decreased at long distances (e.g., from 125 mm to 445 mm) due to rapid dispersion of the reaction product cloud. The experimental results emphasize the importance of the balance between biocidal additive concentration and combustion efficiency. Optimal formulations incorporating 20 wt.% I<sub>2</sub>, CHI<sub>3</sub> or ZnO into nAl+CuO nanothermites maintain reliable energy performance and generate biocidal reaction products that can significantly reduce the viability of *Lactobacillus casei*.

**Keywords:** nanothermites, metal oxides, bactericidal activity, combustion, atmospheric purification, biocides

**Acknowledgments:** The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-69-00108, <https://rscf.ru/project/22-69-00108>

**For citation:** Sokolov, S.D., Kudryashova, O.B., Nefedov, R.A., Vorozhtsov, A.B. Synthesis and characterization of nanothermite systems with biocidal additives. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2025, 37, 29–47. doi: 10.17223/24135542/37/3

## Введение

Загрязнение атмосферы в результате техногенных катастроф, промышленных аварий, транспортных инцидентов и преднамеренных террористических актов является одной из основных глобальных проблем. Выброс опасных химических веществ и биологических патогенов в окружающую среду может привести к серьезным последствиям для здоровья населения, экологической и экономической стабильности. В связи с этим разработка инновационных материалов и технологий для нейтрализации опасных химических веществ и инактивации биологических патогенов, переносимых воздушно-капельным путем, является важнейшей задачей медицины катастроф, экологической безопасности и охраны здоровья населения [1–7]. В частности, эпидемии, пандемии и инциденты, связанные с распространением биологических патогенов, продемонстрировали острую необходимость в разработке эффективных мер для смягчения биологических угроз, переносимых по воздуху. Традиционные методы очистки атмосферы, такие как химическое распыление, ультрафиолетовое (УФ) излучение и термическая обработка, имеют недостатки, включая низкую эффективность инактивации, логистические проблемы и медленное время реагирования в экстренной ситуации.

Одним из перспективных подходов инактивации биологических патогенов в воздухе является использование нанотермитов с биоцидными добавками, которые сочетают в себе преимущества горения и направленного биоцидного действия [8].

Нанотермиты – это класс энергетических материалов, состоящих из гомогенных смесей наноразмерных частиц металлического топлива (как правило, наноалюминия,  $nAl$ ) и окислителя (как правило, оксиды меди ( $CuO$ ), железа ( $Fe_2O_3$ ) и молибдена ( $MoO_3$ )), которые во многих случаях обладают более высокой плотностью энергии и температурой пламени, чем традиционные мономолекулярные системы [9, 10]. Однако одной только термической деструкции недостаточно для полной инактивации патогенов, особенно для высокоустойчивых микроорганизмов, таких как бактериальные споры и вирусные частицы.

Для повышения эффективности инактивации патогенов нанотермиты могут быть модифицированы биоцидными добавками, которые вводят химически активные вещества, способные непосредственно взаимодействовать с биологическими патогенами, разрушая их. В нанотермитные системы были включены различные биоцидные агенты, такие как оксиды, содержащие серебро [11, 12], соль персульфата [13], йодаты металлов [14] и пентоксид йода ( $I_2O_5$ ) [15, 16]. При иницировании эти материалы вызывают

высокотемпературные экзотермические реакции, в результате которых образуются продукты сгорания, способные инактивировать биологические патогены [17, 18]. Стоит отметить, что температура, способная инактивировать биологические патогены, создается только непосредственно в зоне реакции, но не в большом воздушном пространстве помещений. Поэтому необходимо обеспечить прямое воздействие биоцидного компонента на биологический патоген [19, 20]. Благодаря высоким взрывчатым характеристикам нанотермитов биоцидные компоненты распределяются по большой площади, что обеспечивает высокую эффективность системы и требует значительно меньших усилий по сравнению с традиционными методами. Таким образом, нанотермиты с биоцидными добавками рассматриваются как перспективные материалы с высокой эффективностью инактивации биологических патогенов.

Цель работы – поиск оптимальных составов нанотермитных смесей с биоцидными добавками для инактивации биологических патогенов на примере *Lactobacillus casei*.

## Материалы и методы

### Получение нанотермита с биоцидными добавками

Исходными компонентами для получения нанотермита выбраны  $n\text{Al}$  в качестве металлического горючего и  $\text{CuO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{MoO}_3$  в качестве окислителя. Все исходные компоненты получены методом электрического взрыва проводников (ЭВП) [21]. Соотношение компонентов нанотермитной смеси выбирали, исходя из стехиометрии, которую для каждой системы рассчитывали на основе реакций



В качестве биоцидной добавки использовались: коммерчески доступные кристаллический йод ( $\text{I}_2$ ) и йодоформ ( $\text{CHI}_3$ ), а также оксид цинка ( $\text{ZnO}$ ), полученный методом ЭВП. Биоцидная добавка вводилась к референтной системе в количестве 20, 30 и 40 мас. %. Выбор концентрации обоснован оптимальным балансом между сохранением энергетических показателей реакции и обеспечением эффективности инактивации. Введение биоцидной добавки в количестве менее 20 мас. % и более 40 мас. % приводит к отклонению от оптимального баланса, что существенно сказывается на эффективности инактивации.

Приготовление нанотермита с биоцидной добавкой осуществлялось в круглодонной колбе объемом 50 мл. В колбу помещались все компоненты смеси (например,  $n\text{Al} + \text{CuO} + \text{I}_2$ ) и добавлялось 25 мл легкоотгоняемой жидкостью (гексан). Для получения однородной смеси было использовано ультразвуковое воздействие продолжительностью 30 мин. Затем гексан удалялся из колбы, и осуществлялась сушка полученной смеси в вакуумном

шкафу при температуре 50°C с целью удаления оставшейся влаги. После этого высушенный состав засыпали в генератор и проводили экспериментальные исследования по созданию облака продуктов реакции. Методика изготовления смесей и их компонентный состав представлены на рис. 1 и в табл. 1.

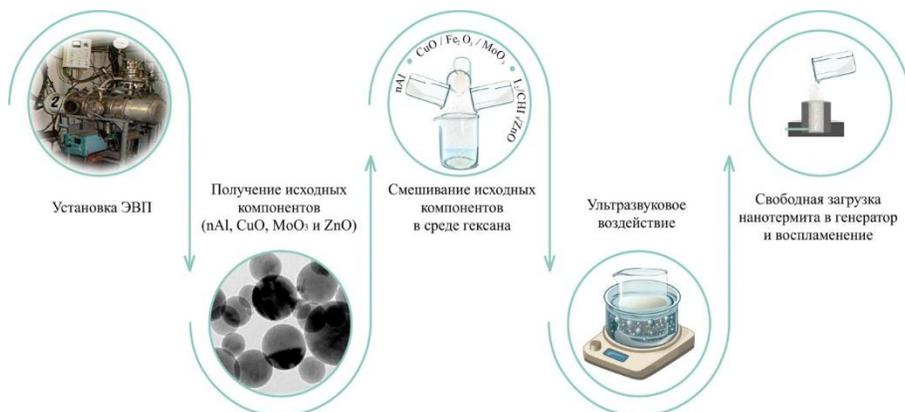


Рис. 1. Методика изготовления нанотермитных систем с биоцидными добавками

Таблица 1

**Компонентный состав исследуемых нанотермитов с биоцидными добавками**

| Маркировка | Содержание, грамм |      |                                |                  |                |                   |      |
|------------|-------------------|------|--------------------------------|------------------|----------------|-------------------|------|
|            | nAl               | CuO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MoO <sub>3</sub> | I <sub>2</sub> | CH <sub>3</sub> I | ZnO  |
| A1         | 0,32              | 1,18 | –                              | –                | –              | –                 | –    |
| A2         | 0,43              | –    | 1,07                           | –                | –              | –                 | –    |
| A3         | 0,47              | –    | –                              | 1,03             | –              | –                 | –    |
| B1         | 0,25              | 0,95 | –                              | –                | 0,3            | –                 | –    |
| B2         | 0,22              | 0,83 | –                              | –                | 0,45           | –                 | –    |
| B3         | 0,19              | 0,71 | –                              | –                | 0,6            | –                 | –    |
| C1         | 0,25              | 0,93 | –                              | –                | –              | 0,32              | –    |
| C2         | 0,22              | 0,81 | –                              | –                | –              | 0,47              | –    |
| C3         | 0,19              | 0,69 | –                              | –                | –              | 0,62              | –    |
| D1         | 0,25              | 0,95 | –                              | –                | –              | –                 | 0,3  |
| D2         | 0,22              | 0,83 | –                              | –                | –              | –                 | 0,45 |
| D3         | 0,19              | 0,71 | –                              | –                | –              | –                 | 0,6  |

*Примечание.* А – референтная система; В – с добавкой I<sub>2</sub>; С – с добавкой CH<sub>3</sub>I; D – с добавкой ZnO. В1, С1 и D1 – 20 мас. % биоцидной добавки; В2, С2 и D2 – 30 мас. %; В3, С3 и D3 – 40 мас. %.

**Воспламенение нанотермита с биоцидными добавками**

На рис. 2 представлено схематическое изображение экспериментальной кубической камеры объемом 1 м<sup>3</sup>. Для предотвращения утечки продуктов реакции из камеры проведена проверка герметичности путем нагнетания воздуха и наблюдения за скоростью падения давления в камере. Камера оснащена функциональными отверстиями, необходимыми для исследования

характеристик аэрозольных частиц. Для оценки размера и концентрации аэрозольных частиц использовалась оригинальная установка «Бесконтактная лазерная установка ЛИД-2М» [22].

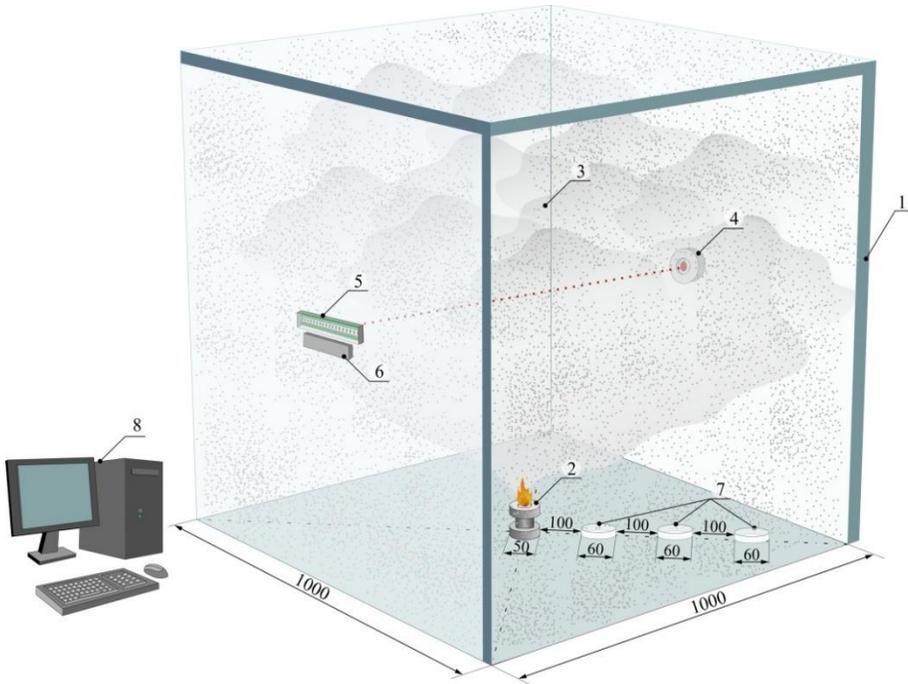


Рис. 2. Экспериментальная камера:

1 – экспериментальная камера; 2 – генератор продуктов реакции; 3 – облако продуктов реакции; 4 – бесконтактная лазерная установка ЛИД-2М; 5 – фотодиодная матрица; 6 – усилитель сигнала; 7 – чашки Петри с микроорганизмами; 8 – автоматизированная рабочая станция

При воспламенении нанотермита с использованием воспламенителя продукты реакции (биоцидные пары и аэрозольные частицы) повышают давление в корпусе конструкции генератора, при превышении давления предела прочности мембраны происходит импульсное истечение продуктов реакции в пространство экспериментальной камеры.

Для создания облака продуктов реакции разработана конструкция генератора (см. рис. 2), обеспечивающая высокую скорость и направленность истечения продуктов реакции. Генератор изготовлен в виде стальной формы с возможностью разбора для проведения очистки внутренних поверхностей после проведения экспериментов. Максимальная загрузка нанотермита составляет 1,5 г. Воспламенение осуществляется с использованием лабораторного автотрансформатора с ручной регулировкой (ЛАТР) путем нагрева нанотермитной смеси нихромовой спиралью диаметром 0,1 мм.

Для создания равномерного потока продуктов реакции, которые, в свою очередь, полностью заполняют пространство экспериментальной камеры

за короткое время, осаждаясь сверху вниз, разработана мембрана. Мембрана изготовлена из ударопрочной технической термопластической смолы на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом (АБС-пластик). Мембрана толщиной 1 мм с ослаблением до 0,5 мм изготавливалась на 3D-принтере (PICASO 3D Designer, Россия, Москва).

### Микробиологические методы

Бактерицидная активность оценивалась в отношении группы бактерий, относящихся к классу *Firmicutes*. Эта группа бактерий включает в себя грамположительные организмы, которые характеризуются толстым пептидогликановым слоем, создающим дополнительную защиту клеточной мембраны, что обеспечивает устойчивость к различным внешним воздействиям. В группе *Firmicutes* встречается несколько высокопатогенных штаммов, особенно в родах *Bacillus*, *Streptococcus*, *Staphylococcus* и *Clostridium*. Некоторые из этих бактерий способны образовывать споры – механизм выживания, который позволяет им переносить суровые условия окружающей среды. После восстановления благоприятных условий споры прорастают и возобновляют свою патогенную активность. Ярким примером является *Bacillus anthracis*, возбудитель сибирской язвы, которая не только представляет значительную угрозу для здоровья населения, но и может использоваться в качестве биологического оружия. Помимо этих высокопатогенных видов, в группу *Firmicutes* также входят непатогенные представители, например род *Lactobacillus*, который обычно считается полезным для здоровья человека. *Lactobacillus casei* был выбран в качестве тест-организма для данного исследования из-за его значимости как в пищевой микробиологии, так и в качестве представителя грамположительных бактерий в этой группе.

«Лактобакагар» (ФБУН ГНЦПМБ) подготовлен путем растворения необходимого количества питательной среды в 1 л дистиллированной воды. Затем смесь доводили до кипения, после чего следовал 3-минутный период выдерживания. В течение этого времени раствор периодически перемешивали, чтобы обеспечить полное растворение агара. После этого раствор фильтровали через ватно-марлевый фильтр, чтобы удалить все примеси. Для обеспечения стерильности среду автоклавировали при 120°C в течение 15 мин. После стерилизации среде давали остыть до комнатной температуры и разливали в стерильные чашки Петри диаметром 60 мм, формируя слой (пластины) толщиной около 5 мм. Затем на поверхность охлажденных агаровых пластин засеивали *Lactobacillus casei*. Стерильный шпатель использовался для равномерного распределения микроорганизмов по поверхности среды [6]. Расположение чашек Петри с посеянными культурами *Lactobacillus casei* показано на рис. 2.

Эффективность инактивации оценивалась путем инкубации чашек Петри, содержащих *Lactobacillus casei*, в экспериментальной камере в течение 25 мин. Этот период инкубации давал достаточно времени для того, чтобы пары и другие побочные продукты реакции осели на поверхности

чашек Петри и камеры. После этой первоначальной экспозиции чашки Петри были перенесены в CO<sub>2</sub>-инкубатор, где они далее инкубировались в течение 48 ч при 37°C в атмосфере 5% CO<sub>2</sub> для создания оптимальных условий роста бактерий.

По окончании инкубационного периода количество жизнеспособных бактериальных клеток в культуре оценивалось путем определения колониеобразующих единиц (КОЕ). Для этого проводили подсчет колоний с помощью автоматического счетчика Scan 300 (Interscience, Китай). Эффективность инактивации оценивалась путем визуального сравнения количества колоний, образовавшихся на агаровых пластинах, что позволило оценить эффект инактивации.

Значение индекса бактерицидной активности Z определялось по формуле (4):

$$Z = (K - O)/K \cdot 100\%, \quad (4)$$

где O – количество колоний опытной пробы, K – количество колоний контрольной пробы.

### Результаты и обсуждение

В табл. 2 представлена информация о некоторых полученных физико-химических характеристиках исходных компонентов.

Таблица 2

**Физико-химические характеристики синтезированных компонентов**

| Образец   | nAl   | MoO <sub>3</sub>               | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>               | CuO  |
|---|---|--------------------------------|--|--|
| Средний размер частиц, нм                       | 110 ± 10  | 110 ± 10                       | 110 ± 10                                     | 80 ± 10                                      |
| Площадь удельной поверхности, м <sup>2</sup> /г | 12 ± 1  | 9 ± 1                          | 10 ± 1                                       | 15 ± 1                                       |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>                    | 0,4 ± 0,1   | 0,5 ± 0,1                      | 1 ± 0,2                                      | 2,2 ± 0,2                                    |
| Фазовый состав                                  | 90 мас. % Al,<br>10 мас. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 100 мас. %<br>MoO <sub>3</sub> | 100 мас. %<br>Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 97 мас. % CuO,<br>3 мас. % Cu <sub>2</sub> O |
| Активный алюминий, мас. %                       | 88,9  | –                              | –  | –  |

В ходе эксперимента *Lactobacillus casei* подвергались воздействию бицидных паров и других газообразных, жидких и твердых продуктов реакции (мелких частиц). Благодаря высокой чувствительности нанотермита реакция происходит практически мгновенно с характерным звуковым эффектом. В течение одной секунды облако аэрозоля рассеивается, заполняя весь объем экспериментальной камеры, что наблюдалось визуально.

На рис. 3 приведены данные об относительной концентрации  $C_p$  и диаметре Заутера  $D_{32}$  частиц аэрозоля продуктов реакции, полученные с помощью установки ЛИД-2М. Экспериментальные данные – средние по образцам с маркировками A1, B1, C1, D1.

Относительная концентрация частиц продуктов реакции определяется выражением

$$C_p = \exp(-\gamma t). \quad (5)$$

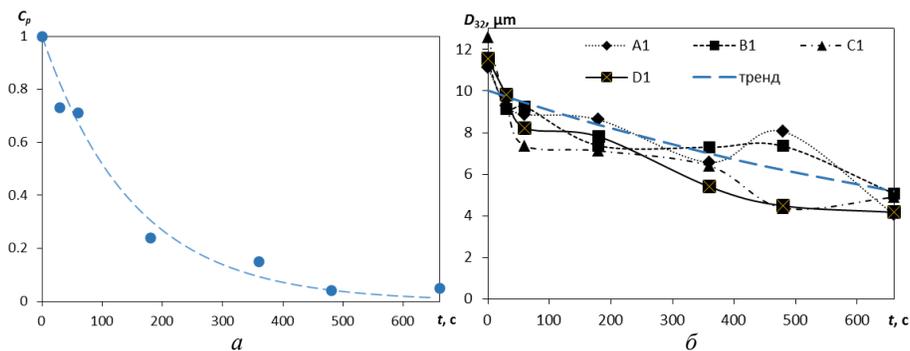


Рис. 3. Относительная концентрация (а) и диаметр Заутера частиц аэрозоля (б) в зависимости от времени

Коэффициент скорости осаждения, обозначаемый  $\gamma$ , зависит от физико-химических свойств частиц, а также от конкретных условий, в которых происходит распыление. Как показано на рис. 3, а, измеренное значение коэффициента скорости осаждения составляет  $\gamma = 6,4 \cdot 10^{-3}$ . В течение 660 с большая часть частиц продукта реакции оседает на стенки и дно экспериментальной камеры. Только самые мелкие частицы диаметром от 3 до 4 мкм, составляющие примерно 1–2% от первоначальной массы, остаются во взвешенном состоянии в воздухе. Эти остаточные частицы впоследствии оседают на образцах *Lactobacillus casei*. Такое осаждение приводит к снижению бактерицидной активности образцов, поскольку частицы могут мешать микробному взаимодействию или вызывать токсические эффекты.

На рис. 4 показана эффективность инактивации, или бактерицидная активность, различных референтных систем. Экспериментальные данные показывают, что самая высокая эффективность инактивации *Lactobacillus casei* достигается при использовании нанотермитов, содержащих CuO в качестве окислителя. В частности, для образца, помещенного на расстоянии 125 мм от эпицентра взрыва, показатель бактерицидной активности составляет 33%, на расстоянии 285 мм он снижается до 23%, а на расстоянии 445 мм – до 19%.

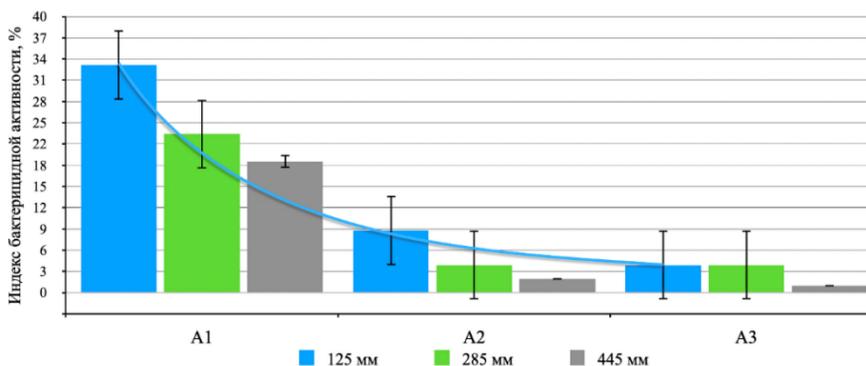


Рис. 4. Индекс бактерицидной активности референтных систем с добавками CuO (группа A1), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (группа A2) и MoO<sub>3</sub> (группа A3)

Напротив, системы с добавками  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{MoO}_3$  показали гораздо меньшую эффективность инактивации: ~ 9% и ~ 3% соответственно. Эти результаты согласуются с исследованиями других ученых, которые предполагают, что соединения на основе меди обладают более высокими биоцидными свойствами [23]. Стоит отметить, что нанотермит с медью в качестве биоцидного компонента не только демонстрирует превосходные антимикробные свойства, но и обладает самой высокой реакционной активностью среди исследуемых нанотермитных систем.

Один из основных механизмов биоцидного действия наночастиц  $\text{CuO}$  обусловлен их окислительными свойствами. Являясь мощным окислителем,  $\text{CuO}$  генерирует активные формы кислорода (АФК), такие как гидроксильные радикалы и супероксидные анионы, которые вызывают перекисное окисление липидов клеточной мембраны [24]. Это окислительное повреждение дестабилизирует мембрану, что приводит к ее разрыву и в конечном счете к гибели бактериальной клетки.

Биоцидное действие меди выходит за рамки простого окислительного повреждения. Более тонкий механизм связан с растворением наночастиц  $\text{CuO}$  внутри бактериальной клетки. Когда наночастицы  $\text{CuO}$  растворяются, высвобождаются ионы меди ( $\text{Cu}^{2+}$ ), которые проникают в цитоплазму [25]. Благодаря высокому сродству к биомолекулам, таким как белки и нуклеиновые кислоты, эти ионы меди взаимодействуют и связываются с основными макромолекулами внутри клетки. Такое взаимодействие нарушает структуру и функции жизненно важных белков и нуклеиновых кислот, что приводит к нарушению обмена веществ и в итоге к гибели клетки. Эти тонкие внутриклеточные эффекты еще больше усиливают антимикробные свойства систем на основе меди, делая их более эффективными, чем другие материалы, такие как  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{MoO}_3$ , в инактивации патогенов.

На основе проведенных исследований с использованием референтных систем решено в дальнейших исследованиях по изучению эффективности инактивации использовать  $\text{CuO}$  в качестве окислителя.

На рис. 5 представлены результаты экспериментальных исследований по инактивации *Lactobacillus casei* с использованием нанотермита с добавкой  $\text{I}_2$ . Показано, что введение  $\text{I}_2$  в состав нанотермита в концентрациях 20, 30 и 40 мас. % существенно влияет на эффективность инактивации по сравнению с референтной системой. Самое высокое значение индекса бактерицидной активности наблюдается на расстоянии 125 мм от эпицентра взрыва, а с увеличением расстояния значение уменьшается: 125 мм – 72%, 285 мм – 68%, 445 мм – 50%. На расстоянии 445 мм от эпицентра взрыва значение индекса бактерицидной активности снизилось до 39, 51 и 26% для тех же концентраций йода соответственно.

Повышенная эффективность нанотермита с добавкой  $\text{I}_2$  при инактивации бактерий объясняется мощными окислительными свойствами йода и продуктов его реакции. Пары йода, рассеиваясь, адсорбируются на поверхности бактериальных клеток и взаимодействуют с окружающей влагой, образуя активные биоцидные соединения. Эти соединения с сильным окислительным

потенциалом и способствуют быстрому проникновению в клеточные мембраны. Взаимодействие йода с сульфгидрильными ( $-SH$ ) и гидроксильными ( $-OH$ ) группами аминокислот приводит к структурным изменениям основных бактериальных белков. Нарушение конформации белков приводит к изменению ферментативных функций и метаболических путей, что в конечном итоге ставит под угрозу жизнеспособность клеток.

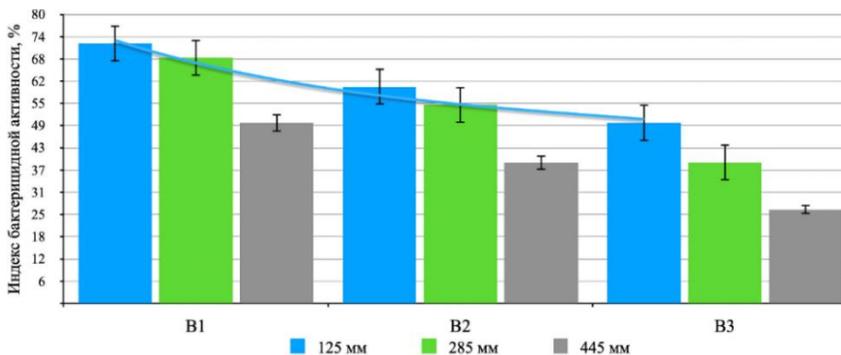


Рис. 5. Индекс бактерицидной активности систем с добавкой I<sub>2</sub>: 20 мас. % (группа B1), 30 мас. % (группа B2), 40 мас. % (группа B3)

Кроме того, биоцидное действие йода выходит за рамки простого поверхностного взаимодействия. Проникновение йода в цитоплазму бактерий может вызывать окислительный стресс, нарушая внутриклеточный окислительно-восстановительный гомеостаз. Окислительная модификация нуклеотидов и вмешательство в репликацию ДНК также способствуют инактивации бактерий.

Наблюдаемое снижение значения индекса бактерицидной активности с увеличением расстояния может быть объяснено снижением локальной концентрации активных видов йода из-за дисперсии аэрозоля, эффектов разбавления и рекомбинации реактивных молекул йода. Быстрое улетучивание и перераспределение паров йода внутри экспериментальной камеры также может влиять на эффективность инактивации. Эти результаты согласуются с предыдущими исследованиями, где показано, что антимикробная эффективность йода в значительной степени зависит от его фазового состояния, концентрации и взаимодействия с такими факторами окружающей среды, как влажность и адсорбция на поверхности [26].

Более высокая инактивация вблизи эпицентра взрыва может быть объяснена быстрым разбавлением и пространственным рассеиванием реактивных веществ, образующихся в ходе реакции. Поведение системы инактивации в зависимости от концентрации йода (например, 20 мас. % I<sub>2</sub> дает более высокую эффективность, чем 40 мас. % при 125 мм) позволяет предположить, что такие факторы, как кинетика реакции, тепловыделение и динамика паров, могут влиять на образование и перенос соединений йода.

На рис. 6 представлены результаты исследований по оценке эффективности инактивации нанотермитов на основе  $nAl + CuO$ , содержащих  $CH_3$  в качестве биоцидной добавки. Показано, что оптимальная эффективность

достигается при концентрации  $\text{CH}_3\text{I}$  20 мас. %, при которой индекс бактерицидной активности достигает 73% на расстоянии 125 мм от эпицентра взрыва. При увеличении содержания  $\text{CH}_3\text{I}$  до 30 и 40 мас. % значение индекса бактерицидной активности снижается до 51 и 50% соответственно.

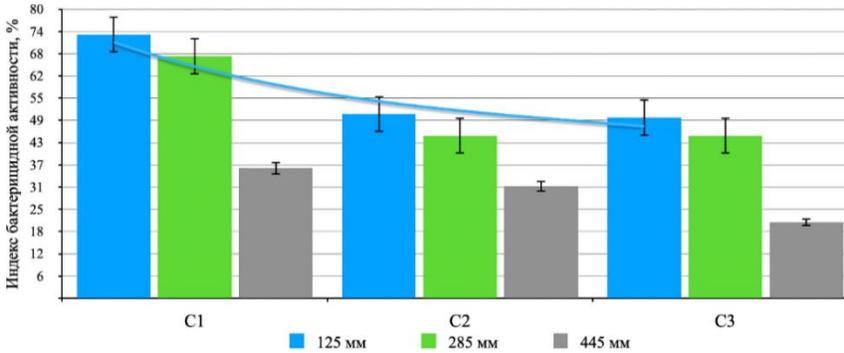


Рис. 6. Индекс бактерицидной активности систем с добавкой  $\text{CH}_3\text{I}$ : 20 мас. % (группа C1), 30 мас. % (группа C2), 40 мас. % (группа C3)

$\text{CH}_3\text{I}$  признан быстродействующим антисептиком, механизм действия которого, как полагают, связан с образованием комплексов с белками и другими органическими компонентами бактериальных клеток. Молекула  $\text{CH}_3\text{I}$  содержит три атома йода, которые придают ей высокую степень окислительного потенциала. При горении нанотермита  $\text{CH}_3\text{I}$  быстро высвобождается и, благодаря преимущественной растворимости в органических растворителях по сравнению с водой, концентрируется в богатых липидами доменах мембран бактериальных клеток. Такое избирательное разделение усиливает его эффект. При контакте с клеточными компонентами  $\text{CH}_3\text{I}$  взаимодействует с белковыми структурами и изменяет их, образуя стабильные комплексы, что нарушает основные метаболические процессы и приводит к гибели клеток. Снижение бактерицидной эффективности с увеличением расстояния согласуется с экспериментальными результатами системы, включающей  $\text{I}_2$  в качестве биоцидной добавки.

На рис. 7 показано влияние включения  $\text{ZnO}$  в нанотермитные системы на основе  $\text{nAl} + \text{CuO}$ . Экспериментальные данные показывают, что изменение концентрации  $\text{ZnO}$  не оказывает существенного влияния на общую эффективность инактивации. На небольшом расстоянии 125 мм от эпицентра взрыва индекс бактерицидной активности достигает 78%. При увеличении расстояния до 285 и 445 мм индекс бактерицидной активности снижается до 52 и 45% соответственно.

На рис. 8 представлен общий вид чашек Петри с *Lactobacillus casei*, расположенных на расстоянии 125 мм от эпицентра взрыва.

На основе полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что оптимальной концентрацией является 20 мас. %  $\text{I}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{I}$  или  $\text{ZnO}$  в нанотермиты на основе  $\text{nAl} + \text{CuO}$ . При таком уровне добавок сохраняется три ключевых преимущества:

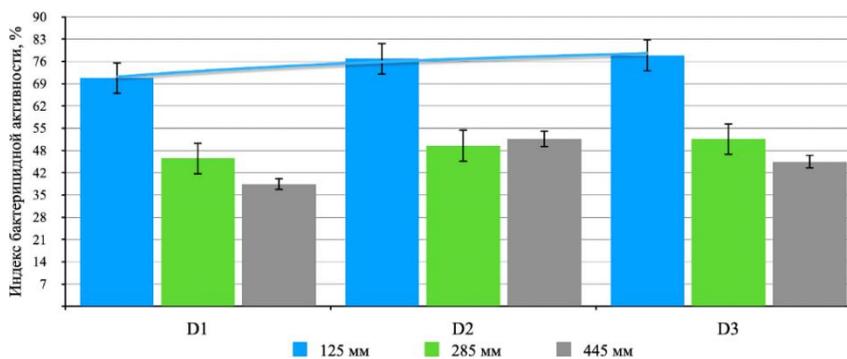


Рис. 7. Индекс бактерицидной активности систем с ZnO: 20 мас. % (группа D1), 30 мас. % (группа D2), 40 мас. % (группа D3)

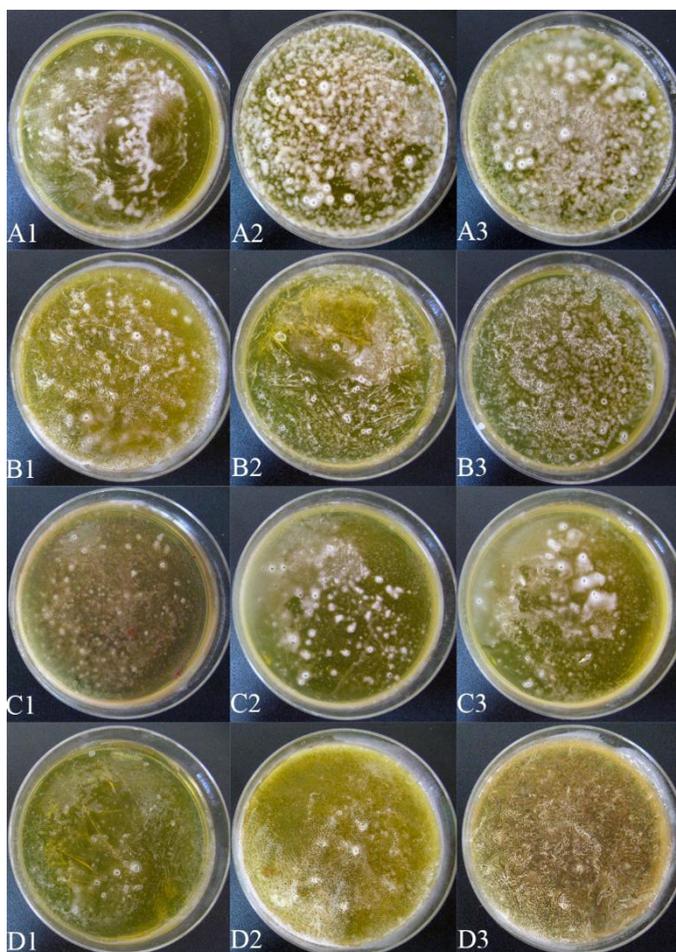


Рис. 8. Общий вид чашек Петри с *Lactobacillus casei*, расположенных на расстоянии 125 мм от эпицентра взрыва для всех исследуемых нанотермитных систем

– Окислительные и термические свойства основной реакции  $nAl + CuO$  сохраняются, обеспечивая достаточное количество тепла и скорость реакции.

– Выбранная концентрация эффективно генерирует облако продуктов реакции, содержащее биоцидные вещества (например, I<sub>2</sub>, HI, Zn и CuI) и побочные продукты реакции. Эти виды объемно рассеиваются вокруг места детонации, способствуя быстрому контакту с микроорганизмами и их инактивации. Присутствие йодсодержащих веществ (I<sub>2</sub>, HI) особенно важно для антимикробной эффективности широкого спектра действия, в то время как Zn- и Cu-содержащие соединения дополнительно способствуют разрушению клеточных мембран и нарушению метаболизма.

– Сохраняются высокие технологические свойства, равномерное смешивание и стабильное хранение. Высокая концентрация биоцидных добавок приведет к таким проблемам, как повышенная агломерация или изменение характеристик горения, что существенно скажется на эффективности инактивации.

Повышение концентрации до 30 или 40 мас. % приводит к заметному снижению эффективности горения. Уменьшение тепловыделения и замедление скорости реакции препятствуют образованию достаточной концентрации облака продуктов реакции, что снижает общую эффективность инактивации микроорганизмов. Это подчеркивает важность баланса между энергетическими и биоцидными функциями при разработке нанотермитных систем.

## Выводы

Исследование посвящено оценке эффективности инактивации *Lactobacillus casei* с помощью нанотермитов на основе  $nAl + CuO$ , включающих различные биоцидные добавки: кристаллический йод (I<sub>2</sub>), йодоформ (CHI<sub>3</sub>) и оксид цинка (ZnO).

1. Обнаружено, что за 660 с большая часть продуктов реакции осела на стенки и дно экспериментальной камеры. Кроме того, частицы диаметром около 3–4 мкм и относительной массой 1–2% от первоначальной оставались во взвешенном состоянии в воздухе.

2. Эффективность CuO обусловлена его более высокой экзотермической реакцией с наноалюминием, что приводит к образованию плотного биоцидного аэрозольного облака. Повышенная температура сгорания и образование дополнительных промежуточных продуктов реакции (например, паров меди или ионов меди Cu<sup>2+</sup>) также способствуют инактивации микроорганизмов. Низкая степень эффективности Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MoO<sub>3</sub> связана с более низкими температурами реакции и, возможно, созданием меньшего количества биоцидных продуктов реакции, что приводит к минимальной инактивации. Максимальный эффект достигается при использовании нанотермитных систем, содержащих в своем составе в качестве окислителя оксид меди. Установлено, что индекс бактерицидной активности для образца, расположенного на расстоянии 125 мм от эпицентра взрыва, составляет 33%, 285 мм –

23%, 445 мм – 19%. Референтные системы с добавками оксида железа и молибдена, расположенные на расстоянии 125 мм от эпицентра взрыва, демонстрируют низкую эффективность ~ 9 и 3% соответственно.

3. Высокая эффективность инактивации при 20 мас. %  $I_2$  отражает оптимальный баланс газофазного образования продуктов реакции (например, паров  $I_2$  и HI), что играет ключевую роль в проникновении через клеточные стенки бактерий и их окислительном повреждении. Повышение концентрации  $I_2$  влияет на процесс горения, снижая температуру реакции и изменяя ее кинетику, тем самым снижая общую реакционную способность аэрозоля и уменьшая эффект инактивации. Установлено, что добавка  $I_2$  существенно влияет на эффективность инактивации по сравнению с референтной системой. Увеличение концентрации с 20 до 40% приводит к снижению индекса бактерицидной активности с 72 до 50% и с 39 до 26% при расстоянии 125 и 285 мм от эпицентра взрыва соответственно.

4.  $CH_3I$  образует комплексы с бактериальными белками и клеточными мембранами. При введении 20 мас. % образуется достаточное количество продуктов реакции, необходимое для инактивации *Lactobacillus casei*. Увеличение концентрации  $CH_3I$  снижает эффективность инактивации, нарушая температуру реакции, ограничивая испарение и общий бактерицидный потенциал. В результате реакций между  $CH_3I$  и другими побочными продуктами реакции могут образовываться дополнительные йодсодержащие виды (например, HI), которые повышают эффективность инактивации. Обнаружено, что введение 20 мас. %  $CH_3I$  обеспечивает максимальное значение индекса бактерицидной активности на уровне 73% при расстоянии, равном 125 мм. Стоит отметить, что увеличение концентрации  $CH_3I$  в смеси до 40% снижает значение индекса бактерицидной активности до 50%.

5. Введение 20 мас. % ZnO может генерировать АФК или высвобождать ионы  $Zn^{2+}$  во время горения. Увеличение концентрации ZnO непропорционально увеличивает образование АФК, если будет достигнут эффект насыщения, или пороговый эффект. Как и в случае с другими биоцидными добавками, инактивация уменьшается с расстоянием, поскольку аэрозольное облако быстро рассеивается. Установлено, что изменение концентрации оксида цинка не влияет на значение индекса бактерицидной активности в отличие от расстояния расположения образцов от эпицентра взрыва. На расстоянии 125 мм образцы показали максимальный эффект на уровне 78%, в то время как на расстоянии 285 и 445 мм значения индекса бактерицидной активности снижаются до 52 и 45% соответственно.

Таким образом, введение 20 мас. % биоцидной добавки обеспечивает оптимальный баланс для эффективной инактивации *Lactobacillus casei* при сохранении высоких энергетических характеристик, необходимых для создания облака аэрозоля. ZnO оказывает свое действие независимо от концентрации биоцидной добавки, но остается чувствительным к расстоянию. Эти результаты подчеркивают критическое взаимодействие между эффективностью горения, образованием продуктов реакции и химической природой биоцидных добавок.

**Список источников**

1. Baboli Z., Neisi N., Babaei A.A. et al. On the airborne transmission of SARS-CoV-2 and relationship with indoor conditions at a hospital // *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 261. Art. 118563.
2. Сакович Г.В., Комаров В.Ф., Ворожцов А.В. и др. Нейтрализация токсических веществ при террористических актах и техногенных катастрофах // *Известия вузов. Физика*. 2005. № 48 (S11). С. 109–115.
3. Zhao W., Wang X., Wang H. et al. Titanium enhanced ignition and combustion of Al/I<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mesoparticle composites // *Combustion Flame*. 2020. Vol. 212. P. 245–251.
4. Kotter L.N., Groven L.J. Boron carbide-based biocide compositions: A study of iodate particle size on combustion and iodine output // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2020. Vol. 45. P. 509–516.
5. Wu T., Hagen E., Wang H. et al. Achieving superior ignition and combustion performance of Al/I<sub>2</sub>O<sub>5</sub> biocidal nanoenergetic materials by CuO addition // *Combustion Flame*. 2024. Vol. 259. Art. 113190.
6. Kudryashova O., Sokolov S., Vorozhtsov A. Mathematical model of propagation of an aerosol created by an impulse method in space // *Materials*. 2023. Vol. 16. Art. 5701.
7. Al Hallak M., Verdier T., Bertron A. et al. Comparison of photocatalytic biocidal activity of TiO<sub>2</sub>, ZnO and Au/ZnO on *Escherichia coli* and on *Aspergillus niger* under light intensity close to real-life conditions // *Catalysts*. 2023. Vol. 13. Art. 1139.
8. Chang J., Zhao G., Zhao X. et al. New promises from an old friend: iodine-rich compounds as prospective energetic biocidal agents // *Accounts of Chemical Research Journal*. 2021. Vol. 54 (2). P. 332–343.
9. Dreizin E.L. Metal-based reactive nanomaterials // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2009. Vol. 35. Art. 141–167.
10. Khasainov B., Comet M., Veyssiere B., Spitzer D. Comparison of performance of fast-reacting nano-thermites and primary explosives // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2017. Vol. 42. P. 754–772.
11. Wu T., Zachariah M.R. Silver ferrite: a superior oxidizer for thermite-driven biocidal nanoenergetic materials // *RSC Advances*. 2019. Vol. 9 (4). P. 1831–1840.
12. Sullivan K.T., Wu C., Piekil N.W. et al. Synthesis and reactivity of nano-Ag<sub>2</sub>O as an oxidizer for energetic systems yielding antimicrobial products // *Combustion Flame*. 2013. Vol. 160. P. 438–446.
13. Zhou W., DeLisio J.B., Li X. et al. Persulfate salt as an oxidizer for biocidal energetic nano-thermites // *Journal of Materials Chemistry A*. 2015. Vol. 3. P. 11838–11846.
14. Wang H., Jian G., Zhou W. et al. Metal iodate-based energetic composites and their combustion and biocidal performance // *ACS Applied Materials & Interfaces Journal*. 2015. Vol. 7. P. 17363–17370.
15. Feng J., Jian G., Liu Q., Zachariah M.R. Passivated iodine pentoxide oxidizer for potential biocidal nanoenergetic applications // *ACS Applied Materials & Interfaces Journal*. 2013. Vol. 5. P. 8875–8880.
16. Wu T., Wang X., Zavalij P.Y. et al. Performance of iodine oxides/iodic acids as oxidizers in thermite systems // *Combustion Flame*. 2018. Vol. 191. P. 335–342.
17. Mulamba O., Hunt E.M., Pantoya M.L. Neutralizing bacterial spores using halogenated energetic reactions // *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. 2013. Vol. 18. P. 918–925.
18. Zhou W., Orr M.W., Lee V.T., Zachariah M.R. Synergistic effects of ultrafast heating and gaseous chlorine on the neutralization of bacterial spores // *Chemical Engineering Science*. 2016. Vol. 144. P. 39–47.
19. Tabit F.T., Buys E. The effects of wet heat treatment on the structural and chemical components of *Bacillus sporothermodurans* spores // *International Journal of Food Microbiology*. 2010. Vol. 140. P. 207–213.

20. Sullivan K.T., Piekielek N.W., Chowdhury S. et al. Ignition and combustion characteristics of nanoscale Al/AgIO<sub>3</sub>: A potential energetic biocidal system // *Combustion Science and Technology*. 2010. Vol. 183. P. 285–302.
21. Lerner M.I., Glazkova E.A., Lozhkomoev A.S. et al. Synthesis of Al nanoparticles and Al/AlN composite nanoparticles by electrical explosion of aluminum wires in argon and nitrogen // *Powder Technology*. 2016. Vol. 295. P. 307–314.
22. Ишматов А.Н., Ахмадеев И.Р., Ворожцов Б.И. и др. Лазерная измерительная установка для исследования высококонцентрированных жидкокапельных аэрозолей // *Датчики и системы*. 2011. № 11. С. 61–63.
23. Gant V.A., Wren M.W., Rollins M.S. et al. Three novel highly charged copper-based biocides: safety and efficacy against healthcare-associated organisms // *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*. 2007. Vol. 60 (2). С. 294–299.
24. Angelé-Martínez C., Nguyen K.V.T., Ameer F.S. et al. Reactive oxygen species generation by copper (II) oxide nanoparticles determined by DNA damage assays and EPR spectroscopy // *Nanotoxicology*. 2017. Vol. 11 (2). P. 278–288.
25. Naatz H., Lin S., Li R. et al. Safe-by-design CuO nanoparticles via Fe-doping, Cu–O bond length variation, and biological assessment in cells and zebrafish embryos // *ACS nano*. 2017. Vol. 11 (1). P. 501–515.
26. Durani P., Leaper D. Povidone-iodine: use in hand disinfection, skin preparation and antiseptic irrigation // *International Wound Journal*. 2008. Vol. 5 (3). P. 376–387.

### References

1. Baboli Z.; Neisi N.; Babaei A.A. et al. On the airborne transmission of SARS-CoV-2 and relationship with indoor conditions at a hospital. *Atmospheric Environment*. 2021, 261, 118563.
2. Sakovich G.V.; Kamarov V.F.; Vorozhtsov A.V. et al. Neutralization of toxic substances during terrorist acts and man-made disasters. *Physics*. 2005, 48, 109-115. (in Russian).
3. Zhao W.; Wang X.; Wang H. et al. Titanium enhanced ignition and combustion of Al/I<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mesoparticle composites. *Combustion Flame*. 2020, 212, 245-251.
4. Kotter L.N.; Groven L.J. Boron carbide-based biocide compositions: A study of iodate particle size on combustion and iodine output. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2020, 45, 509-516.
5. Wu T.; Hagen E.; Wang H. et al. Achieving superior ignition and combustion performance of Al/I<sub>2</sub>O<sub>5</sub> biocidal nanoenergetic materials by CuO addition. *Combustion Flame*. 2024, 259, 113190.
6. Kudryashova O.; Sokolov S.; Vorozhtsov A. Mathematical model of propagation of an aerosol created by an impulse method in space. *Materials*. 2023, 16, 5701.
7. Al Hallak M.; Verdier T.; Bertron A. et al. Comparison of photocatalytic biocidal activity of TiO<sub>2</sub>, ZnO and Au/ZnO on *Escherichia coli* and on *Aspergillus niger* under light intensity close to real-life conditions. *Catalysts*. 2023, 13, 1139.
8. Chang J.; Zhao G.; Zhao X. et al. New promises from an old friend: iodine-rich compounds as prospective energetic biocidal agents. *Accounts of Chemical Research Journal*. 2021, 54(2), 332-343.
9. Dreizin E.L. Metal-based reactive nanomaterials. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2009, 35, 141-167.
10. Khasainov B.; Comet M.; Veyssiere B.; Spitzer D. Comparison of performance of fast-reacting nano-thermites and primary explosives. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2017, 42, 754-772.
11. Wu T.; Zachariah M.R. Silver ferrite: a superior oxidizer for thermite-driven biocidal nanoenergetic materials. *RSC Advances*. 2019, 1831-1840.
12. Sullivan K.T.; Wu C.; Piekielek N.W. et al. Synthesis and re-activity of nano-Ag<sub>2</sub>O as an oxidizer for energetic systems yielding antimicrobial products. *Combustion Flame*. 2013, 160, 438-446.

13. Zhou W.; DeLisio J.B.; Li X. et al. Persulfate salt as an oxidizer for biocidal energetic nanothermites. *Journal of Materials Chemistry A*. 2015, 3, 11838-11846.
14. Wang H.; Jian G.; Zhou W. et al. Metal iodate-based energetic composites and their combustion and biocidal performance. *ACS Applied Materials & Interfaces Journal*. 2015, 7, 17363-17370.
15. Feng J.; Jian G.; Liu Q.; Zachariah M.R. Passivated iodine pentoxide oxidizer for potential biocidal nanoenergetic applications. *ACS Applied Materials & Interfaces Journal*. 2013, 5, 8875-8880.
16. Wu T.; Wang X.; Zavalij P.Y. et al. Performance of iodine oxides/iodic acids as oxidizers in thermite systems. *Combustion Flame*. 2018, 191, 335-342
17. Mulamba O.; Hunt E.M.; Pantoya M.L. Neutralizing bacterial spores using halogenated energetic reactions. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. 2013, 18, 918-925.
18. Zhou W.; Orr M.W.; Lee V.T.; Zachariah M.R. Synergistic effects of ultrafast heating and gaseous chlorine on the neutralization of bacterial spores. *Chemical Engineering Science*. 2016, 144, 39-47.
19. Tabit F.T.; Buys E. The effects of wet heat treatment on the structural and chemical components of *Bacillus sporothermodurans* spores. *International Journal of Food Microbiology*. 2010, 140, 207-213.
20. Sullivan K.T.; Piekiet N.W.; Chowdhury S. et al. Ignition and combustion characteristics of nanoscale Al/AgIO<sub>3</sub>: A potential energetic biocidal system. *Combustion Science and Technology*. 2010, 183, 285-302.
21. Lerner M.I.; Glazkova E.A.; Lozhkomoev A.S. et al. Synthesis of Al nanoparticles and Al/AlN composite nanoparticles by electrical explosion of aluminum wires in argon and nitrogen. *Powder Technology*. 2016, 295, 307-314.
22. Ishmatov A.N.; Akhmadeev I.R.; Vorozhtsov A.B. et al. Laser measurement unit for studies of high concentration liquid-drop aerosols. *Sensors and Systems*. 2011, 11, 61-63. (in Russian).
23. Gant V.A.; Wren M.W.; Rollins M.S. et al. Three novel highly charged copper-based biocides: safety and efficacy against healthcare-associated organisms. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*. 2007, 60(2), 294-299.
24. Angelé-Martínez C.; Nguyen K.V.T.; Ameer F.S. et al. Reactive oxygen species generation by copper (II) oxide nanoparticles determined by DNA damage assays and EPR spectroscopy. *Nanotoxicology*. 2017, 11(2), 278-288.
25. Naatz H.; Lin S.; Li, R. et al. Safe-by-design CuO nanoparticles via Fe-doping, Cu–O bond length variation, and biological assessment in cells and zebrafish embryos. *ACS nano*. 2017, 11(1), 501-515.
26. Durani P.; Leaper D. Povidone-iodine: use in hand disinfection, skin preparation and antiseptic irrigation. *International Wound Journal*. 2008, 5(3), 376-387.

**Сведения об авторах:**

**Соколов Сергей Дмитриевич** – младший научный сотрудник Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: sokolovsd95@yandex.ru

**Кудряшова Ольга Борисовна** – доцент, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (Бийск, Россия). E-mail: olgakudr@inbox.ru

**Нефедов Роман Андреевич** – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Томского государственного университета (Томск, Россия); научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (Бийск, Россия). E-mail: ronelf88@yandex.ru

**Ворожцов Александр Борисович** – доктор физико-математических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией высокоэнергетических и специальных материалов Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: abv1953@mail.ru

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

***Information about the authors:***

**Sokolov Sergei D.** – Junior Researcher, Laboratory of Metallurgy Nanotechnologies, Tomsk State University (Tomsk, Russia). E-mail: sokolovsd95@gmail.com

**Kudryashova Olga B.** – Associate Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Biysk, Russia). E-mail: olgakudr@inbox.ru

**Nefedov Roman A.** – Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, Tomsk State University (Tomsk, Russia); Researcher, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Biysk, Russia). E-mail: ronef88@yandex.ru

**Vorozhtsov Alexander B.** – Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Professor, Head of the Research Laboratory of High-Energy and Special Material, Tomsk State University (Tomsk, Russia). E-mail: abv1953@mail.ru

***Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.***

***The authors declare no conflicts of interests.***

*Статья поступила в редакцию 15.02.2025; принята к публикации 04.04.2025*

*The article was submitted 15.02.2025; accepted for publication 04.04.2025*