

Модульные защитные материалы, нейтрализующие токсины (фосфорорганические соединения и микотоксины) и проявляющие биоцидность к клеткам грамположительных и грамотрицательных бактерий

В.В. Завьялов¹, Н.В. Завьялова¹, В.И. Холстов¹, В.А. Ковтун¹, Г.А. Фролов², В.К. Гореленков³, И.В. Лягин⁴, Н.А. Степанов⁴, Е.Н. Ефременко⁴

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр» Министерства обороны Российской Федерации, 111024, Российская Федерация, г. Москва, проезд Энтузиастов, д. 19

² ООО «Научно-исследовательский институт эластомерных материалов и изделий», Российская Федерация, 111024, г. Москва, Перовский проезд, д. 2, стр. 1

³ НИПУ стали и сплавов, Российская Федерация, 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, 119234, Российская Федерация, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3

Поступила 12 июля 2022 г. Принята к публикации 23 сентября 2022 г.

Ранее нами был разработан принцип построения модульных материалов с заданными свойствами. *Цель работы* – изучение возможности придания модульным материалам (тканям) противохимических и бактерицидных защитных свойств. Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали возможность комбинирования модулей, содержащих карбоксилаты металлов, наночастицы металлов и ферментные наноконплексы для множественной функционализации одного и того же волокнистого материала и/или волокна. Волокнистые материалы в результате последовательного нанесения на их поверхность модульных рецептур, содержащих наноразмерные металлы и ферментные наноконплексы, приобретали биоцидные и противохимические защитные свойства. Установлено, что распылительный способ нанесения модулей на поверхность исследуемых материалов является более универсальным, так как аэрозольное нанесение позволяет нанести жидкость на любой смачиваемый материал равномерным поверхностным слоем. Бактерицидные свойства зависели от выбранного способа функционализации волокнистого материала. Полученные модульные волокнистые материалы также показали хорошие биокаталитические характеристики в отношении различных фосфорорганических соединений, микотоксинов. Продолжительность действия эффекта самодезинфекции и самодегазации волокнистых материалов, обработанных модульными рецептурами, содержащими наноразмерные металлы и ферментные наноконплексы, составляет как минимум 230 сут. Разработанные материалы и способ их получения могут быть использованы как в получении совершенно новых тканей для средств индивидуальной защиты, имеющих определенное целевое назначение, так и в выработке новых организационно-технических и методических подходов к обеспечению индивидуальной защиты личного состава Вооруженных Сил, иных войск Российской Федерации.

Ключевые слова: бактерицидные свойства материалов; детоксификация; защитные композиционные ткани; наноразмерные металлические частицы; наноразмерные ферментные комплексы; специальные свойства модульных материалов; токсины.

Библиографическое описание: Завьялов В.В., Завьялова Н.В., Холстов В.И., Ковтун В.А.,

Фролов Г.А., Гореленков В.К., Лягин И.В., Степанов Н.А., Ефременко Е.Н. Модульные защитные материалы, нейтрализующие токсины (фосфорорганические соединения и микотоксины) и проявляющие биоцидность к клеткам грамположительных и грамотрицательных бактерий // Вестник РХБ защиты. 2022. Т.6. № 3, С. 229–242. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-3-229-242>

В предыдущих наших публикациях рассмотрены принципы построения модульных защитных материалов с заданными свойствами и механизмы нанесения модулей, обеспечивающих нейтрализацию фосфорорганических соединений, токсинов и клеток микроорганизмов. Было показано, что модульные защитные материалы с заданными свойствами могут быть получены при нанесении на тканевую унифицированную платформу модульных защитных рецептур. Они представляют собой металлоорганические композиты с введенными в них наноразмерными металлическими комплексами, которые наносятся непосредственно на тканевую унифицированную платформу и придают модульным материалам свойство бактерицидности. Полученные композиты становятся новой платформой, которая имеет высокую стабильность и обладает бактерицидностью [1–5].

Для получения модульных материалов с бактерицидными свойствами разработаны нанодисперсные системы на основе металлов цинка (Zn) и тантала (Ta), обеспечивающие биоцидную активность и максимально сохраняющие ее в самом волокнистом материале. Бактерицидные свойства также зависели от выбранного способа нанесения модульных защитных рецептур на волокнистый материал [6–20].

Для получения нанодисперсных систем на основе металлов Zn и Ta и придания исследованным волокнистым материалам бактерицидных свойств был использован электрохимический метод при дуговом разряде в жидкой среде (воде или органическом растворителе), сопровождающийся коррозией металлического электрода и образованием металлических наночастиц [6, 21].

Для создания композиционных материалов и тканей со специальными заданными свойствами, такими как самоочистление (самодегазация), использовались модули, как специальные химически нейтральные – «Адгезионный», «Адсорбционный» и «Абсорбционный», так и химически активные, такие как «Дегазирующий» («Биохимический» и «Химический»). Их наносили на тканевую унифицированную платформу, уже обработанную металлоорганическими композитами, с введенными в них наноразмерными металлическими комплексами, обеспечивающими

бактерицидность. При этом соблюдались определенные требования нанесения количества и последовательности, не позволяющие нейтрализовать или вывести из рабочего состояния специфические модули и не мешающие другим модулям осуществлять свои функции [2, 3, 21].

Кроме того, ранее в работах [20–30] был предложен состав, изучены свойства и механизмы действия самодегазирующихся материалов, которые стали прообразом специальных модулей, как химически нейтральных, так и химически активных. Результаты этих исследований позволили создать модульные защитные материалы с заданными свойствами.

Цель работы – изучение возможности придания модульным материалам (тканям) противохимических и бактерицидных защитных свойств.

Определение влияния «Адгезионного» («Абсорбционного») модуля на работу «Бактерицидного» модуля. Как отмечалось ранее [3], на тканевую унифицированную платформу, в качестве которой применяется ткань параарамидная (волокно «Русар»), первоначально наносится модуль «Адгезионный». Он представляет собой карбоксилаты металлов, в которых в качестве неполярной части молекулы используется природная карбоновая кислота с высоким гидрофобным взаимодействием, а в качестве металлов могут быть применены: алюминий (Al), железо (Fe), стронций (Sr), барий (Ba), марганец (Mn), медь (Cu).

Поскольку «Адгезионный» модуль является универсальным абсорбентом для паров органических веществ, он способен повышать адгезионное крепление на поверхности ткани (волокон) других модулей и отвечать за захват и удерживание частиц поражающих агентов различной природы. Для выявления влияния «Адгезионного» модуля на функционирование «Бактерицидного» модуля, который наносится после «Адгезионного», были проведены эксперименты по определению бактерицидных свойств водных экстрактов из композитного материала (М), обработанного карбоксилатами различных металлов и спиртозолом Та (этиловый спирт). Исследование проводилось с использованием суспензий клеток грамотрицательных бактерий *Escherichia coli* и грамположительных бактерий *Bacillus cereus* на протяжении 48 часов. Полученные результаты исследования представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Изменение концентрации суспензионных клеток *E. coli* (КОЕ/мл) в течение 24 ч при экспонировании водного экстракта из анализируемого образца композитного материала М*, предварительно обработанного карбоксилатом указанного металла и спиртозолом Та (этилового спирта) (данные авторов)

Анализируемый образец	Время экспонирования клеток <i>E. coli</i> с водным экстрактом из анализируемого образца композитного материала, обработанного карбоксилатом указанного металла и спиртозолом Та (этилового спирта)				
	5 мин	15 мин	30 мин	3 ч	24 ч
Контроль (вода)	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁶
Контроль (материал)	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷
Материал с нанесенным карбоксилатом алюминия(III)	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁵	Единичные клетки	0
Материал с карбоксилатом железа(II)	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁶	0	0
Материал с карбоксилатом стронция(II)	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁶	10 ⁵	0
Материал с карбоксилатом бария(II)	10 ⁷	10	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁶
Материал с карбоксилатом марганца(II)	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁶	10 ⁷	0
Материал с карбоксилатом меди(II)	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	1,8×10 ⁴	0

Примечание:
*Композитный материал (М) – четырехслойный материал с внешними упрочняющими слоями из вискозно-лавсановых основовазанных тканей и внутренними неткаными материалами типа «Спанбонд», между которыми внесен суперсорбент «Влагосорб» (фракция S) в концентрации 1 г/м². Все слои были скреплены термоклеевым дублированием [7].

Как следует из представленных данных, водные экстракты из композитного материала М, предварительно обработанного карбоксилатами различных металлов (модуль «Адгезионный») и спиртозолом Та (этилового спирта), использованного в качестве модуля «Бактерицидного», оказывали бактерицидное действие по отношению к суспензиям разных бактериальных культур (*E. coli* и *B. cereus*). При этом в отношении клеток грамотрицательных бактерий эффект наступал значительно быстрее. При этом водные экстракты из исследуемого композитного материала М, обработанного карбоксилатом алюминия или карбоксилатом железа и спиртозолом Та при экспонировании клеток в этих экстрактах в течение 3 и 24 часов, приводили к 100 % гибели грамотрицательных бактерий, что свидетельствовало о том, что модуль «Адгезионный» не влияет на работу модуля «Бактерицидного». Аналогичный результат для клеток грамположительных бактерий достигался спустя еще одни сутки.

Было установлено, что при экспонировании в течение 24 часов все карбоксилаты исследованных металлов, за исключением кар-

боксилата бария, с примененным спиртозолом Та (этиловый спирт), полностью уничтожали клетки грамотрицательных бактерий *E. coli*.

Результаты, приведенные в таблице 2, свидетельствуют о том, что грамположительные бактерии *B. cereus*, по сравнению с грамотрицательными бактериями *E. coli* являются более устойчивыми к действию спиртозола Та (этиловый спирт). 100 % гибель клеток этих бактерий наблюдалась только через 48 часов экспонирования в присутствии водного экстракта композитного материала М, на поверхность которого предварительно были нанесены карбоксилаты металлов и спиртозоль Та (этиловый спирт).

Необходимо также отметить, что наносить карбоксилаты различных металлов, спиртозоли и гидрозоли Та на исследуемые волокнистые материалы возможно различными методами в зависимости от впитывающих свойств материалов, применяемых в качестве основной платформы.

Для хорошо впитывающих материалов можно использовать распыление жидкости путем ее инъекции из капилляра воздухом, со-

Таблица 2 – Изменение концентрации суспензионных клеток *Bacillus cereus* (КОЕ/мл) в течении 48 ч при экспонировании водного экстракта из анализируемого образца композитного материала М, предварительно обработанного карбоксилатом указанного металла и спиртозолом Та (этилового спирта) (данные авторов)

Анализируемый образец	Концентрация клеток <i>Bacillus cereus</i> при экспонировании с водным экстрактом из анализируемого образца композитного материала, обработанного карбоксилатом указанного металла и спиртозолом Та (этилового спирта) в течение					
	5 мин	15 мин	30 мин	3 ч	24 ч	48 ч
Контроль (вода)	10^7	10^7	10^7	10^7	10^7	10^7
Контроль (материал)	10^7	10^7	10^7	$1,8 \times 10^4$	$1,5 \times 10^4$	$1,5 \times 10^4$
Материал с нанесенным карбоксилатом алюминия(III)	10^7	10^7	10^5	$4,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^2$	0
Материал с карбоксилатом железа(II)	$2,9 \times 10^4$	$9,0 \times 10^3$	$6,0 \times 10^3$	$5,0 \times 10^3$	$5,0 \times 10^2$	0
Материал с карбоксилатом стронция(II)	10^7	10^7	$1,2 \times 10^4$	$8,0 \times 10^3$	$5,0 \times 10^2$	0
Материал с карбоксилатом бария(II)	10^7	10^7	$5,0 \times 10^3$	$2,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^3$	0
Материал с карбоксилатом марганца(II)	10^7	10^7	$7,0 \times 10^3$	$4,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^3$	0
Материал с карбоксилатом меди(II)	10^7	10^7	$4,0 \times 10^3$	$4,0 \times 10^3$	$6,0 \times 10^3$	0

здание факела распыла аэрозоля и проведение обработки поверхности материала с установленной нормой расходов. Этот распылительный способ позволяет получить тонкую пленку на поверхности. Также возможно нанести жидкость тонкой струйкой или капельным способом до состояния полного впитывания жидкости. При полном впитывании в волокнистые материал, происходит равномерное распределение нанодисперсной фазы по всему объему материала. В таких случаях волокнистый материал можно также просто погружать в раствор с нанодисперсными частицами, с последующей стадией высушивания материала.

Экспериментально было определено, что для невпитывающих волокнистых материалов необходимо использовать только распылительный способ создания тонкой пленки. Распылительный способ нанесения модулей на поверхность исследуемых материалов является более универсальным, так как аэрозольное нанесение позволяет нанести жидкость на любой смачиваемый материал равномерным поверхностным слоем. Однако не только условия, но и кратность нанесения «Бактерицидного» модуля на тканевую платформу являются важными для свойств, проявляемых получаемым материалом.

Влияние кратности нанесения «Бактерицидного» модуля на уровень внутрикле-

точной концентрации АТФ в суспензиях грамотрицательных *E. coli* и грамположительных *B. subtilis* клеток бактерий, нанесенных на поверхность композитного материала, предварительно обработанного карбоксилатом меди или марганца. С использованием высокоспецифичного и чувствительного люциферин-люциферазного биoluminesцентного метода определения концентрации аденозинтрифосфата (АТФ) [31] было исследовано влияние кратности нанесения спиртозоля Та на остаточный уровень внутриклеточного АТФ в клетках грамотрицательных и грамположительных бактерий, экспонированных на поверхности композитного материала М, на которую предварительно был нанесен модуль «Адгезионный», в качестве которого применялся карбоксилат меди (Cu) или марганца (Mn) (рисунок 1).

Было установлено, что покрытие исследуемого материала модулем «Адгезионный» (карбоксилатом Cu или Mn) само по себе привносит определенный бактерицидный эффект, который только усиливается при нанесении поверх них модуля «Бактерицидный» (спиртозоль Та). По отношению к клеткам грамотрицательных *E. coli* максимальный эффект наблюдался уже при двух-трех-кратном нанесении наночастиц Та на материал с модулем «Адгезионный» (карбоксилат Cu).

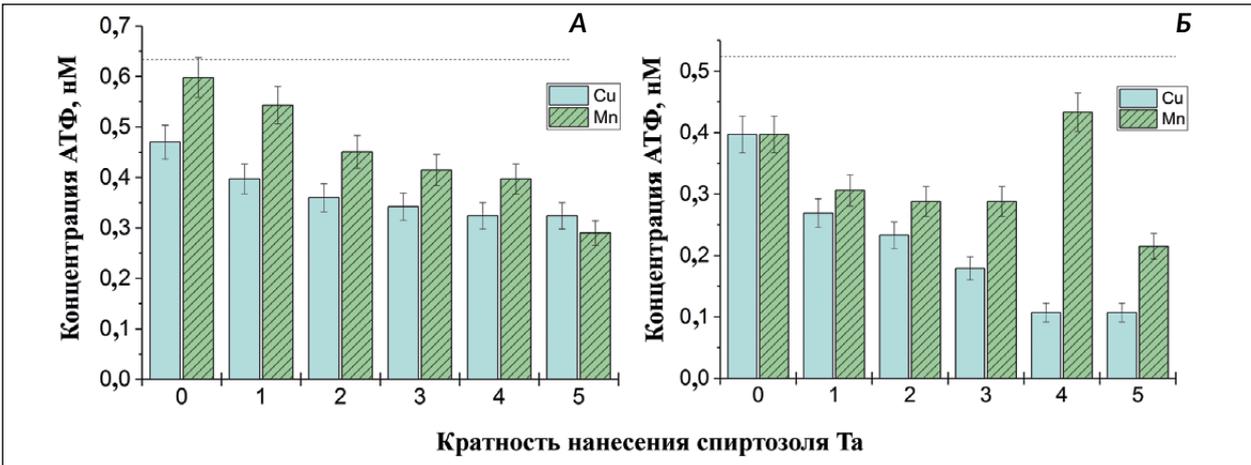


Рисунок 1 – Влияние кратности нанесения спиртозоля Та (этилового спирта) на уровень внутриклеточной концентрации АТФ в клетках бактерий *E. coli* (А) и *Bacillus subtilis* (Б), экспонированных на поверхности композитного материала, предварительно покрытого карбоксилатом Си или Мп. Уровень АТФ при нанесении клеток на исходный композитный материал отмечен пунктирной линией (данные авторов)

Чтобы достичь подобного эффекта с модулем «Адгезионный», в котором применялся карбоксилат Мп, потребовалось не менее 5-кратного аналогичного нанесения. По отношению к клеткам грамположительных *B. subtilis*, как оказалось, требуется не менее 4-кратного нанесения карбоксилата Си в качестве «Адгезионного» модуля на материал, и более чем 5-кратного нанесения модуля «Бактерицидного» (спиртозоль Та) в случае с модулем «Адгезионный», где применялся карбоксилат Мп.

Таким образом, для повышения эффективности действия бактерицидных свойств волокнистого материала и снижения кратности его обработки представляется целесообразным увеличение концентрации металла Та в исходном спиртозоле, используемого для нанесения на материал. Кроме того, модуль «Адгезионный» в виде карбоксилата Си показал лучшие результаты в модификации исследованного волокнистого материала по сравнению с карбоксилатом Мп.

Определение возможности восстановления бактерицидной активности волокнистых материалов с нанесенными на их поверхность модулями «Адгезионный» и «Бактерицидный». Исследование возможности восстановления бактерицидных свойств волокнистого материала было проведено на примере материала № 1 [20], на поверхность которого были нанесены модуль «Адгезионный» (карбоксилат Си) и модуль «Бактерицидный» (спиртозоль Та). Далее волокнистый материал был контаминирован клетками грамотрицательных бактерий *E. coli* и клетками грамположительных бактерий *Bacillus subtilis*. После этого (через 30 минут) материал был промыт

дистиллированной водой, и была определена остаточная бактерицидная активность материала в отношении аналогичных суспензионных клеток грамотрицательных и грамположительных бактерий *E. coli* и *B. subtilis* соответственно (рисунок 2). На промытые образцы материала были нанесены дополнительные концентрации спиртозоля Та, то есть проведено восстановление биоцидных свойств) и определена итоговая биоцидная активность материала. Полученные результаты представлены на рисунке 2.

Было установлено, что остаточной концентрации тантала после отмытки материала от наночастиц металла недостаточно, чтобы вызвать гибель бактерий на желаемом уровне (после промывки даже с расходом 1 мл/см² оставалось более 35–50 % жизнеспособных клеток на самом материале), а вот дополнительное нанесение новой порции спиртозоля Та на «отмытый» материал приводило к явному кумулятивному антибактериальному эффекту. В результате такой повторной обработки материал становился даже более эффективным (более бактерицидным) в отношении грамотрицательных *E. coli* и грамположительных *B. subtilis* клеток бактерий.

Таким образом, была показана возможность восстановления, как минимум, первоначальной бактерицидной активности волокнистых материалов после обработки их водой. Такая информация дает возможность полагать, что такой материал может быть пригодным для получения изделий, обладающих бактерицидностью, которые могут быть подвержены стирке с последующим восстановлением их бактерицидных свойств.

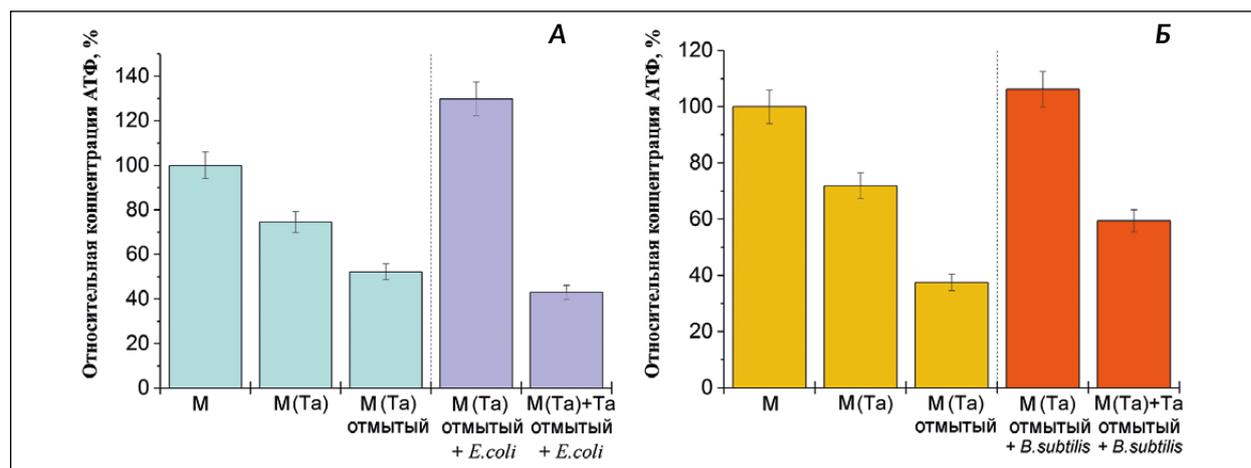


Рисунок 2 – Бактерицидная активность волокнистого материала № 1 (М) по отношению к клеткам *E. coli* (А) и *B. subtilis* (Б) при экспонировании в течение 30 мин с повторной контаминацией материала при дополнительном нанесении спиртозоля Та и без него (данные авторов)

Общие закономерности в изменении свойств волокнистых материалов в результате нанесения модульных рецептур, содержащих наноразмерные металлы и ферментные наноконплексы, обеспечивающие биоцидные и противохимические защитные свойства. В результате нанесения модульных рецептур, содержащих наноразмерные металлы и ферментные наноконплексы, обеспечивающие биоцидные и противохимические защитные свойства, изменяются и свойства самих волокнистых материалов. Так, нанесение металлоорганических покрытий приводит к образованию пленки на поверхности волокнистого материала. Для избежания проблемы агрегации наночастиц, которая приводит к неравномерному их распределению на поверхности материала, был проведен предварительный подбор как металла, так и самого волокнистого материала. Кроме того, для гарантированного бактерицидного действия материала была определена норма наносимых количеств наночастиц металла. Было показано, что эти нормы зависят от количества, наносимого на эту же ткань гидролитического фермента, в составе ферментных наноконплексов. Установлено, что полученные модульные волокнистые материалы проявляли хорошие биокаталитические характеристики в отношении различных фосфорорганических соединений, микотоксинов и обладали бактерицидностью за счет наличия на их поверхности металлических наночастиц [4].

Далее было исследовано комбинирование модуля «Бактерицидный» – металлсодержащих наночастиц Та или Zn с модулем «Дегазирующий» («Биохимический») – ферментом $\text{His}_6\text{-ORH}$, который был стабилизирован в составе фермент-полиэлектrolитного

наноконплекса с полиглутаминовой кислотой (ПЭГ-ПГК₅₀) [22, 27].

Для нанесения модульных рецептур на волокнистые материалы были отобраны образцы четырех различных материалов (№ 1, 2, 3 и 4), свойства которых были недавно описаны [21]. Далее на эти материалы наносили модуль «Адгезионный» (карбоксилат меди или цинка), модуль «Бактерицидный» – наночастицы Та или Zn в этаноле и модуль «Дегазирующий» («Биохимический») – фермент $\text{His}_6\text{-ORH}$ в составе полиэлектролитного наноконплекса ПЭГ/ПГК₅₀. Полученные в такой последовательности функционализированные волокнистые материалы сравнивали по их эффективности с теми, что были модифицированы карбоксилатом Cu и наночастицами металлов [20, 21]. На рисунке 3 представлены результаты сравнения.

Было показано, с течением времени даже на образцах самих волокнистых материалов без нанесения модулей наблюдалась гибель клеток бактерий и *E. coli* и *B. subtilis*. Однако нанесение модулей «Адгезионный», «Бактерицидный» и «Дегазирующий» («Биохимический»), в особенности, комбинация двух модулей – частиц тантала и фермента $\text{His}_6\text{-ORH}$ в составе полиэлектролитного конплекса с полиаминокислотой ускоряла гибель клеток микроорганизмов и привела к деконтаминации разных материалов.

В результате к 24 часу происходила практически полная гибель клеток, в то время как на контрольных образцах сохранилось от 20 до 50 % клеток бактерий. Максимальная степень элиминирования (рисунок 3) была в случае использования материалов 2, 3 и 4 в качестве тканевой унифицированной платформы, которую функционализировали комбинацией модулей, содержащих наночастицы тантала или цинка.

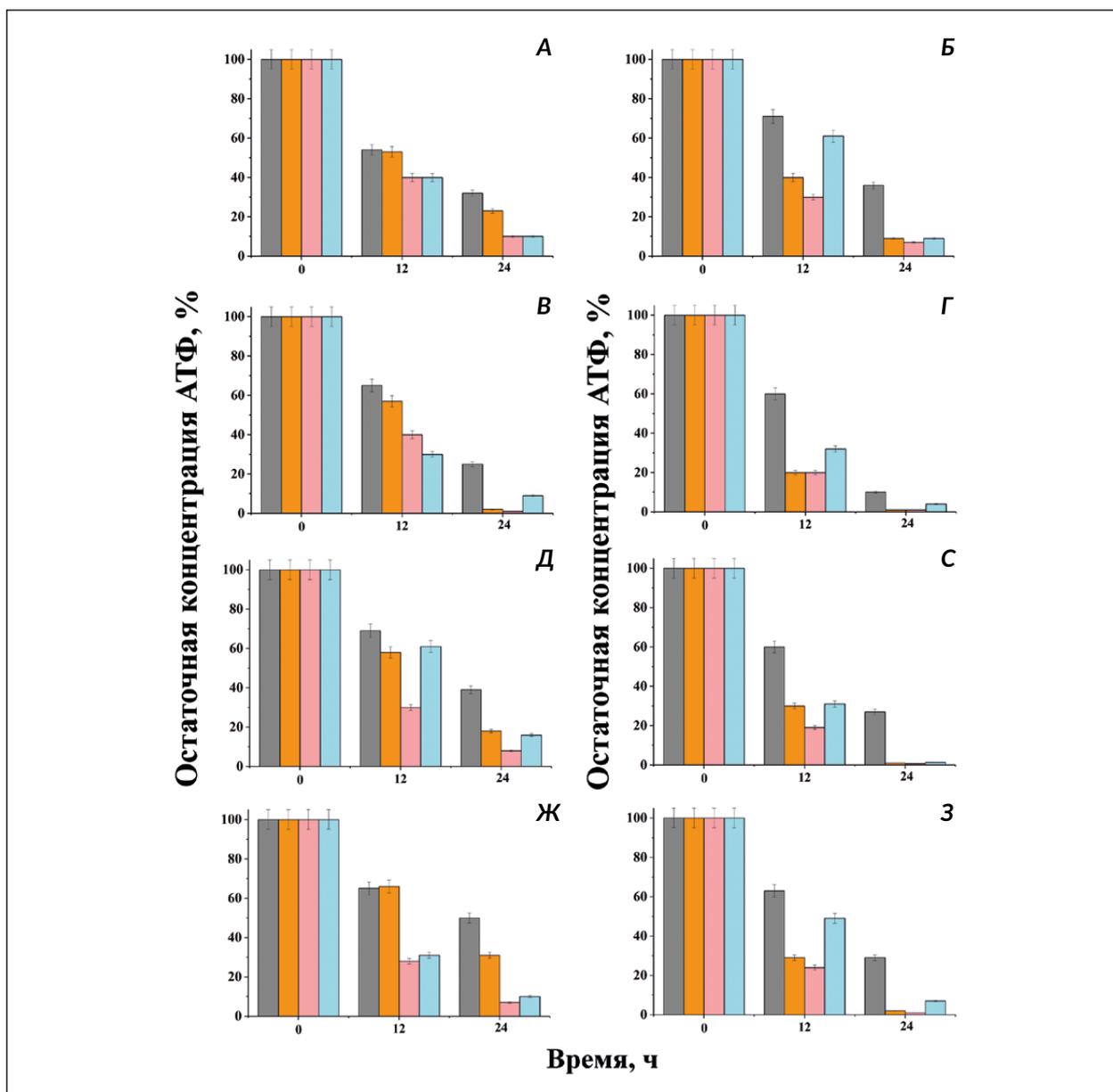


Рисунок 3 – Кинетика изменения остаточной внутриклеточной АТФ в клетках бактерий *B. subtilis* (А, В, Д, Ж) и *E. coli* (Б, Г, Е, З) в ходе их экспонирования на различных волокнистых материалах № 1 (А, Б), 2 (В, Г), 3 (Д, Е) и 4 (Ж, З), обработанных карбоксилатом меди, наночастицами Та, комплексами His₆-ОРН/ПЭГ-ПГК₅₀ (в карбонатном буфере рН 10,5) или их комбинациями. Величину АТФ в клетках в исходный момент времени принимали за 100%. Обозначения: ■ – контроль; ■ – наночастицы Та; ■ – наночастицы Та + His₆-ОРН/ПЭГ-ПГК₅₀; ■ – карбоксилат Си + наночастицы Та + His₆-ОРН/ПЭГ-ПГК₅₀ (данные авторов)

При этом чуть большую эффективность в отношении исследованных бактериальных штаммов демонстрировали материалы, для функционализации которых использовались именно наночастицы Та, несмотря на то, что и Та, и Zn наносили в количествах, соответствующих установленным уровням минимальных ингибирующих концентраций [4, 20].

Что же касается противохимических защитных свойств исследованных материалов,

то наблюдалась зависимость остаточной активности фермента His₆-ОРН преимущественно от типа волокнистого материала. При этом именно ферменту His₆-ОРН в составе создаваемых материалов отводилась основная задача по биохимической детоксификации разных возможных токсинов (фосфорорганических соединений и микотоксинов), гидролиз которых для данного фермента хорошо изучен в разных средах [23–30].

Было установлено, что использование материалов № 2, 3 и 4 было предпочтительнее для проявления каталитической активности ферментом His_6 -ОРН.

Как и ранее, для проявления бактерицидной активности волокнистые материалы, функционализированные тремя модулями «Адгезионным», «Бактерицидным» и «Дегазирующим» («Биохимическим»), содержащими карбоксилат Cu , наночастицы металла Ta и комплекс His_6 -ОРН/ПЭГ-ПГК₅₀, демонстрировали хорошее сохранение ферментативной активности. Так для материала № 3 эта активность составляла 74 %, для материала № 2 активность фермента составляла ~60 %, а для материала № 4 – 33 %. В случае использования наночастиц Zn вместо наночастиц Ta в «Бактерицидном» модуле активность фермента составляла от 30 до 40 % для материалов № 2, 3 и 4 соответственно.

Что же касается противохимических защитных свойств исследованных материалов, то наблюдалась зависимость остаточной активности фермента His_6 -ОРН преимущественно от типа волокнистого материала. Было показано, что использование материалов № 2, 3 и 4 является предпочтительным для максимизации активности фермента His_6 -ОРН в отношении его субстратов.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования успешно продемонстрировали возможность комбинирования модулей, содержащих карбоксилаты металлов, наночастицы металлов и ферментные наноконплексы для множественной функционализации одного и того же волокнистого материала и/или волокна. Волокнистые материалы в результате последовательного нанесения на их поверхность модульных рецептур, содержащих карбоксилаты металлов, наноразмерные металлы и ферментные наноконплексы, приобретали биоцидные и противохимические защитные свойства.

Изучение продолжительности действия самодезинфекции и химического самоочистения волокнистых материалов, обработанных модульными рецептурами, содержащими наноразмерные металлы и ферментные наноконплексы. Для изучения времени сохранения свойств самодезинфекции и химического самоочистения у волокнистых материалов, на поверхность которых были нанесены модули «Адгезионный», «Бактерицидный» и «Дегазирующий» («Биохимический»), содержащие соответственно, карбоксилат Cu , наночастицы металла Ta и комплекс His_6 -ОРН/ПЭГ-ПГК₅₀. В эксперименте использовались образцы материалов № 1, 2, 3 и 4, которые хранились при температуре 8–10 °С в обычном холодильнике в течение 251 суток. Бактерицидную активность

контролировали в отношении клеток грамотрицательных бактерий *E. coli*.

Результаты полученных исследований показали, что в большинстве случаев биоцидная активность материалов сохраняется или даже слегка улучшается в течение, как минимум, 230 суток. Было установлено, что в течение первых двух месяцев проводимого исследования в ряде случаев происходило заметное улучшение бактерицидного действия функционализированных волокнистых материалов. Так, материалы, на которые были нанесены модули «Адгезионный» и «Бактерицидный», содержащие карбоксилат Cu и наночастицы металла Ta без нанесенного модуля «Дегазирующий» («Биохимический»), то есть без ферментного комплекса His_6 -ОРН/ПЭГ-ПГК₅₀, оказались сопоставимыми по своим характеристикам с образцами, в которых был нанесен и модуль «Дегазирующий» («Биохимический»). Такой эффект мог возникнуть в результате контаминации микроорганизмами и/или продуктами их деградации, образующимися в ходе хранения или за счет химических и/или структурных превращений функционализированных волокнистых материалов.

Кроме того, такие же волокнистые материалы, на которые были нанесены модули «Адгезионный», «Бактерицидный» и «Дегазирующий» («Биохимический»), содержащие карбоксилат Cu , наночастицы металла Ta , а также ферментный комплекс His_6 -ОРН/ПЭГ-ПГК₅₀ и хранившиеся в течение длительного времени, были исследованы в реакциях гидролиза фосфорорганических соединений. Интересно, что, как и в случае с антибактериальной активностью, гидролитическая активность ферментного комплекса в составе волокнистого материала не изменялась значимо в течение 230 суток хранения. Снижение активности составляло менее 5–10 % от исходно нанесенной.

Таким образом, изучение продолжительности действия самодезинфекции и химического самоочистения волокнистых материалов, обработанных модульными рецептурами, содержащими наноразмерные металлы и ферментные наноконплексы, показало, что в большинстве случаев и антибактериальная, и гидролитическая активность сохраняются на высоком уровне в течение, как минимум, 8 месяцев.

Были проведены исследования по определению ингибиторной способности элюатов с волокнистых материалов, функционализированных карбоксилатами металлов, наночастицами металлов и ферментными комплексами в отношении индивидуальных чувствительных ферментов, а именно: рекомбинантной люциферазы светляков, ацетил- и бутирилхолинэстеразы из электрического угря и сыворотки

крови лошади, соответственно. Ни в одном из случаев установить ингибирование ферментативной активности достоверно не удалось.

При использовании еще более чувствительной системы выявления токсичности, основанной на использовании клеток фотобактерий *Photobacterium* sp. [20] было показано, что предел обнаружения такой биоаналитической системы составляет примерно 10 и 150 нг/мл для наночастиц Ta и Zn, соответственно [8, 9]. Используя указанный метод, были проанализированы образцы волокнистых материалов № 2–4, функционализированные наночастицами разных металлов, ферментами или их комбинациями. Полученные результаты свидетельствовали о том, что указанные волокнистые материалы не токсичны (при pH 7,5–10,5).

Таким образом, на основании проведенных исследований по оценке физиолого-гигиенических свойств самодегазирующихся и самоочищающихся волокнистых материалов можно заключить, что образцы волокнистых материалов № 2–4, функционализированные наночастицами металлов, ферментным гидролитическим комплексом или их комбинациями не могут оказывать негативного физиолого-гигиенического воздействия на организм человека при использовании защитных костюмов, изготовленных из данных материалов. При этом лучшие результаты могут быть получены при комбинировании наночастиц биологически инертного тантала и стабилизированного фермента в полиэлектролитном комплексе, который, как установлено, не вызывает негативных иммунных реакций человека даже при попадании их в кровоток¹[27].

Заключение

Изучение возможности придания материалам (тканям) противохимических и бактерицидных защитных свойств, за счет нанесения на тканевую унифицированную платформу модульных рецептур, содержащих наноразмерные металлы и наноразмерные ферментные комплексы, изучение особенностей и характеристик полученных материалов, а также способов нанесения на ткани модульных рецептур показало, что:

- модульные защитные материалы с заданными свойствами могут быть получены при нанесении на тканевую унифицированную платформу модульных защитных рецептур;
- модульные защитные рецептуры представляют собой металлоорганические композиты, с введенными в них наноразмерными

металлическими комплексами и наноразмерными ферментными комплексами, которые наносятся непосредственно на тканевую унифицированную платформу и придают модульным защитным материалам свойства бактерицидности и химического самоочищения (самодегазации);

- для создания композиционных материалов и тканей со специально заданными свойствами бактерицидности и химического самоочищения (самодегазации) используются модули как специальные химически нейтральные – «Адгезионный», «Адсорбционный» и «Абсорбционный», так и химически активные, такие как «Бактерицидный», «Дегазирующий» («Биохимический» и «Химический»);

- водные экстракты из композитного материала М, обработанного карбоксилатами различных металлов (модуль «Адгезионный») и спиртозолом Та (этилового спирта) (модуль «Бактерицидный»), оказывали 100 % бактерицидное действие по отношению к суспензиям грамотрицательных *E. coli* и грамположительных *B. cereus* бактериальных клеток, что свидетельствовало о том, что модуль «Адгезионный» не влияет на работу модуля «Бактерицидного»;

- распылительный способ нанесения модулей на поверхность исследуемых материалов является более универсальным, так как аэрозольное нанесение позволяет нанести жидкость на любой смачиваемый материал равномерным поверхностным слоем;

- для повышения эффективности действия и снижения кратности обработки, а также для усиления бактерицидности волокон или волокнистых материалов представляется целесообразным использовать большие концентрации металла Та в исходном спиртозоле;

- для гарантированного бактерицидного действия материала была определена норма наносимых концентраций наночастиц металла, а также установлено, что ее размер зависит от количества, наносимого на эту же ткань гидролитического фермента, содержащегося в составе ферментных наноконплексов;

- бактерицидные свойства зависели от выбранного способа функционализации волокнистого материала;

- полученные модульные волокнистые материалы проявляли хорошие биокаталитические характеристики в отношении различных фосфорорганических соединений, микотоксинов и обладали бактерицидностью за счет наличия на их поверхности металлических наночастиц;

¹ Завьялова Н.В., Ефременко Е.Н., Гореленков В.К., Фролов Г.А., Завьялов В.В., Лягин И.В., Степанов Н.А. Направленная множественная функционализация волокнистых материалов для придания им специальных биозащитных свойств // Заключительный отчет по гранту РФФИ № 18-29-17069. М.: 27 ИЦ МО РФ. 2022 г. Инв. № 6299. С. 184.

- проведенные экспериментальные исследования успешно продемонстрировали возможность комбинирования модулей, содержащих карбоксилаты металлов, наночастицы металлов и ферментные наноконплексы для множественной функционализации одного и того же волокнистого материала и/или волокна. Волокнистые материалы в результате последовательного нанесения на их поверхность модульных рецептур, содержащих наноразмерные металлы и ферментные наноконплексы, приобретали биоцидные и противохимические защитные свойства;

- продолжительность действия эффекта самодезинфекции и самодегазации волокнистых материалов, обработанных модульными рецептурами, содержащими наноразмерные металлы и ферментные наноконплексы, составляет как минимум 230 суток;

- экспериментально доказана возможность придания широкому спектру материалов (тканей) заданных противохимических и бак-

терицидных защитных свойств посредством осуществления их функциолизации за счет нанесения на тканевую унифицированную платформу модульных рецептур, содержащих наноразмерные металлы и наноразмерные ферментные комплексы. Это может быть использовано как в получении совершенно новых тканей для средств индивидуальной защиты, имеющих определенное целевое назначение, так и в выработке новых организационно-технических и методических подходов к обеспечению индивидуальной защиты личного состава Вооруженных Сил, иных войск, воинских формирований и органов, а также населения Российской Федерации за счет перехода к практике функционализации, согласно описанному выше порядку, повседневного, в том числе полевого, обмундирования и повседневной одежды в качестве защитных вариантов, что может позволить не создавать заранее масштабные запасы специальных защитных костюмов и специальных защитных материалов.

Вклад авторов/Authors Contribution

Все авторы внесли свой вклад в концепцию рукописи, участвовали в обсуждении и написании этой рукописи, одобрили окончательную версию. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи. / All authors contributed to the conception of the manuscript, the discussion, and writing of this manuscript, approved the final version. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют, что исследования проводились при отсутствии любых коммерческих или финансовых отношений, которые могли бы быть истолкованы как потенциальный конфликт интересов.

Сведения о рецензировании

Статья прошла открытое рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и в РИНЦе.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-29-17069).

Список источников/References

1. Завьялов В.В., Кужелко С.В., Завьялова Н.В. и др. Современные направления создания новых защитных материалов и тканей для средств индивидуальной и коллективной защиты от токсичных химикатов и клеток патогенов // Вестник войск РХБ защиты. 2019. Т. 3, № 3. С. 217–254. <https://doi.org/10.358.25/2587-5728-2019-3-3-217-254>

Zavialov V.V., Kujelko S.V., Zavyalova N.V. et al. Modern directions of creating new protective materials and tissues for means of individual and collective protection against toxic chemicals and pathogenic microorganisms // Journal of NBC Protection Corps. 2019. V. 3, № 3. P. 217–254. <https://doi.org/10.358.25/2587-5728-2019-3-3-217-254> (in Russian).

2. Завьялов В.В., Завьялова Н.В., Холстов В.И. и др. Стратегия разработки современных средств защиты на основе металлоорганических комплек-

сов с заданными свойствами // Вестник войск РХБ защиты. 2020. Т. 4, № 3. С. 303–335. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2020-4-3-303-335>

Zavyalov V.V., Zavyalova N.V., Kholstov V.I. et al. Strategy for development of modern protective equipment based on organometallic complexes with desired properties // Journal of NBC Protection Corps. 2020. V. 4, № 3. P. 303–305. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2020-4-3-303-335> (in Russian).

3. Завьялов В.В., Завьялова Н.В., Холстов В.И. и др. Использование модульности как принципа построения материалов на основе металлоорганических каркасных структур с заданными свойствами для создания современных средств защиты // Вестник войск РХБ защиты. 2021. Т. 5, № 2. С. 165–172. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-2-162-172>

Zavyalov V.V., Zavyalova N.V., Kholstov V.I. et

- al. Use of modularity as a principle of design of metal-organic framework-based materials with specified properties for creating modern protective equipment // *Journal of NBC Protection Corps*. 2021. V. 5, № 2. P. 165–172. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-2-165-172> (in Russian).
4. Завьялов В.В., Завьялова Н.В., Холстов В.И. и др. Бактерицидные свойства модульных защитных материалов // *Вестник войск РХБ защиты*. 2022. Т. 6, № 2. С. 113–126. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-2-113-126>
- Zavyalov V.V., Zavyalova N.V., Kholstov V.I. et al. Bactericidal properties of modular protective materials // *Journal of NBC Protection Corps*. 2022. V. 6, № 2. P. 113–126. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-2-113-126> (in Russian).
5. Завьялов В.В., Завьялова Н.В., Холстов В.И. и др. Противохимические свойства модульных защитных материалов // *Вестник войск РХБ защиты*. 2022. Т. 6, № 1. С. 4–19. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-6-1-4-19>
- Zavyalov V.V., Zavyalova N.V., Kholstov V.I. et al. Anti-chemical properties of modular protective material // *Journal of NBC Protection Corps*. 2022. V. 6, № 1. С. 4–19. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-6-1-4-19> (in Russian).
6. Leontev V.K., Pogorelski I.P., Frolov G.A. et al. Antibacterial properties aqueous colloid solutions of metal and metal oxide nanoparticles against dental plaque bacteria // *Nanotechnol. Russia*. 2018. V. 13. P. 195–198. <https://doi.org/10.1134/S1995078018020040>
7. Gunalan S., Sivaraj R. Green synthesized ZnO nanoparticles against bacterial and fungal pathogens // *Prog. Nat. Sci. Mater. Int*. 2012. V. 22. P. 693. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2012.11.015>
8. Deryabina D.G., Efremova L.V., Karimov I.F. et al. Comparative sensitivity of the luminescent *Photobacterium phosphoreum*, *Escherichia coli*, and *Bacillus subtilis* strains to toxic effect of carbon-based nanomaterials and metal nanoparticles // *Microbiology*. 2016. V. 85. P. 198–206.
9. Vidovic S., Elder J., Medihala P. et al. ZNO nanoparticles impose a panmetabolic toxic effect along with strong necrosis, inducing activation of the envelope stress response in *Salmonella enterica* serovar enteritidis // *Antimicrob. Agents Chemother*. 2015. V. 59 (6). P. 3317–3338. <https://doi.org/10.1128/AAC.00363-15>
10. Azam A., Ahmed A. S., Oves M. et al. Antimicrobial activity of metal oxide nanoparticles against Gram-positive and Gram-negative bacteria: a comparative study // *Int. J. Nanomedicine*. 2012. V. 7. P. 6003–6009. <https://doi.org/10.2147/IJN.S35347>
11. Khashan K.S., Sulaiman G.M., Abdulameer F.A. et al. Antibacterial activity of TiO₂ nanoparticles prepared by one-step laser ablation in liquid // *Applied Sciences*. 2021. V. 11, P. 4623. <https://doi.org/10.3390/app11104623>
12. Guo B.L., Han P., Guo L.C. et al. The antibacterial activity of Ta-doped ZnO nanoparticles // *Nanoscale Res. Lett*. 2015. V. 10. e336. <https://doi.org/10.1186/s1167-015-1047-4>
13. Ansari S.A., Oves M., Satar R. et al. Antibacterial activity of iron oxide nanoparticles synthesized by coprecipitation technology against *Bacillus cereus* and *Klebsiella pneumoniae* // *Pol. J. Chem. Technol*. 2017. V. 19 (4). P. 110–115. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2018.11.005>
14. Akbar A., Sadiqi M.B., Ali I. et al. Synthesis and antimicrobial activity of zinc oxide nanoparticles against foodborne pathogens *Salmonella typhimurium* and *Staphylococcus aureus* // *Biocatal. Agric. Biotechnol*. 2019. V. 17. P. 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.11.005>
15. Hayden S.C., Zhao G., Saha K. et al. Aggregation and interaction of cationic nanoparticles on bacterial surfaces // *J. Am. Chem. Soc*. 2012. V. 134. P. 6920–6923. <https://doi.org/10.1021/ja301167y>
16. Kumar R., Umar G., Nalva H.S. Antimicrobial properties of ZnO nanomaterials: a review // *Ceram. Int*. 2017. V. 43(5). P. 3940–3961. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2016.12.062>
17. Allzahrani K.E., Niazy A.A., Alswieleh A.M. et al. Antibacterial activity of trivalent (CuZnFe) oxide nanoparticles // *Int. J. Nanomedicine*. 2018. V.13. P. 77–87. <https://doi.org/10.2147/IJN.S154218>
18. Heng B.C., Zhao X., Xiong S. et al. Toxicity of zinc oxide (ZnO) nanoparticles on human bronchial epithelial cells (BEAS-2B) is accentuated by oxidative stress // *Food Chem. Toxicol*. 2010. V. 48. P. 1762–1766. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2010.04.023>
19. Dez-Pescual M.R. Percent progress in antimicrobial nanomaterial // *Nanomaterials*. 2020. V. 10. P. 2315. <https://doi.org/10.3390/nano10112315>
20. Frolov G., Lyagin I., Senko O. et al. Metal nanoparticles for improving bactericide functionality of usual fibers // *Nanomaterials*. 2020. V. 10. P. 1724. <https://doi.org/10.3390/nano10091724>
21. Lyagin I., Stepanov N., Frolov G., Efremenko E. Combined modification of fiber materials by enzymes and metal nanoparticles for chemical and biological protection // *Int. J. Mol. Sci*. 2022. V. 23. P. 1359. <https://doi.org/10.3390/ijms23031359>
22. Lyagin I.V., Efremenko E.N. Biomolecular engineering of biocatalysts hydrolyzing neurotoxic organophosphates // *Biochimie*. 2018. V. 144. P.115–121. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2017.10.023>
23. Фосфорорганические нейротоксины. Под ред. Варфоломеева С.Д., Ефременко Е.Н. РИОР: М. 2020. 380 с. <https://doi.org/10.29039/02026-5>
- Varfolomeev S.D., Efremenko E.N. (Eds.) *Organophosphorus Neurotoxins* // 1st ed.; Publ. Center RIOR: Moscow. 2020. 380 p. <https://doi.org/10.29039/02026-5> (in Russian).
24. Lyagin I., Efremenko E. Theoretical evaluation of suspected enzymatic hydrolysis of Novichok agents // *Catal. Commun*. 2019. V. 120. P. 91–94. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2018.11.019>
25. Ефременко Е.Н., Завьялов В.В., Завьяло-

ва Н.В. и др. Фильтрующе-сорбирующий самодегазирующийся материал для средств индивидуальной защиты от воздействия фосфорорганических соединений. Патент РФ на изобретение № 2330717 (10.08.2008).

Efremenko E.N., Zavyalov V.V., Zavyalova N.V. et al. Filtering-sorbing self-degassing material for personal protective equipment against the effects of organophosphorus compounds. RU Patent № 2330717 (10.08.2008) (in Russian).

26. Ефременко Е.Н., Лягин И.В. Современные биокатализаторы на основе гексагистидинсодержащей фосфорорганической гидролазы для химической и биологической защиты // Вестник войск РХБ защиты. 2019. Т. 3. № 2. С. 111–116. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2019-3-2-111-116>

Efremenko E.N., Lyagin I.V. Advanced biocatalysts based on hexahistidine-containing organophosphorus hydrolase for chemical and biological defense // Journal of NBC Protection Corps. 2019. V. 3. № 2. P. 111–116. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2019-3-2-111-116> (in Russian).

27. Efremenko E.N., Lyagin I.V., Klyachko N.L.

et al. A simple and highly effective catalytic nanozyme scavenger for organophosphorous neurotoxins // J. Control. Release, 2017. V. 247, P. 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.12.037>

28. Lyagin I., Efremenko E. Enzymes, reacting with organophosphorus compounds as detoxifiers: diversity and functions // Int. J. Mol. Sci. 2021. V. 22. P. e1761. <https://doi.org/10.3390/ijms22041761>

29. Lyagin I., Efremenko E. Enzymes for detoxification of various mycotoxins: origins and mechanisms of catalytic action // Molecules. 2019. V. 24. № 13, P. 2362. <https://doi.org/10.3390/molecules24132362>

30. Lyagin I., Maslova O., Stepanov N., Efremenko E. Degradation of mycotoxins in mixtures by combined proteinous nanobiocatalysts: in silico, in vitro and in vivo // Int. J. Biol. Macromol. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.17>

31. Stepanov N., Senko O., Perminova I., Efremenko E. A new approach to assess the effect of various humic compounds on the metabolic activity of cells participating in methanogenesis // Sustainability. 2019. V. 11. P. 3158. <https://doi.org/10.3390/su11113158>

Об авторах

Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр» Министерства обороны Российской Федерации – Организация, представляющая условия для реализации Проекта, Российская Федерация, 111024, г. Москва, проезд Энтузиастов, д. 19.

Завьялов Василий Владимирович. Старший научный сотрудник отдела, канд. хим. наук, профессор АВН, член коллектива, выполняющего грант.

Завьялова Наталья Васильевна. Главный научный сотрудник управления, д-р биол. наук, профессор, академик АВН, руководитель научного коллектива, выполняющего грант.

Холстов Виктор Иванович. Член дис. совета при 27 НЦ МО РФ, д-р хим. наук, профессор, руководитель научной школы, почетный химик Российской Федерации, академик РАЕН и АВН, член-корр. РАР и АН.

Ковтун Виктор Александрович. Начальник «27 Научного центра» Министерства обороны Российской Федерации, канд. хим. наук, доцент.

ООО «Научно-исследовательский институт эластомерных материалов и изделий», Российская Федерация, 111024, г. Москва, Перовский проезд, д. 2, стр. 1.

Гореленков Валентин Константинович. Ведущий научный сотрудник, д-р хим. наук, профессор, член коллектива, выполняющего грант.

НИПУ стали и сплавов, Российская Федерация, 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4.

Фролов Георгий Александрович Доцент кафедры, канд. хим. наук, доцент, член коллектива, выполняющего грант.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, 119234, Российская Федерация, г. Москва, Ленинские Горы, д. 1, стр. 3.

Лягин Илья Владимирович. Старший научный сотрудник, канд. хим. наук, член коллектива, выполняющего грант.

Степанов Николай Алексеевич. Научный сотрудник, канд. тех. наук, член коллектива, выполняющего грант.

Ефременко Елена Николаевна. Зав. лабораторией, д-р биол. наук, профессор, член коллектива, выполняющего грант.

Контактная информация для всех авторов: 27nc_l@mil.ru
Контактное лицо: Завьялова Наталья Васильевна, 27nc_l@mil.ru

Modular Protective Materials Neutralizing Toxins (Organophosphorus Compounds and Mycotoxins) and Exhibiting Biocidity to Gram-positive and Gram-negative Bacterial Cells

V.V. Zavyalov¹, N.V. Zavyalova¹, V.I. Kholstov¹, V.A. Kovtun¹,

V.K. Gorelenkov², G.A. Frolov³, I.V. Lyagin⁴, N.A. Stepanov⁴, E.N. Efremenko⁴

¹ Federal State Budgetary Establishment «27 Scientific Centre» of the Ministry of Defence of the Russian Federation. Entuziastov passage, 19, Moscow, 111024, Russian Federation

² Limited Liability Company «Scientific Research Institute of Elastomer Materials and Products». Perovsky Passage 2, Moscow 111004, Russian Federation

³ National University of Science and Technology MISIS. Leninsky Avenue 4, Moscow 119049, Russian Federation

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry. Lenin Hills 1-3, Moscow 119991, Russian Federation

Received 12 July 2022. Accepted 23 September 2022

Earlier we have developed the principle of constructing modular materials with desired properties. *The aim of this work* is to study the possibility of imparting bactericidal protective properties to modular materials (tissues). The experimental studies have demonstrated the possibility of combining modules containing metal carboxylates, metal nanoparticles, and enzyme nanocomplexes for multiple functionalization of the same fibrous material and/or fiber. Fibrous materials, as a result of successive application of modular formulations containing nanosized metals and enzyme nanocomplexes, to their surface acquired biocidal and antichemical protective properties. It has been established that the spray method of applying modules to the surface of the studied materials is more universal, since aerosol application makes it possible to apply liquid to any wetted material with a uniform surface layer. The bactericidal properties depended on the chosen method of fibrous material functionalization. The obtained modular fibrous materials also showed good biocatalytic characteristics with respect to various organophosphorus compounds and mycotoxins. The duration of the effect of self-disinfection and self-degassing of fibrous materials treated with modular formulations containing nanosized metals and enzyme nanocomplexes is at least 230 days. The developed materials and the method of their production can be used both in obtaining completely new fabrics for personal protective equipment and in developing new organizational, technical and methodological approaches to ensuring personal protection of personnel of the Armed Forces of the Russian Federation.

Keywords: bactericidal properties of materials; detoxification; protective composite fabrics; metal nanoparticles; nanosized enzyme complexes; special properties of modular materials; toxins.

For citation: Zavyalov V.V., Zavyalova N.V., Kholstov V.I., Kovtun V.A., Frolov G.A., Gorelenkov V.K., Lyagin I.V., Stepanov N.A., Efremenko E.N. Modular Protective Materials Neutralizing Toxins (Organophosphorus Compounds and Mycotoxins) and Exhibiting Biocidity to Gram-positive and Gram-negative Bacterial Cells // *Journal of NBC Protection Corps*. 2022. V. 6. No. 3, P. 229–242. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2022-6-3-229-242>

Conflict of interest statement

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationship that could be construed as a potential conflict of interest.

Peer review information

The article has been peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Funding. This work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) (Grant № 18-29-17069).

References

See P. 238–240.

Authors

Federal State Budgetary Establishment «27 Scientific Centre» of the Ministry of Defence of the Russian Federation. Entuziastov passage, 19, Moscow 111024, Russian Federation.

Vasily Vladimirovich Zavyalov. Senior Researcher. Candidate of Chemical Sciences. Professor of the Academy of Military Sciences. Grant team member.

Natalya Vasilyevna Zavyalova. Leading Researcher. Doctor of Biological Sciences, Professor. Academician of the Academy of Military Sciences. Grant team member.

Viktor Ivanovich Kholstov. Member of the Dissertation Council of the «27 Scientific Centre» of the Ministry of Defence of the Russian Federation. Doctor of Chemical Sciences, Professor. Honored Chemist of the Russian Federation. Academician of the Russian Academy of Natural Sciences and the Academy of Military Sciences. Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences and the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences.

Viktor Aleksandrovich Kovtun. Head of the Centre. Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor.

Limited Liability Company «Scientific Research Institute of Elastomer Materials and Products». Perovsky Passage 2, Moscow 111024, Russian Federation.

Valentin Konstantinovich Gorelenkov. Leading Researcher. Doctor of Chemical Sciences, Professor. National University of Science and Technology MISIS. Leninsky Avenue 4, Moscow 119049, Russian Federation. Grant team member.

National University of Science and Technology MISIS. Leninsky Avenue 4, Moscow 119049, Russian Federation.

George Alexandrovich Frolov. Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor. Grant team member.

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry. Lenin Hills 1-3, Moscow 119991, Russian Federation.

Ilya Vladimirovich Lyagin. Senior Researcher. Candidate of Chemical Sciences. Grant team member.

Nikolaj Alekseevich Stepanov. Candidate of Technical Sciences. Grant team member.

Elena Nikolayevna Efremenko. Laboratory Chief. Doctor of Biological Sciences, Professor. Grant team member.

Contact information for all authors: 27nc_1@mil.ru

Contact person: Natalya Vasilyevna Zavyalova; 27nc_1@mil.ru