DOI: 10.31857/S0023291226060018
УДК 544.722.122+544.722.132

Иерархически структурированные медьсодержащие поверхности в медицинских учреждениях: роль смачивания, механизмы антимикробного действия и условия применения

А.В. Буглак

Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Российская Федерация
**E-mail: avb_phyche@mail.ru*

Аннотация. Инфекции, связанные с оказанием медицинской помощи, стимулируют разработку поверхностей с длительно сохраняющейся антимикробной активностью, способных дополнять традиционные процедуры очистки и дезинфекции. Среди таких материалов особое место занимают медь и медьсодержащие покрытия. В обзоре с коллоидно-химических позиций рассмотрены механизмы взаимодействия бактериальных клеток с медьсодержащими, в том числе иерархически структурированными, поверхностями, и проанализирована связь между их физико-химическими характеристиками, антимикробной активностью и эффективностью в условиях медицинских учреждений. Обсуждаются межфазные силы, определяющие первичную адгезию бактерий, роль топографии и смачивания, высвобождение и биодоступность ионов Cu(I)/Cu(II), повреждение клеточных мембран, окислительный стресс и механобактерицидное действие микро- и нанорельефа. Показано, что иерархическое структурирование и экстремальная смачиваемость не обеспечивают универсального повышения антимикробной эффективности: их влияние определяется состоянием границы раздела, составом загрязняющей среды, влажностью, характером контакта и условиями эксплуатации. Особое внимание уделено различиям между лабораторными испытаниями при мокром и сухом контакте, влиянию органических загрязнений, санитарной обработки и износа, а также ограничениям переноса лабораторных результатов на клинические условия. В исследованиях, проведенных в медицинских учреждениях, снижение микробной контаминации медных поверхностей по сравнению с контрольными материалами выявляется значительно более воспроизводимо, чем снижение частоты клинически диагностируемых инфекций, связанных с оказанием медицинской помощи. Сформулированы физико-химические критерии проектирования и испытания медьсодержащих поверхностей, согласно которым ключевым показателем является не максимальная бактерицидность свежего материала, а сохранение антимикробной функции после многократных циклов загрязнения, испарения жидкости, касания, очистки и дезинфекции.

Ключевые слова: антибактериальные поверхности, лазерное модифицирование поверхности, экстремальное смачивание, нозокомиальные инфекции, поверхности касания, микробное загрязнение

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-73-30004, https://rscf.ru/project/23-73-30004/.

Конфликт интересов. Автор данной статьи заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность академику Л.Б. Бойнович и члену-корреспонденту РАН А.М. Емельяненко за ценные обсуждения в процессе подготовки данного обзора.

Ссылка для цитирования: Буглак А.В. Иерархически структурированные медьсодержащие поверхности в медицинских учреждениях: роль смачивания, механизмы антимикробного действия и условия применения. *Коллоидный журнал / Colloid Journal*. 2026. Т. 88. № 6. С. 757–774. https://doi.org/10.31857/S0023291226060018

© Буглак А.В., 2026

DOI: 10.31857/S0023291226060018

Hierarchically Structured Copper-Containing Surfaces in Healthcare Settings: The Role of Wetting, Mechanisms of Antimicrobial Action and Conditions of Use

A.V. Buglak

A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of RAS, Moscow, Russian Federation
**E-mail: avb_phyche@mail.ru*

Abstract. Healthcare-associated infections are driving the development of surfaces with sustained antimicrobial activity that can complement traditional cleaning and disinfection procedures. Copper and copper-containing coatings occupy a prominent place among these materials. This review examines the mechanisms of bacterial cell interaction with copper-containing surfaces, including hierarchically structured ones, from a colloidal chemistry perspective and analyzes the relationship between their physicochemical characteristics, antimicrobial activity, and effectiveness in healthcare settings. The interfacial forces determining primary bacterial adhesion, the role of topography and wetting, the release and bioavailability of Cu(I)/Cu(II) ions, cell membrane damage, oxidative stress, and the mechano-bactericidal effects of micro- and nanoscale surface topography are discussed. It is shown that hierarchical structuring and extreme wettability do not provide a universal increase in antimicrobial efficacy: their impact is determined by the state of the interface, the composition of the contaminant environment, humidity, the nature of contact, and operating conditions. Particular attention is paid to the differences between laboratory tests under wet and dry contact, the impact of organic contaminants, sanitization, and wear, as well as the limitations of transferring laboratory results to clinical settings. In studies conducted in healthcare settings, the reduction in microbial contamination of copper surfaces compared to control materials is significantly more reproducible than the reduction in the incidence of clinically diagnosed healthcare-associated infections. Physicochemical criteria for the design and testing of copper-containing surfaces are formulated, according to which the key indicator is not the maximum bactericidal activity of the fresh material, but the maintenance of antimicrobial function during repeated cycles of contamination, liquid evaporation, contact, cleaning, and disinfection.

Keywords: antibacterial surfaces, laser surface modification, extreme wetting, nosocomial infections, touch surfaces, microbial contamination

Funding. The work was supported by the Russian Science Foundation (grant 23-73-30004), https://rscf.ru/project/23-73-30004/.

Conflict of interest. The author of this article declares no conflict of interest.

Acknowledgments. The author expresses sincere gratitude to Academician L.B. Boinovich and Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences A.M. Emelyanenko for valuable discussions during the preparation of this review.

For Citation: Buglak A.V. Hierarchically Structured Copper-Containing Surfaces in Healthcare Settings: The Role of Wetting, Mechanisms of Antimicrobial Action and Conditions of Use. *Kolloidnyj zhurnal / Colloid Journal*. 2026;88(6):757–774. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S0023291226060018

© Buglak A.V., 2026



ВВЕДЕНИЕ

Инфекции, связанные с оказанием медицинской помощи (ИСМП), остаются значимой проблемой безопасности пациентов. Европейские и глобальные отчеты указывают на высокую распространенность ИСМП и тесную связь этой проблемы с антимикробной резистентностью [1, 2]. Базовые меры профилактики – гигиена рук, регулярная очистка и дезинфекция, организация потоков пациентов и соблюдение стандартных мер инфекционного контроля – остаются обязательными. Вместе с тем их действие носит периодический характер, тогда как поверхности с высокой частотой касаний могут повторно контаминироваться уже между циклами уборки. Загрязненные поверхности не являются единственным или главным источником ИСМП, однако могут участвовать в передаче возбудителей через руки персонала и пациентов [3, 4]. Поэтому материалы с постоянной антимикробной активностью рассматриваются как дополнительный и очень важный подход к инфекционному контролю в лечебных учреждениях [5].

Медь относится к наиболее изученным материалам для таких поверхностей. Ее антимикробное действие связано с высвобождением ионов Cu(I) и Cu(II), нарушением работы клеточных белков и мембранных систем, развитием окислительного стресса и повреждением внутриклеточных мишеней [6–8]. Однако проявление антимикробных свойств меди не является неизменным атрибутом медьсодержащих материалов. Скорость и характер инактивации микроорганизмов такими материалами зависят от состояния поверхности, оксидного слоя, влажности, температуры, состава загрязняющей среды, времени контакта и доступности меди для клетки. Исследования в условиях действующего стационара дополнительно показывают влияние способа нанесения, толщины и состава покрытия, режима очистки и длительности эксплуатации [9].

Клинические данные требуют особенно осторожной интерпретации. В исследованиях, проведенных в медицинских учреждениях, снижение микробной контаминации медных поверхностей по сравнению с контрольными материалами выявляется значительно более воспроизводимо, чем снижение частоты клинически диагностируемых ИСМП. В систематических обзорах отмечаются неоднородность дизайнов, различия в санитарных протоколах, недостаточная мощность отдельных исследований и трудность отделить вклад материала от других вмешательств [10, 11]. Поэтому в настоящем обзоре разграничиваются три уровня рассмотрения: антимикробная активность *in vitro*, снижение микробной контаминации при реальной эксплуатации и влияние на клинически диагностируемые ИСМП.

Отдельный интерес представляет использование микро- и наноструктурирования меди для создания антимикробных покрытий. Иерархический рельеф способен одновременно менять фактическую площадь контакта, распределение жидкости, коррозионное растворение, кинетику ионного транспорта, адгезию клеток и локальные механические напряжения в оболочке микроорганизма. При этом один и тот же рельеф может

быть полезен в одном режиме загрязнения и неблагоприятен в другом: развитая гидрофильная поверхность ускоряет контакт жидкой фазы с медью, но может удерживать органические загрязнения; гидрофобизация уменьшает площадь смачивания и адгезию микроорганизмов, но одновременно ограничивает раннее поступление ионов. Таким образом, поверхностные свойства покрытий, такие как топография, смачиваемость и поверхностная химия, необходимо рассматривать как взаимосвязанную систему параметров, при этом иерархически структурированные медьсодержащие поверхности представляют собой класс биомедицинских межфазных систем [12].

Цель обзора – систематизировать физико-химические механизмы взаимодействия бактериальных клеток с медьсодержащими и иерархически структурированными поверхностями с подчеркиванием роли поверхностных явлений, сопоставить лабораторные методы оценки с условиями реальной эксплуатации и определить критерии, при которых такие материалы могут быть оправданно использованы в медицинских учреждениях. Основной акцент сделан не на максимальном лабораторном снижении общего микробного числа (ОМЧ) как таковом, а на устойчивости антимикробных функций при испарении жидкой среды, органическом загрязнении, многократных касаниях, санитарной обработке и износе.

ПЕРВИЧНАЯ АДГЕЗИЯ БАКТЕРИЙ: МЕЖФАЗНЫЕ СИЛЫ, РЕЛЬЕФ И СМАЧИВАНИЕ

Адгезия начинается с транспорта клетки к поверхности, сближения через тонкую жидкую прослойку и формирования обратимого контакта. До непосредственного прикрепления бактерию можно приближенно рассматривать как мягкую, химически неоднородную коллоидную частицу, движение которой определяется диффузией, потоком, седиментацией, гидродинамическим сдвигом и, для подвижных видов, активным движением. При уменьшении расстояния возрастает вклад поверхностных сил, которые определяют силу первичной/обратимой адгезии [13–17]. Затем происходит испарение/вытеснение жидкости из зазора, перестройка макромолекул оболочки. Дальнейшее участие пилей и адгезинов переводит контакт в состояние с высокой, в ряде случаев необратимой, адгезией [12, 15].

Классическая ДЛФО-модель взаимодействия коллоидной частицы с поверхностью учитывает вандерваальсовы силы и взаимодействие двойных электрических слоев. Для биологических систем этого недостаточно. Ионный состав прослойки влияет на экранирование зарядов и диэлектрические свойства среды; специфическая адсорбция ионов меняет локальный потенциал поверхности; гидрофильные и гидрофобные домены формируют дополнительные короткодействующие взаимодействия через воду и меняют структуру воды в прослойке; макромолекулярные структуры клеточной оболочки создают стерические силы. Поэтому при описании первичной адгезии используют расширенное представление, включающее дисперсионные, электростатические, кислотно-основные, структурные силы притяжения и отталкивания, силы изображения и стерические взаимодействия [13–16, 18–21].

В физиологических электролитах электростатическое взаимодействие обычно экранируется на нанометровых расстояниях, но локальный заряд липополисахаридов, тейхоевых кислот, пилей и оксидированных участков металла остается значимым непосредственно перед контактом. Кроме того, при толщинах жидкой прослойки порядка нескольких монослоев начинают играть значимую роль и электростатические силы зарядов изображения [22]. Гидрофильные поверхности за счет сильных взаимодействий с молекулами воды могут поддерживать слой связанной воды, создающий короткодействующий барьер адгезии, и приводить к коллективным колебательным возбуждениям, создающим силы отталкивания при толщинах порядка десятка монослоев. Напротив, гидрофобные домены клетки и подложки способны вызывать дальнодействующее притяжение клетки к поверхности. При супергидрофобном состоянии ситуация усложняется наличием воздуха во впадинах рельефа и небольшой долей фактически смоченной площади.

На шероховатой поверхности приближение двух гладких тел для расчета взаимодействий становится некорректным. На расстояниях, сопоставимых с высотой текстуры, взаимодействие определяется отдельными вершинами текстуры поверхности, выступающими клеточными структурами и локальной кривизной выступающих элементов [23–25]. Поэтому средняя шероховатость сама по себе плохо предсказывает величину адгезии. Более информативны распределение высот, плотность и радиус кривизны выступов, межвершинное расстояние, доля реально смоченной площади и соотношение характерного размера рельефа с размером клетки [26–30].

Бактериальная клетка при этом не является пассивным объектом. Механочувствительные адгезины и пили могут менять прочность контакта при приложении силы; прикрепление способно сопровождаться быстрым изменением физиологического состояния клетки и поверхностного заряда [16, 17, 31]. Влияние жесткости подложки также может быть видо- и фазоспецифичным [32]. В результате одинаковый рельеф может уменьшать адгезию, удерживать клетки в углублениях или создавать деформации оболочки в зависимости от ее геометрии, смачивания и механических свойств бактериальной клетки, включая жесткость и деформируемость клеточной оболочки.

Для медных поверхностей смачивание особенно важно, поскольку оно определяет не только адгезию, но и условия растворения металла. На гидрофильной текстуре жидкость быстрее растекается по развитой площади, увеличивая площадь контакта и ускоряя транспорт ионов [33]. Супергидрофобность поверхности уменьшает площадь контакта с жидкой

биологической средой, что способствует понижению вероятности удержания клеток на гидрофобной поверхности. В реальной больнице, однако, бактериальное загрязнение попадает на поверхности касания не в виде чистой воды, а с потом, слюной, респираторными секретами, белками, липидами, солями и компонентами дезинфектантов. Эти вещества способны быстро менять исходное смачивание и маскировать поверхностные взаимодействия [12, 34–37]. Основные межфазные взаимодействия при первичной адгезии (табл. 1) и роль локальной геометрии контакта схематически показаны на рис. 1.

МЕХАНИЗМЫ АНТИМИКРОБНОГО ДЕЙСТВИЯ МЕДЬСОДЕРЖАЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Ионное действие и контактное уничтожение

Антимикробное действие металлической меди представляет собой каскад процессов, а не один механизм (рис. 2, табл. 2). При контакте с влагой и биологическими средами с поверхности высвобождаются ионы Cu(I) и Cu(II), которые взаимодействуют с клеточной оболочкой и внутриклеточными мишенями. Избыточная медь связывается с тиольными, имидазольными и карбоксильными группами белков, нарушает металлозависимые ферментные системы, дыхательную цепь и мембранный транспорт. Клеточные системы гомеостаза меди – транспортные АТФазы, металлошапероны и окислительно-восстановительные ферменты – способны компенсировать ограниченную нагрузку, но при быстром поступлении металла насыщаются [6–8, 38–43].

Для медной поверхности важна не только суммарная концентрация меди, измеряемая после растворения элементов поверхности, но прежде всего свободная и лабильная фракция, доступная для клетки (биодоступная медь) [6]. Белки, аминокислоты, хлориды, фосфаты и органические кислоты могут менять комплексообразование, растворимость и токсичность меди. Поэтому сопоставление разных исследований по

Таблица 1. Основные факторы первичной адгезии бактерий к поверхности
Table 1. Main factors of primary adhesion of bacteria to the surface

Фактор	Физическая основа	Возможное влияние	Ключевое ограничение интерпретации
Вандерваальсовы силы	Дисперсионное взаимодействие через жидкую прослойку	Чаще способствуют сближению; знак и величина зависят от свойств трех фаз	На развитом рельефе взаимодействие определяется локальными вершинами, а не средним расстоянием
Ионно-электростатические силы	Перекрытие диффузных электрических слоев клетки и подложки	Притяжение или отталкивание в зависимости от pH, ионной силы и адсорбции ионов	При физиологической ионной силе дальность мала; заряд неоднороден
Гидрофильные и гидрофобные структурные силы	Структура воды у полярных и неполярных участков	Коротко- и среднедействующее гидрофильное отталкивание или гидрофобное притяжение	Эффект быстро меняется после адсорбции белков, липидов и ПАВ
Стерические силы	Сжатие полимерных цепей, пилей, липополисахаридов и других выступающих макромолекул	Обычно создают барьер до формирования специфических связей	Зависят от вида, фазы роста и конформации оболочки
Гидродинамика и капиллярность	Течение, испарение, движение контактной линии и менисков	Могут доставлять клетки к поверхности или отрывать их	Зависят от объема жидкой фазы, влажности и режима испарения
Топография	Локальная геометрия вершин, впадин и межвершинных расстояний	Антиадгезионный, удерживающий или деформирующий эффект	Средняя шероховатость не отражает фактическую геометрию контакта
Механочувствительная адгезия	Силозависимое изменение состояния пилей и белков	Упрочнение контакта и ранний клеточный ответ	Не описывается простыми коллоидными моделями

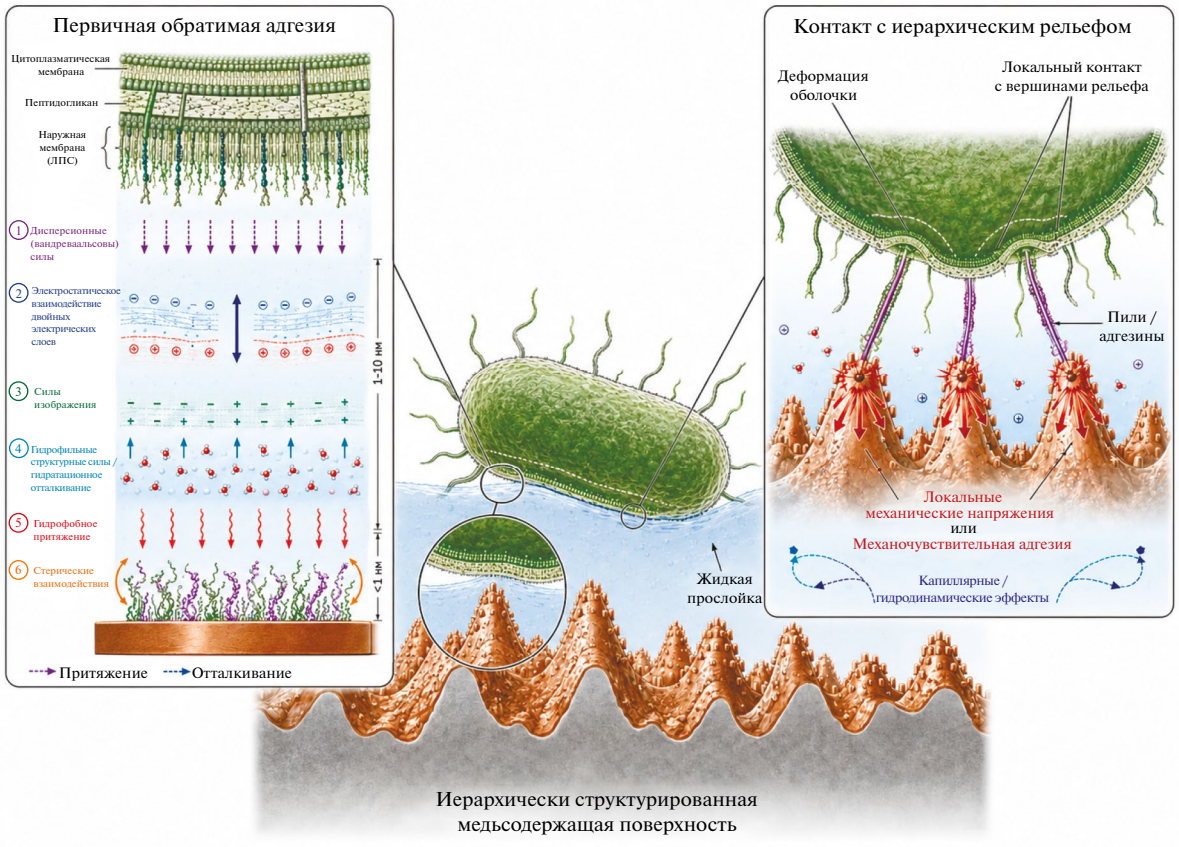

Рис. 1. Межфазные силы и параметры, определяющие первичную адгезию бактериальных клеток к текстурированной поверхности

Fig. 1. Interfacial forces and parameters determining the primary adhesion of bacterial cells to a textured surface

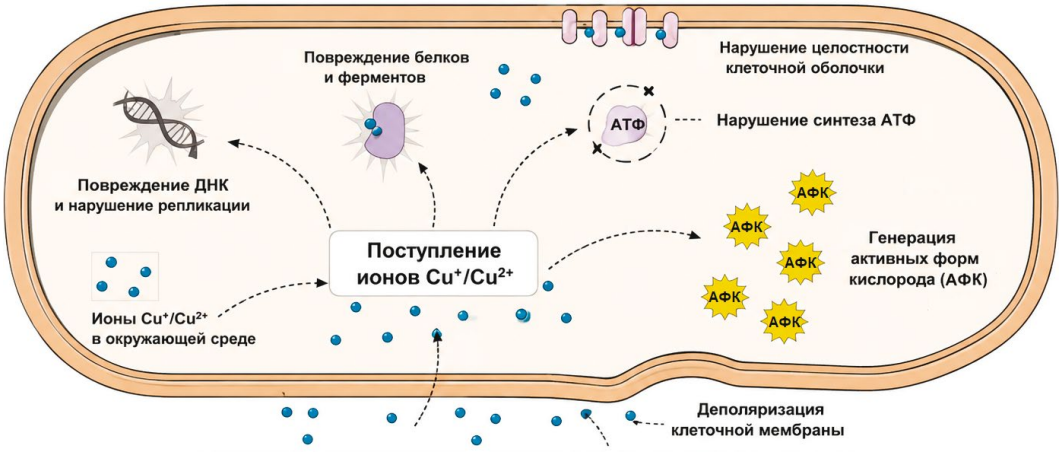

Рис. 2. Основные взаимосвязанные механизмы антимикробного действия медьсодержащей поверхности: высвобождение Cu(I)/Cu(II), повреждение мембраны, нарушение функций белков, окислительный стресс и поражение внутриклеточных мишеней

Fig. 2. The main interrelated mechanisms of antimicrobial action of the copper-containing surface: Cu(I)/Cu(II) release, membrane damage, protein dysfunction, oxidative stress, and damage to intracellular targets

Таблица 2. Механизмы антимикробного действия и необходимые контрольные эксперименты
Table 2. Mechanisms of antimicrobial action and necessary control experiments

Механизм	Наблюдаемые признаки	Необходимый контроль	Основное ограничение
Ионная токсичность	Увеличение концентрации биодоступной Cu в среде, накопление меди клетками, снижение ОМЧ	Хелатор, специирование свободной/лабильной Cu, контроль pH и состава среды	Суммарное содержание меди не эквивалентно содержанию биодоступной фракции
Механическое повреждение	Деформация, разрыв оболочки, утечка внутриклеточных компонентов	Инертная реплика геометрии, хелатор Cu, АСМ и времяразрешенная визуализация	РЭМ после сушки может создавать артефакты
Окислительный стресс	Активные формы кислорода (АФК), пероксидация, изменение мембранного потенциала	Несколько АФК-зондов, антиоксиданты, темновой контроль	Зонды могут взаимодействовать с Cu и светом
Фотоактивация	Зависимость активации от спектра и интенсивности света	Темновой контроль, измеренный спектр/интенсивность излучения, тесты на поглощение	Лабораторная освещенность часто не соответствует больничной
Понижение адгезии за счет супергидрофобности	Меньше прикрепленных клеток, легкое удаление жидкости	Углы смачивания, гистерезис, тест после загрязнения	Статический угол на чистой поверхности быстро теряет информативность
Дополнительный биоцид в пористой текстуре	Усиленный начальный эффект и последующее истощение	Кинетика высвобождения, повторные циклы загрязнения и мойки	Ограниченный ресурс и изменение химии поверхности

одной величине концентрации меди без учета состава среды и отношения площади поверхности к объему жидкости методологически некорректно.

Принципиально различаются сухой и мокрый контакт. При влажном загрязнении медь активно растворяется в жидкой фазе, тогда как при испарении жидкости ионы концентрируются в уменьшающемся объеме у клетки и линии контакта. Работы по сухому контактному уничтожению показывают быстрое накопление меди клетками, повреждение мембраны и потерю жизнеспособности, но скорость этих процессов чувствительна к относительной влажности и состоянию поверхности [39–45].

Вклад иерархической топографии

Иерархическое структурирование может усиливать антибактериальную эффективность медьсодержащей поверхности несколькими путями. Во-первых, развитая микро- и наногеометрия увеличивает доступную площадь и число электрохимически активных участков, что способно ускорять коррозионное растворение и транспорт меди. Во-вторых, наноразмерные выступы изменяют распределение механических напряжений в клеточной оболочке. В-третьих, микрорельеф управляет локальным смачиванием, капиллярным заполнением и положением клетки относительно активной фазы [12, 26–29, 46, 47].

Механобактерицидный эффект наиболее убедительно продемонстрирован на системах, где геометрию можно отделить от химической токсичности. Высокие и острые наноэлементы (рис. 3) могут вызывать растяжение оболочки между соседними вершинами, локальную концентрацию напряжений, утечку внутриклеточного содержимого и гибель клетки [27–29, 47–49]. На медной текстуре такой вклад отделить сложнее: те же наноструктуры, которые механически взаимодействуют с клеткой, нередко имеют повышенную реакционную способность и ускоряют высвобождение Cu. Поэтому наблюдаемая деформация клетки сама по себе не доказывает доминирование механического механизма.

Показательны гибридные системы, в которых механическое и химическое действие заложены одновременно. В иерархической Cu-MOF-сетке остроугольные нанолисты были связаны с быстрым повреждением клеток, а пролонгированная активность – с высвобождением меди [50]. Для Cu_2O-нанолепестков сочетались развитая топография, гидрофобность и химическая активность [51]. Такие примеры подтверждают, что для медьсодержащих текстур целесообразно говорить не о единственном «механизме рельефа», а о перераспределении вкладов нескольких процессов.

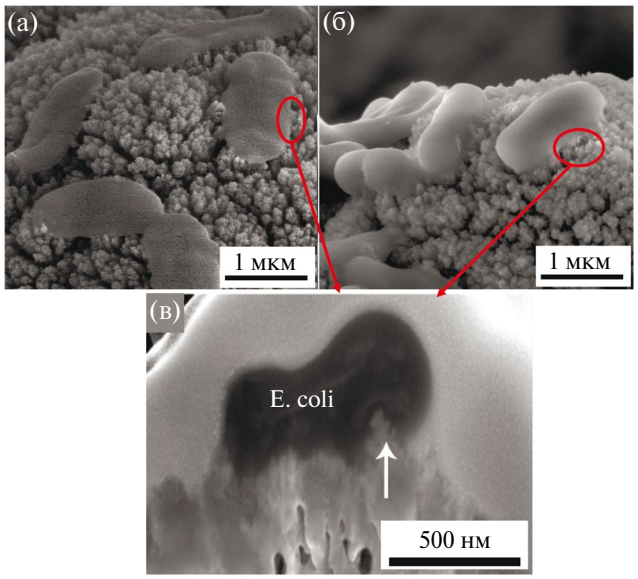

Рис. 3. РЭМ-изображения клеток бактерий *E. coli* K12 C600 на лазерно-текстурированных (а) супергидрофильной и (б) супергидрофобной поверхностях и (в) поперечное сечение, полученное путем резки сфокусированным ионным пучком, иллюстрирующее локальное прокалывание клеточной мембраны. Адаптировано с разрешения из работы [47]. © 2018 American Chemical Society

Fig. 3. SEM images of bacteria *E. coli* K12 C600 cells on laser-textured (а) superhydrophilic and (б) superhydrophobic surfaces and (в) the cross-section obtained by focused ion beam cutting, illustrating the local piercing of the cell membrane. Adapted with permission from [47]. © 2018 American Chemical Society

Окислительный стресс и фотоактивные композиции

Ионы меди способны участвовать в одноэлектронных окислительно-восстановительных превращениях и усиливать образование активных форм кислорода (АФК). Окислительное повреждение липидов, белков и нуклеиновых кислот может усиливать мембранную проницаемость и тем самым создавать положительную обратную связь с поступлением меди. Однако вклад АФК зависит от вида микроорганизма, валентного состояния меди, состава среды и наличия восстановителей, поэтому его следует подтверждать несколькими независимыми методами, а не только флуоресцентным зондом.

В композитах Cu–TiO_2 к токсичности меди добавляется фотокаталитический путь. Для F,Cu-содопированного TiO_2 показана выраженная инактивация *Staphylococcus aureus* при видимом освещении, а исследования Cu-допированного TiO_2 демонстрируют зависимость активности от состояния окисления меди [52, 53]. Для медицинских учреждений это направление интересно только при подтверждении работы при реальном спектре и интенсивности освещения. Данные, полученные исключительно под интенсивным УФ-облучением, нельзя напрямую переносить на дверные ручки, кнопки или экраны, значительную часть времени находящиеся в тени.

Для иерархических Cu–TiO_2-покрытий необходимо одновременно учитывать фотокатализ, высвобождение меди, смачивание и загрязнение покрытий. Изменение полиморфного состояния TiO_2 способно менять как фотоактивность, так и кинетику высвобождения меди [54]. Испытания заменяемых Cu–TiO_2-фольг в стационаре [54, 55] показали, что добавление фотокаталитического компонента не гарантирует преимущества в сравнении с текстурированной медью: органическое экранирование, локальная освещенность и изменение смачивания могут нивелировать ожидаемую синергию.

Смачивание, органическое загрязнение и старение поверхности

Смачивание является одним из ключевых параметров системы «медная поверхность–жидкая среда–клетка». Супергидрофильная текстура способствует быстрому растеканию и капиллярному проникновению жидкости в рельеф, увеличивая площадь ионного обмена и вероятность контакта клетки с наноэлементами [33]. В суспензионных испытаниях такие поверхности нередко демонстрируют быструю бактерицидность [35, 36]. Супергидрофобное состояние, напротив, может уменьшать долю контакта жидкость–твердое тело и первичную адгезию, но тем самым ограничивать начальный поток меди в жидкую фазу [35–38]. Поэтому экстремальная смачиваемость не дает универсального улучшения антибактериальных свойств; ее эффект зависит от того, какой путь контаминации моделируется.

Для развитого рельефа особенно важно различать идеализированные состояния смачивания и фактическое состояние эксплуатируемой поверхности. Переходы между режимами типа Касси–Бакстера и Венцеля [30], закрепление контактной линии и заполнение пор меняются после адсорбции белков, липидов, солей и поверхностно-активных компонентов (рис. 4). Эти же вещества связывают ионы меди и экранируют непосредственный контакт клетки с металлом. Для иерархической текстуры возникает компромисс: высокая развитость может повышать исходную активность, но одновременно увеличивать удержание загрязнения и волокон салфеточных материалов. Для супергидрофильных текстур возможность уменьшать захват волокон при санитарной обработке за счет управляемого изменения текстуры была показана экспериментально [56]. В результате статический угол смачивания на свежеприготовленном образце быстро теряет прогностическую ценность, а более информативными становятся динамическое смачивание, гистерезис и поведение поверхности после повторных циклов «загрязнение–высыхание–очистка» [37, 56–58].

Долговечность особенно важна для тонких покрытий и фольг. Их преимущество – возможность модифицировать существующие объекты без изготовления

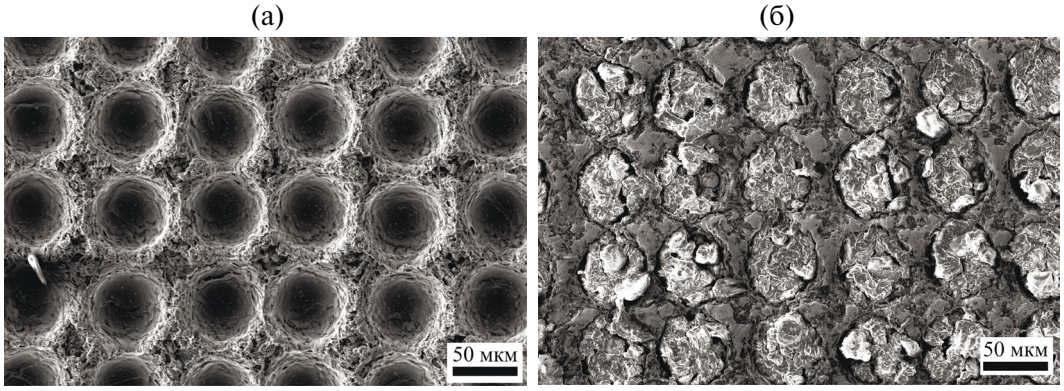

Рис. 4. РЭМ-изображения лазерно-текстурированной поверхности медной фольги (а) до и (б) после 15-недельных испытаний в больничных условиях в качестве поверхности касания. Воспроизведено с разрешения из работы [55]. © 2026 Elsevier B.V.

Fig. 4. SEM images of laser-textured copper foil surfaces (a) before and (б) after 15 weeks of testing as high-touch surface under hospital conditions. Reproduced with permission from [55]. © 2026 Elsevier B.V.

всей детали из массивной меди; недостаток – чувствительность к истиранию, локальному отслоению, изменению оксидного слоя и поверхностной химии. Разработки лазерных методов текстурирования как массивных, так и тонкослойных материалов показали принципиальную возможность получать достаточно механически стойкие поверхностные текстуры [59–62]. Современные разработки показывают, что тонкие медьсодержащие слои могут совмещать антимикробную активность с устойчивостью к механическому/химическому воздействию [57]. Для больничного применения, однако, ресурс следует оценивать не по единственному тесту на истирание, а после повторяющихся циклов «касание–загрязнение–очистка–дезинфекция–высыхание».

ЛАБОРАТОРНАЯ ОЦЕНКА: ЧТО ИМЕННО ДОЛЖЕН ИЗМЕРЯТЬ ТЕСТ

Антимикробную поверхность нельзя полноценно характеризовать одним универсальным тестом. Разные протоколы отвечают на разные вопросы: убивает ли материал клетки при длительном мокром контакте; сохраняет ли активность после высыхания; снижает ли перенос при касании; препятствует ли прикреплению; подавляет ли биопленку; работает ли после загрязнения и многократной очистки. Обзоры стандартных методов подчеркивают, что различия в объеме инокулюма, влажности, времени контакта и способе извлечения клеток могут давать принципиально разные оценки одной и той же поверхности [58]. Качество микробиологического мониторинга при испытаниях в условиях стационара дополнительно зависит от стандартизации отбора проб и извлечения микроорганизмов с поверхности [63].

ISO 22196:2011 и близкие методы используют жидкий инокулюм, длительный контакт и высокую влажность [64]. Такой режим полезен для воспроизводимого скрининга материалов, но для высококонтактной больничной поверхности он создает максимально благоприятные условия для растворения меди. Межлабораторный тест на перенос бактериальных клеток при прикосновении (touch-transfer) показал, что поверхность, активная после жидкого загрязнения, может быть существенно менее эффективной при сухом переносе; для меди выраженность эффекта заметно зависела от влажности [65]. Разработанный недавно воспроизводимый метод сухого переноса метициллин-резистентного *S. aureus* подтвердил, что при относительной влажности ниже 30% снижение популяции на меди значительно меньше, чем при влажности выше 60%, тогда как мокрый тест, проведенный согласно ISO, демонстрирует выраженную активность [66].

Поэтому для медьсодержащих поверхностей целесообразно проводить параллельные мокрые и сухие испытания. В капельных тестах без покрывающей пленки необходимо фиксировать объем, время высыхания, температуру, относительную влажность и состав инокулюма. В суспензионных тестах следует фиксировать отношение площади образца к объему жидкости, буферную емкость, концентрацию хлоридов, а также состав и концентрацию питательных и других органических компонентов инокулюма. После отбора проб необходима валидированная нейтрализация остаточной меди, иначе гибель бактерий может продолжаться уже вне поверхности и завышать измеряемый эффект.

Испытания адгезии требуют раздельного учета общего числа прикрепленных клеток и их жизнеспособности. Микроскопические методы позволяют оценивать число и локализацию клеток, структуру биопленки и характер повреждения оболочки, но сами по себе не являются надежным критерием жизнеспособности. Поэтому их целесообразно сочетать с КОЕ, флуоресцентным окрашиванием Live/Dead и, при необходимости, молекулярными методами, основанными на полимеразной цепной реакции (ПЦР), позволяющими учитывать жизнеспособные некультивируемые формы.

Промывание, обработка в ультразвуковой ванне и на вихревом смесителе (вортексирование) извлекают прикрепленные клетки с разной эффективностью с гладких и пористых поверхностей; поэтому подсчет числа колониеобразующих единиц (КОЕ) желательно дополнять микроскопией с нормированием на площадь. АСМ позволяет измерять силы отрыва и локальную механику контакта, конфокальная микроскопия – структуру биопленки, РЭМ/ПЭМ – морфологию. Для проверки механобактерицидного механизма гибели бактерий особенно важны наблюдение повреждения до фиксации и измерение утечки внутриклеточных компонентов, и здесь могут быть очень наглядными результаты томографической реконструкции клетки (рис. 5) [47].

Для анализа механизма необходим набор взаимодополняющих методов: ИСП-МС и ИСП-ОЭС для меди; химическое специирование свободной и лабильной фракции; РФЭС и Раман-спектроскопия для анализа состояния поверхности $Cu/Cu_2O/CuO$ и TiO_2; электрохимические методы для коррозии; профилометрия и электронная микроскопия для топографии; динамические параметры смачивания; мембранный потенциал, АТФ и несколько независимых маркеров окислительного стресса. Методологическая ошибка возникает, когда гибель объясняется одним механизмом на основании единственной корреляции, например между параметром шероховатости S_a и КОЕ или между углом смачивания и КОЕ.

Фотоактивные системы требуют отдельного контроля. ISO 27447:2019 стандартизует оценку антибактериальной активности полупроводниковых фотокаталитических материалов, но для медицинских помещений дополнительно необходимы измеренный спектр и интенсивность видимого света, темновой контроль, режимы свет–темнота, органическая нагрузка и контроль нагрева [67, 68]. Следует различать прямую инактивацию микроорганизмов и фотодеградацию органического загрязнения: эти функции могут проявляться с разной кинетикой. Логику перехода от скринингового лабораторного теста к клинически релевантной оценке удобно представлять как многоуровневую программу (табл. 3).

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ И ПЕРЕНОС ЛАБОРАТОРНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Главное расхождение между лабораторными и реальными условиями связано не только с влажностью. Больничная поверхность испытывает последовательные касания, абразивное истирание, воздействие спиртов, хлорсодержащих и других дезинфектантов, накопление белково-липидной пленки, пыли и волокон. Поэтому даже материал с высокой начальной бактерицидностью может постепенно перейти в другое физико-химическое состояние. Для меди это означает изменение оксидного слоя, скорости коррозии и внешнего вида; для текстурированной меди – дополнительно сглаживание вершин и заполнение впадин загрязнением.

Длительное исследование трех медьсодержащих материалов в канадских стационарах хорошо иллюстрирует эту проблему. Через 3 и 6 мес. все медные варианты имели меньшую бионагрузку, чем нержавеющая сталь, но через 12 мес. статистически значимое преимущество сохранялось только у массивного Cu–Ni-сплава [9]. В зонах с низкой исходной контаминацией и более частой уборкой различия между материалами были менее выражены. Следовательно, срок службы антимикробной функции нельзя выводить из состава исходного образца или краткого лабораторного теста.

Тонкие и заменяемые покрытия позволяют иначе решить проблему старения. Вместо требования сохранять неизменное состояние весь срок службы оборудования активный слой можно рассматривать как обслуживаемый компонент. Это делает критическими адгезию к подложке, возможность безопасного

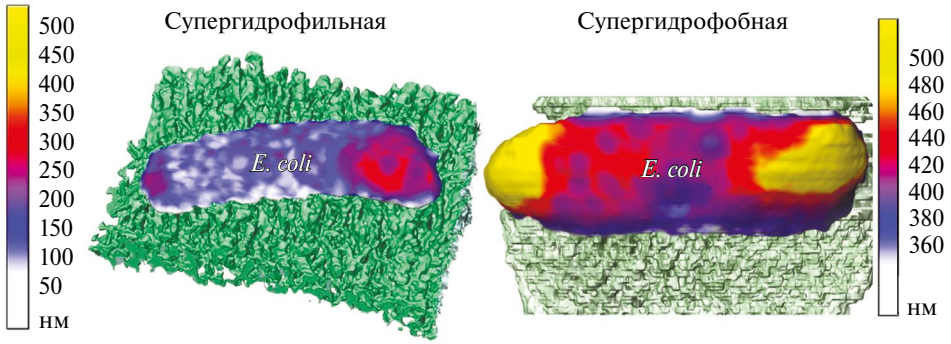

Рис. 5. Трехмерная томографическая реконструкция клеток *E. coli* на супергидрофильной (слева) и супергидрофобной (справа) лазерно-текстурированной поверхности. Воспроизведено с разрешения из работы [47]. © 2018 American Chemical Society

Fig. 5. 3D tomographic reconstruction of *E. coli* cells on the superhydrophilic (left) and superhydrophobic (right) laser-textured surface. Reproduced with permission from [47]. © 2018 American Chemical Society

Таблица 3. Многоуровневая программа испытаний медьсодержащих поверхностей
Table 3. Multi-level testing program for copper-containing surfaces

Уровень	Измеряемые показатели	Минимальные условия	Ограничения в интерпретации: что не стоит постулировать
1. Скрининг	КОЕ после мокрого и сухого контакта	Несколько видов/штаммов и времен; контроль влажности	Клиническая эффективность по одному лабораторному тесту
2. Механизм	Cu, мембрана, АФК, коррозия, механика контакта	Хелатор, антиоксидант, инертная реплика, темновой контроль	Доминирующий механизм по одной корреляции
3. Реалистичная нагрузка	Пот, белки, соли, кровь/секреты, отпечатки, высыхание	Повторные касания; температура и влажность, близкие к эксплуатации	Эффективность реальной (загрязненной) поверхности по данным чистого образца
4. Долговечность	Истирание, салфетки, дезинфектанты, волокна, адгезия покрытия	Сотни циклов и повторная микробиология	Сохранение функции по одному углу смачивания
5. Фотоактивность	Спектр, интенсивность, АФК, КОЕ, самоочистка	Видимый свет, тень, свет–темнота, органическая пленка	Полевое преимущество только по УФ-тесту

удаления, совместимость с дезинфектантами и регламент замены. В таком подходе ресурс определяется не только потерей бактерицидности, но и появлением трудноочищаемых дефектов, изменением внешнего вида или отслоением края покрытия.

Эстетика имеет практическое значение. В полевом исследовании наноструктурированного iC-nano покрытия антимикробная функция и механическая устойчивость сохранялись, но после длительного использования поверхность визуально выглядела загрязненной [69]. Такое изменение способно влиять на поведение персонала и приемлемость технологии независимо от микробиологических показателей. Для клинического материала следует заранее различать патинирование, реальное загрязнение и признаки износа и описывать критерии замены понятным персоналу способом.

ПОЛЕВЫЕ И КЛИНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Критерии оценки эффективности в клинических условиях

Результаты полевых и клинических исследований целесообразно разделять по типу оцениваемого показателя эффективности. Первый тип – общая микробная нагрузка на объект; он наиболее чувствителен к свойствам материала и позволяет отслеживать изменение функции во времени. Второй – частота обнаружения клинически значимых микроорганизмов, включая устойчивые штаммы; этот показатель может быть информативнее среднего ОМЧ, потому что одинаковая суммарная нагрузка имеет различное эпидемиологическое значение в зависимости от состава микробиоты. Третий тип – собственно ИСМП; он наиболее важен, но сильнее всего зависит от гигиены рук, антибиотикопрофилактики, плотности пациентов, вентиляции, уборки, исходного риска и множества временных факторов.

Классические исследования медных сплавов в отделениях интенсивной терапии показали устойчивое уменьшение микробной нагрузки на часто касаемых объектах [70, 71]. В рандомизированном исследовании Salgado и соавт. сообщается о меньшей частоте ИСМП и/или колонизации метициллин-резистентным золотистым стафилококком и ванкомицин-резистентным энтерококком в палатах с медными поверхностями [72]. В педиатрическом отделении интенсивной терапии также наблюдалось снижение контаминации, и тенденция к благоприятному эффекту [73, 74]. Эти работы сформировали первоначальную доказательную базу и предоставили свидетельства потенциальной эффективности применения медьсодержащих материалов в клинических условиях, но их результаты следует интерпретировать с учетом небольшого числа кластеров, видимости вмешательства и возможных различий в санитарных процедурах.

Метаанализ клинических исследований показал снижение относительного риска ИСМП при использовании меди, но качество доказательств было оценено как низкое из-за риска систематической ошибки и неоднородности условий в разных исследованиях [10]. Более поздний систематический обзор подтверждает, что снижение поверхностной контаминации выявляется последовательнее, чем снижение частоты ИСМП [11]. Следовательно, отсутствие клинически значимого различия в отдельном стационаре не опровергает антимикробную активность материала, но может означать малый добавочный эффект при низком фоновом риске или недостаточную статистическую доказательность.

Покрытия и пленки: от состава к ресурсу

Полевые исследования покрытий показывают, что номинальная доля меди недостаточна для прогнозирования эффективности. В пилотной работе с композитным покрытием Copper Armour™ наблюдалось снижение бионагрузки на высококонтактных объектах, при этом материал представлял собой медные частицы в матрице, а не сплошной металл [75]. В бразильском исследовании медные пленки с содержанием Cu 99.9% на поверхностях касания в палатах уменьшали общую бактериальную нагрузку; *Acinetobacter* spp. чаще обнаруживали на контрольных объектах [76]. Эти данные подчеркивают необходимость описывать доступность металлической фазы, связующее и толщину слоя, а не объединять все «медные покрытия» в одну категорию.

Газодинамически нанесенное медьсодержащее покрытие на ABS-кнопках выключателей в 22-недельном испытании также снижало частоту положительных проб и величину загрязнения [77]. В работе Васконселоса с соавт. медьсодержащая полимерная лента была охарактеризована лабораторно и в больничных условиях; ее преимущество состоит в возможности нанесения на готовую инфраструктуру без замены объекта [78]. Для таких решений важна не только начальная активность, но и воспроизводимость качества поверхности после монтажа, совместимость с геометрией объекта и возможность своевременной замены.

Иерархическая текстура и смачиваемость в реальной эксплуатации

Емельяненко и соавт. сравнили антимикробные свойства гладкой, супергидрофильной и супергидрофобной меди со свойствами нержавеющей стали на кнопках лифта в течение двух последовательных длительных периодов эксплуатации [79]. Суммарная частота положительных проб на медных кнопках была существенно ниже, чем на стальных. При этом средние показатели для трех медных вариантов различались меньше, чем ожидалось на основании лабораторных экспериментов. Поверхности с экстремальной смачиваемостью (супергидрофобные и супергидрофильные), однако, характеризовались меньшими пиковыми уровнями контаминации и более редким обнаружением отдельных клинически значимых бактерий. За время эксплуатации деградация текстуры и химическое загрязнение уменьшали различия в смачиваемости. Поэтому вывод этих клинических испытаний формулируется осторожнее, чем «экстремальная смачиваемость всегда лучше»: исходная текстура может влиять на форму распределения загрязнения и спектр сохраняющихся микроорганизмов, даже если среднее ОМЧ для текстурированных поверхностей близко к ОМЧ гладкой меди.

Длительное исследование вентиляционных решеток позволило оценить другой путь загрязнения – преимущественно аэрозольное осаждение при минимальном прямом касании [80]. В течение 325 дней поверхности с экстремальной смачиваемостью сохраняли преимущество по частоте положительных проб относительно стали и гладкой напыленной меди, хотя исходная супергидрофильность заметно деградировала, а супергидрофобность уменьшилась. Это показывает, что формальная потеря суперсмачивания не обязательно означает немедленную потерю антимикробной функции; для оценки ресурса нужно одновременно отслеживать морфологию, поверхностную химию и микробиологический результат.

В работе 2026 г. эта же научная группа испытывала 100-мкм самоклеящиеся медные фольги на дверных ручках, кнопках лифта и выключателях в отделении интенсивной терапии [55, 81]. Сравнивались гладкая медь, лазерно-текстурированная CuT и композит CuT с TiO_2. Все медные варианты снижали контаминацию относительно стали или ABS-пластика, наиболее стабильным по антимикробному действию оказался вариант CuT. Фотоактивный композит не дал явного и постоянного преимущества, что авторы связывают с ограничениями реальной освещенности и загрязнением поверхности. Практически важен сам формат медного покрытия с заменяемой самоприклеивающейся фольгой: он переводит старение активной поверхности из нерешаемого дефекта в управляемый параметр обслуживания.

Наноструктурированное iC-nano покрытие в действующей больнице обеспечило умеренное снижение числа КОЕ относительно контроля, но величина эффекта зависела от типа объекта и дня отбора проб; наибольшая нагрузка была отмечена на выходных ручках туалетов [69]. Это подтверждает, что выбор объекта может быть не менее важен, чем небольшие различия между материалами. При ограниченном бюджете более обоснованным представляется таргетированное покрытие поверхностей с высокой частотой повторного загрязнения и эпидемиологической значимостью, а не равномерная модификация всех доступных объектов.

Результаты применения: положительная динамика и отсутствие существенных изменений

В неонатальном отделении интенсивной терапии медные пластины вводили как часть последовательного комплекса мер, включавшего мониторинг гигиены рук, комплексы профилактических мероприятий и дезинфекцию ультрафиолетовым облучением (UV-C) в С-области спектра [82]. После добавления UV-C и меди частота ИСМП снизилась. Однако дизайн данного исследования не позволяет изолировать вклад меди: она была введена после других мероприятий и продолжала использоваться вместе с ними. Эта работа важна скорее как пример места пассивного материала в многокомпонентной системе профилактики, а не как доказательство его автономного эффекта.

Напротив, когортное наблюдательное исследование 2026 г. в новом педиатрическом стационаре не выявило статистически значимого снижения ни микробной нагрузки, ни ИСМП в помещениях с напыляемым покрытием, содержащим 62.5% Cu [83]. Результат имеет несколько возможных объяснений: отсутствие рандомизации и базового микробиологического периода,

различия в составе пациентов, низкая исходная нагрузка и ежедневная уборка. Он показывает, что добавочная польза пассивной поверхности может быть трудно обнаружима там, где фоновая система инфекционного контроля уже эффективна.

Редкий пример длительного наблюдения – десятилетний проект CuRE HAI в госпитале ветеранов, в котором последовательно устанавливали полимерные поверхности с оксидом меди и анализировали ИСМП в течение 2014–2023 гг. [84]. После внедрения меди частота ИСМП была ниже, а модель дала благоприятную оценку отношения частот появления микроорганизмов на экспериментальных и контрольных поверхностях. Сильная сторона исследования – длительность и большой объем наблюдения, ограничение связано с отсутствием рандомизированной неизменной экспозиции, обновлением оборудования, временными трендами и влиянием периода пандемии. Наиболее корректно интерпретировать эти данные как свидетельство вероятного вклада медьсодержащих поверхностей в подавление ИСМП.

При анализе всего массива накопленных к настоящему времени данных клинических исследований для объяснения причин различия результатов, полученных в разных работах, необходимо понимать, что эти исследования сравнивают разные материалы и разные эпидемиологические системы. Номинальное содержание меди может соответствовать массивному сплаву, частицам в полимерной матрице, тонкой фольге, напылению или оксидной фазе; растворимость металла в жидкой среде и механический ресурс у различных медьсодержащих материалов различаются. Топография меняет площадь контакта, смачивание и удержание загрязнений, а санитарная обработка постепенно меняет и рельеф, и химию.

Не менее важен при сравнении и тип поверхности касания. Дверная ручка, кнопка лифта, прикроватная поверхность, кран и вентиляционная решетка получают разное количество касаний, влаги, аэрозоля и моющих средств. Поэтому материал, оптимизированный для частых сухих касаний, не обязательно будет лучшим для влажного объекта или для аэрозольного осаждения. При этом статистическая видимость эффекта в значительной степени определяется фоновым уровнем бактериальной контаминации. При низкой исходной бионагрузке и редких ИСМП абсолютная разница между медью и контролем будет мала; при высокой повторной контаминации она заметнее. Частая эффективная уборка может одновременно снижать потенциальный клинический выигрыш и изменять саму поверхность [85]. Поэтому данные разных стационаров нельзя объединять без учета режима уборки, типа палат, трафика, влажности и длительности эксплуатации. Наконец, при сравнении результатов различных исследований необходимо принимать во внимание, что нерандомизированное размещение пациентов и отсутствие данных до нанесения покрытия резко ограничивают причинную интерпретацию даже при статистически благоприятном результате.

КОЛЛОИДНО-ХИМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ МЕДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

С коллоидно-химической точки зрения целевая функция иерархически структурированной меди должна определяться не максимальной бактерицидностью свежего образца, а устойчивым состоянием границы раздела в заданном эксплуатационном цикле. Критическими параметрами становятся геометрия вершин и пор, доля смоченной площади, гистерезис смачивания, кинетика высвобождения лабильной меди, способность к адсорбции органики, устойчивость оксидного слоя и сохранение рельефа после очистки. Именно совокупность этих параметров формирует связь «структура–межфазное состояние–антимикробная функция».

Практическая перспективность сменных самоклеящихся фольг [55, 81] здесь особенно очевидна, поскольку для них старение активной поверхности можно сделать управляемым. В этом случае ресурс определяется не сроком службы всей детали, а числом циклов, после которых изменяются смачивание, доступность меди или целостность текстуры. Такой подход позволяет сочетать развитую иерархию с регламентной заменой и снижает требования к многолетней неизменности исходного состояния поверхности.

Выбор объектов для внедрения такого подхода должен опираться на физико-химию переноса загрязнения. Предварительное картирование частоты касаний, характера увлажнения и микробной нагрузки позволяет выделить поверхности, где пассивный материал способен уменьшить время существования высокой бактериальной контаминации между циклами уборки. При этом медь должна рассматриваться только как дополнительный барьер: ее применение не является основанием сокращать гигиену рук или стандартную дезинфекцию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Медьсодержащие поверхности достаточно последовательно демонстрируют антимикробную активность и во многих исследованиях уменьшают микробную нагрузку в действующих лечебных учреждениях по сравнению с широко используемыми в клиниках материалами, такими как нержавеющая сталь и пластики. Однако величина эффекта не является постоянной: она зависит от химической формы меди, структуры покрытия, влажности, состава загрязнений, длительности контакта и режима эксплуатации. Доказательства снижения ИСМП остаются менее однозначными, чем данные о снижении поверхностной контаминации, поэтому клинические выводы должны опираться на дизайн конкретного исследования, а не на экстраполяцию лабораторной бактерицидности. Этот вывод согласуется с анализом, выполненным в недавнем обзоре [86].

Иерархическая структура расширяет возможности управления медной поверхностью, но не создает

автоматического преимущества. Правильно подобранный рельеф может способствовать изменению кинетики высвобождения ионов, адгезии клеток и, при соответствующей геометрии, вносить вклад в механобактерицидное повреждение клеточной оболочки без одновременного накопления значительного количества органических загрязнений и волокон. Экстремальная смачиваемость полезна только в контексте конкретного пути контаминации и не должна использоваться как самостоятельный критерий эффективности. Наиболее информативным показателем становится сохранение антимикробной функции после многократных циклов реальной эксплуатации.

Одним из перспективных практических подходов представляется использование активной поверхности как обслуживаемого компонента, в частности сменных медных пленок и фольг, текстурированных с учетом конкретного объекта и совместимых с используемыми протоколами санитарной обработки. Их внедрение оправдано прежде всего как дополнительный пассивный барьер между циклами санитарной обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. European Centre for Disease Prevention and Control (ECDC). Point prevalence survey of healthcare-associated infections and antimicrobial use in European acute care hospitals 2022–2023. Stockholm: ECDC, 2024.
2. World Health Organization. Global report on infection prevention and control 2024. Geneva: World Health Organization, 2024.
3. Otter J.A., Yezli S., Salkeld J.A.G. et al. Evidence that contaminated surfaces contribute to transmission of hospital pathogens. *Infect. Control Hosp. Epidemiol*. 2013. Vol. 34. no. 5. Pp. 449–460. https://doi.org/10.1086/670223
4. Dancer S.J. Controlling hospital-acquired infection: focus on the role of the environment and new technologies. *Clin. Microbiol. Rev*. 2014. Vol. 27. no. 4. Pp. 665–690. https://doi.org/10.1128/CMR.00020-14
5. Muller M.P., MacDougall C., Lim M. et al. Antimicrobial surfaces to prevent healthcare-associated infections: a systematic review. *J. Hosp. Infect*. 2016. Vol. 92. no. 1. Pp. 7–13. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2015.09.008
6. Grass G., Rensing C., Solioz M. Metallic copper as an antimicrobial surface. *Appl. Environ. Microbiol*. 2011. Vol. 77. no. 5. Pp. 1541–1547. https://doi.org/10.1128/AEM.02766-10
7. Vincent M., Duval R.E., Hartemann P. et al. Contact killing and antimicrobial properties of copper. *J. Appl. Microbiol*. 2018. Vol. 124. no. 5. Pp. 1032–1046. https://doi.org/10.1111/jam.13681
8. Salah I., Parkin I.P., Allan E. Copper as an antimicrobial agent: recent advances. *RSC Adv*. 2021. Vol. 11. Pp. 18179–18186. https://doi.org/10.1039/D1RA02149D
9. Bryce E.A., Velapatino B., Donnelly-Pierce T. et al. Antimicrobial efficacy and durability of copper formulations over one year of hospital use. *Infect. Control Hosp. Epidemiol*. 2022. Vol. 43. no. 1. Pp. 79–87. https://doi.org/10.1017/ice.2021.52
10. Albarqouni L., Byambasuren O., Clark J. et al. Does copper treatment of commonly touched surfaces reduce healthcare-acquired infections? A systematic review and meta-analysis. *J. Hosp. Infect*. 2020. Vol. 106. no. 4. Pp. 765–773. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.09.005
11. Aillon-Garcia P., Parga-Landa B., Guillen-Grima F. Effectiveness of copper as a preventive tool in health care facilities: a systematic review. *Am. J. Infect. Control*. 2023. Vol. 51. no. 9. Pp. 1038–1048. https://doi.org/10.1016/j.ajic.2023.02.010
12. Emelyanenko A.M., Makvandi P., Moradialvand M. et al. Harnessing extreme wettability: combatting spread of bacterial infections in healthcare. *Surf. Innov*. 2024. Vol. 12. no. 7. Pp. 360–379. https://doi.org/10.1680/jsuin.24.00048
13. Boinovich L.B. Long-range surface forces and their role in the progress of nanotechnology. *Russ. Chem. Rev*. 2007. Vol. 76. no. 5. Pp. 471–488. https://doi.org/10.1070/RC2007v076n05ABEH003692
14. Boinovich L.B. DLVO forces in thin liquid films beyond the conventional DLVO theory. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci*. 2010. Vol. 15. no. 5. Pp. 297–302. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2010.05.003
15. Kreve S., Dos Reis A.C. Bacterial adhesion to biomaterials: what regulates this attachment? A review. *Jpn. Dent. Sci. Rev*. 2021. Vol. 57. Pp. 85–96. https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2021.05.003
16. El-Kirat-Chatel S., Beaussart A., Mathelie-Guinlet M. et al. The importance of force in microbial cell adhesion. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci*. 2020. Vol. 47. Pp. 111–117. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2019.12.010
17. Viljoen A., Mignolet J., Viela F. et al. How microbes use force to control adhesion. *J. Bacteriol*. 2020. Vol. 202. no. 12. P. e00125-20. https://doi.org/10.1128/JB.00125-20
18. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. On the theory of the phonon component of disjoining pressure of thin liquid films. *Z. Phys. Chem*. 1992. Vol. 178. Pp. 229–244. https://doi.org/10.1524/zpch.1992.178.Part_2.229
19. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. Forces due to dynamic structure in thin liquid films. *Adv. Colloid Interface Sci*. 2002. Vol. 96. nos. 1–3. Pp. 37–58. https://doi.org/10.1016/S0001-8686(01)00074-4

20. Ly M.H., Aguedo M., Goudot S. et al. Interactions between bacterial surfaces and milk proteins, impact on food emulsions stability. *Food Hydrocoll*. 2008. Vol. 22. no. 5. Pp. 742–751. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.03.001
21. Jiyoung Shim, Nikolov A., Wasan D. *Escherichia coli* removal from model substrates: underlying mechanism based on nanofluid structural forces. *J. Colloid Interface Sci*. 2017. Vol. 498. Pp. 112–122. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.03.050
22. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. The image-charge forces in thin films of solutions with non-polar solvent. *Adv. Colloid Interface Sci*. 2003. Vol. 104. nos. 1–3. Pp. 93–121. https://doi.org/10.1016/S0001-8686(03)00038-1
23. Svetovoy V.B., Soldatenkov I.A. Weak adhesion between contacting rough surfaces as applied to micro/nanotechnologies. *Colloid J*. 2022. Vol. 84. no. 3. Pp. 321–331. https://doi.org/10.1134/S1061933X22030127
24. Palasantzas G., Svetovoy V.B. Problems in measuring the Casimir forces at short separations. *Int. J. Mod. Phys. A*. 2022. Vol. 37. no. 19. P. 2241001. https://doi.org/10.1142/S0217751X22410019
25. Boinovich L., Emelyanenko A. The prediction of wettability of curved surfaces on the basis of the isotherms of the disjoining pressure. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp*. 2011. Vol. 383. nos. 1–3. Pp. 10–16. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.12.020
26. Kun Yang, Jirong Shi, Lei Wang et al. Bacterial anti-adhesion surface design: surface patterning, roughness and wettability: a review. *J. Mater. Sci. Technol*. 2022. Vol. 99. Pp. 82–100. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.05.028
27. Linklater D.P., Baulin V.A., Juodkazis S. et al. Mechano-bactericidal actions of nanostructured surfaces. *Nat. Rev. Microbiol*. 2021. Vol. 19. Pp. 8–22. https://doi.org/10.1038/s41579-020-0414-z
28. Yifan Cheng, Xiaojing Ma, Franklin T. et al. Mechano-bactericidal surfaces: mechanisms, nanofabrication, and prospects for food applications. *Annu. Rev. Food Sci. Technol*. 2023. Vol. 14. Pp. 449–472. https://doi.org/10.1146/annurev-food-060721-022330
29. Pirouz A., Papakonstantinou I., Michalska M. Antimicrobial mechanisms of nanopatterned surfaces – a developing story. *Front. Chem*. 2024. Vol. 12. P. 1354755. https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1354755
30. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. Hydrophobic materials and coatings: principles of design, properties and applications. *Russ. Chem. Rev*. 2008. Vol. 77. no. 7. Pp. 583–600. https://doi.org/10.1070/RC2008v077n07ABEH003775
31. Hayles A., Bright R., Nguyen N.H. et al. *Staphylococcus aureus* surface attachment selectively influences tolerance against charged antibiotics. *Acta Biomater*. 2024. Vol. 175. Pp. 369–381. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2023.12.029
32. Riedel R., Rani G., Sengupta A. Bacterial adhesion on soft surfaces: the dual role of substrate stiffness and bacterial growth stage. *Microorganisms*. 2025. Vol. 13. no. 3. P. 637. https://doi.org/10.3390/microorganisms13030637
33. Emelyanenko A.M., Boinovich L.B., Emelyanenko K.A. Spreading of biologically relevant liquids over the laser textured surfaces. *J. Colloid Interface Sci*. 2020. Vol. 567. Pp. 224–234. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.02.006
34. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. Wetting and surface forces. *Adv. Colloid Interface Sci*. 2011. Vol. 165. no. 2. Pp. 60–69. https://doi.org/10.1016/j.cis.2011.03.002
35. Boinovich L.B., Kaminsky V.V., Domantovsky A.G. et al. Bactericidal activity of superhydrophobic and superhydrophilic copper in bacterial dispersions. *Langmuir*. 2019. Vol. 35. Pp. 2832–2841. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b03817
36. Emelyanenko A.M., Kaminskii V.V., Pytskii I.S. et al. Antibacterial properties of superhydrophilic textured copper in contact with bacterial suspensions. *Bull. Exp. Biol. Med*. 2020. Vol. 168. no. 4. Pp. 488–491. https://doi.org/10.1007/s10517-020-04737-5
37. Emelyanenko A.M., Pytskii I.S., Kaminsky V.V. et al. Superhydrophobic copper in biological liquids: antibacterial activity and microbiologically induced or inhibited corrosion. *Colloids Surf. B: Biointerfaces*. 2020. Vol. 185. P. 110622. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.110622
38. Bondareva N.E., Sheremet A.B., Morgunova E.Y. et al. Antibacterial activity of superhydrophilic and superhydrophobic copper substrates against multidrug-resistant *Pseudomonas aeruginosa* isolates. *Int. J. Mol. Sci*. 2024. Vol. 25. no. 2. P. 779. https://doi.org/10.3390/ijms25020779
39. Espírito Santo C., Lam E.W., Elowsky C.G. et al. Bacterial killing by dry metallic copper surfaces. *Appl. Environ. Microbiol*. 2011. Vol. 77. no. 3. Pp. 794–802. https://doi.org/10.1128/AEM.01599-10
40. Warnes S.L., Keevil C.W. Mechanism of copper surface toxicity in vancomycin-resistant enterococci following wet or dry surface contact. *Appl. Environ. Microbiol*. 2011. Vol. 77. no. 17. Pp. 6049–6059. https://doi.org/10.1128/AEM.00597-11
41. Warnes S.L., Caves V., Keevil C.W. Mechanism of copper surface toxicity in *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* involves immediate membrane depolarization followed by slower rate of DNA destruction which differs from that observed for Gram-positive bacteria. *Environ. Microbiol*. 2012. Vol. 14. no. 7. Pp. 1730–1743. https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2011.02677.x

42. Quaranta D., Krans T., Espírito Santo C. et al. Mechanisms of contact-mediated killing of yeast cells on dry metallic copper surfaces. *Appl. Environ. Microbiol*. 2011. Vol. 77. no. 2. Pp. 416–426. https://doi.org/10.1128/AEM.01704-10
43. Espírito Santo C., Taudte N., Nies D.H. et al. Contribution of copper ion resistance to survival of *Escherichia coli* on metallic copper surfaces. *Appl. Environ. Microbiol*. 2008. Vol. 74. no. 4. Pp. 977–986. https://doi.org/10.1128/AEM.01938-07
44. Elguindi J., Moffitt S., Hasman H. et al. Metallic copper corrosion rates, moisture content, and growth medium influence survival of copper ion-resistant bacteria. *Appl. Microbiol. Biotechnol*. 2011. Vol. 89. Pp. 1963–1970. https://doi.org/10.1007/s00253-010-2980-x
45. Michels H.T., Noyce J.O., Keevil C.W. Effects of temperature and humidity on the efficacy of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* challenged antimicrobial materials containing silver and copper. *Lett. Appl. Microbiol*. 2009. Vol. 49. no. 2. Pp. 191–195. https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2009.02637.x
46. Zeiger M., Solioz M., Edongue H. et al. Surface structure influences contact killing of bacteria by copper. *MicrobiologyOpen*. 2014. Vol. 3. no. 3. Pp. 327–332. https://doi.org/10.1002/mbo3.170
47. Boinovich L.B., Modin E.B., Aleshkin A.V. et al. Effective antibacterial nanotextured surfaces based on extreme wettability and bacteriophage seeding. *ACS Appl. Nano Mater*. 2018. Vol. 1. no. 3. Pp. 1348–1359. https://doi.org/10.1021/acsanm.8b00090
48. Gupta R., Gaddam A., Prajapati D. et al. Enhancing bactericidal properties of Ti6Al4V surfaces through micro and nano hierarchical laser texturing. *Langmuir*. 2024. Vol. 40. no. 32. Pp. 16791–16803. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c01173
49. Shuo Zhao, Zheyu Li, Linklater D.P. et al. Programmed death of injured *Pseudomonas aeruginosa* on mechano-bactericidal surfaces. *Nano Lett*. 2022. Vol. 22. no. 3. Pp. 1129–1137. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c04243
50. Caihong He, Chen Liu, Moying Li et al. 3D hierarchical Cu-MOF nanosheets-based antibacterial mesh. *Chem. Eng. J*. 2022. Vol. 446. P. 137381. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137381
51. Subhadarshini S., Singh R., Goswami D.K. et al. Electrodeposited Cu_2O nanopetal architecture as a superhydrophobic and antibacterial surface. *Langmuir*. 2019. Vol. 35. Pp. 17166–17176. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03024
52. Leyland N.S., Podporska-Carroll J., Browne J. et al. Highly efficient F, Cu doped TiO_2 anti-bacterial visible light active photocatalytic coatings to combat hospital-acquired infections. *Sci. Rep*. 2016. Vol. 6. P. 24770. https://doi.org/10.1038/srep24770
53. Joohyun Kim, Juri Lee, Sungwon Kim et al. Virucidal activity of Cu-doped TiO_2 nanoparticles under visible light illumination: effect of Cu oxidation state. *J. Hazard. Mater*. 2024. Vol. 465. P. 133525. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133525
54. Emelyanenko A.M., Yarovikova A.V., Emelyanenko K.A. et al. Photoactive Cu–TiO_2 coatings with hierarchical texture: effect of anatase and rutile on wetting and copper release kinetics in saline. *Colloid J*. 2026. Vol. 88. no. 3. Pp. 317–332. https://doi.org/10.1134/S1061933X26600193
55. Emelyanenko A.M., Buglak A.V., Emelyanenko K.A. et al. Replaceable laser-textured copper foils and Cu–TiO_2 composite foils for sustained suppression of microbial contamination on ICU high-touch surfaces. *Chem. Eng. J*. 2026. Vol. 543. P. 178733. https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.178733
56. Omran F.S., Kaminsky V.V. Modification of antibacterial superhydrophilic surfaces to enhance resistance to fiber contamination during sanitation procedures. *Colloid J*. 2024. Vol. 86. Pp. 744–756. https://doi.org/10.1134/S1061933X24600763
57. Graham C., Mezzadrelli A., Senaratne W. et al. Towards transparent and durable copper-containing antimicrobial surfaces. *Commun. Mater*. 2024. Vol. 5. P. 39. https://doi.org/10.1038/s43246-024-00472-w
58. Cunliffe A.J., Askew P.D., Stephan I. et al. How do we determine the efficacy of an antibacterial surface? A review of standardised testing methods. *Antibiotics*. 2021. Vol. 10. no. 9. P. 1069. https://doi.org/10.3390/antibiotics10091069
59. Boinovich L.B., Emelyanenko K.A., Domantovsky A.G. et al. Pulsed laser induced triple layer copper oxide structure for durable polyfunctionality of superhydrophobic coatings. *Adv. Mater. Interfaces*. 2018. Vol. 5. no. 21. P. 1801099. https://doi.org/10.1002/admi.201801099
60. Emelyanenko K.A., Sanzharovsky N.A., Chulkova E.V. et al. Superhydrophobic corrosion resistant coatings for copper via IR nanosecond laser processing. *Mater. Res. Express*. 2018. Vol. 5. no. 11. P. 115001. https://doi.org/10.1088/2053-1591/aadc16
61. Yunxiang Shu, Xiangyou Lu, Wansu Lu et al. Mechanically robust superhydrophobic copper surface with self-cleaning, anti-icing, and corrosion resistance. *Surf. Coat. Technol*. 2023. Vol. 455. P. 129216. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129216

62. Yanning Lu, Jie Li, Wentian Shi et al. Laser-induced biomimetic honeycomb structures synergizing with nanocomposites to build durable copper-based superhydrophobic coatings. *Appl. Surf. Sci*. 2025. Vol. 706. P. 163592. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.163592

63. Chai J., Donnelly T., Wong T. et al. Environmental sampling of hospital surfaces: assessing methodological quality. *Can. J. Infect. Control*. 2018. Vol. 33. no. 3. Pp. 138–145.

64. ISO 22196:2011. Measurement of antibacterial activity on plastics and other non-porous surfaces. Geneva: International Organization for Standardization, 2011.

65. Mayr A., Knobloch J.K., Hinterberger G. et al. Interlaboratory reproducibility of a touch-transfer assay for the assessment of antimicrobial surfaces. *J. Hosp. Infect*. 2023. Vol. 134. Pp. 1–6. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2023.01.016

66. Chareyre E., Cunliffe A.J., Askew P. et al. A novel and validated 3D-printed method for the consistent and reproducible dry transfer of microorganisms for the determination of antimicrobial surface efficacy. *Appl. Environ. Microbiol*. 2025. Vol. 91. no. 8. P. e00802-25. https://doi.org/10.1128/aem.00802-25

67. ISO 27447:2019. Test method for antibacterial activity of semiconducting photocatalytic materials. Geneva: International Organization for Standardization, 2019.

68. Krysa J., Musilova E., Zita J. Critical assessment of suitable methods used for determination of antibacterial properties at photocatalytic surfaces. *J. Hazard. Mater*. 2011. Vol. 195. Pp. 100–106. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.08.009

69. Ackers-Johnson G., Lewis J.M., Killen P. et al. *In vitro* and *in situ* analysis of novel copper-based antimicrobial surface coatings designed to reduce the microbial bioburden of high-touch surfaces in a hospital environment. *J. Hosp. Infect*. 2026. Vol. 169. Pp. 115–122. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2025.11.032

70. Schmidt M.G., Attaway H.H., Sharpe P.A. et al. Sustained reduction of microbial burden on common hospital surfaces through introduction of copper. *J. Clin. Microbiol*. 2012. Vol. 50. no. 7. Pp. 2217–2223. https://doi.org/10.1128/JCM.01032-12

71. Karpanen T.J., Casey A.L., Lambert P.A. et al. The antimicrobial efficacy of copper alloy furnishings in the clinical environment: a crossover study. *Infect. Control Hosp. Epidemiol*. 2012. Vol. 33. no. 1. Pp. 3–9. https://doi.org/10.1086/663644

72. Salgado C.D., Sepkowitz K.A., John J.F. et al. Copper surfaces reduce the rate of healthcare-acquired infections in the intensive care unit. *Infect. Control Hosp. Epidemiol*. 2013. Vol. 34. no. 5. Pp. 479–486. https://doi.org/10.1086/670207

73. Schmidt M.G., von Dessauer B., Benavente C. et al. Copper surfaces are associated with significantly lower concentrations of bacteria on selected surfaces within a pediatric intensive care unit. *Am. J. Infect. Control*. 2016. Vol. 44. no. 2. Pp. 203–209. https://doi.org/10.1016/j.ajic.2015.09.008

74. von Dessauer B., Navarrete M.S., Benadof D. et al. Potential effectiveness of copper surfaces in reducing healthcare-associated infection rates in a pediatric intensive and intermediate care unit: a nonrandomized controlled trial. *Am. J. Infect. Control*. 2016. Vol. 44. no. 8. Pp. e133–e139. https://doi.org/10.1016/j.ajic.2016.03.053

75. Montero D.A., Arellano C., Pardo M. et al. Antimicrobial properties of a novel copper-based composite coating with potential for use in healthcare facilities. *Antimicrob. Resist. Infect. Control*. 2019. Vol. 8. P. 3. https://doi.org/10.1186/s13756-018-0456-4

76. Blehm C.J., Monteiro M.S.G., Bessa M.C. et al. Copper-coated hospital surfaces: reduction of total bacterial loads and resistant *Acinetobacter* spp. *AMB Express*. 2022. Vol. 12. P. 146. https://doi.org/10.1186/s13568-022-01491-x

77. Emelyanenko A.M., Omran F.S., Teplonogova M.A. et al. An antimicrobial copper–plastic composite coating: characterization and *in situ* study in a hospital environment. *Int. J. Mol. Sci*. 2024. Vol. 25. no. 8. P. 4471. https://doi.org/10.3390/ijms25084471

78. Vasconcelos A.G., Amorim W.D., Sá B.S. et al. Antimicrobial activity and characterization of a validated copper-complexed polymer tape for surface disinfectant applications. *Antibiotics*. 2025. Vol. 14. no. 12. P. 1262. https://doi.org/10.3390/antibiotics14121262

79. Emelyanenko A.M., Omran F.S., Chernukha M.Y. et al. Does extreme wettability matter: the effect of copper wettability on infection spread through hospital surfaces. *ACS Omega*. 2025. Vol. 10. no. 18. Pp. 19129–19138. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c01931

80. Emelyanenko A.M., Omran F.S., Chernukha M.Y. et al. Engineering wettability-controlled copper surfaces to mitigate airborne bacterial contamination in hospitals. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp*. 2025. Vol. 719. P. 137085. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.137085

81. Chernukha M.Y., Avetisyan L.R., Domblides E.A. et al. Evaluation of the effectiveness of various antimicrobial surfaces as a strategy to combat the spread of infections in healthcare facilities. *Epidemiology and Vaccinal Prevention*. 2026. Vol. 25. no. 4. Pp. 92–101. (In Russ.) https://doi.org/10.31631/2073-3046-2026-25-4-92-101

82. de la Rosa-Zamboni D., Villa-Guillén M., Bustos-Hamdan A. et al. Effect of UV-C disinfection and copper plating on healthcare-associated infections in a NICU with high ESBL infections. *Enferm. Infecc. Microbiol. Clin*. 2025. Vol. 43. no. 2. Pp. 64–70. https://doi.org/10.1016/j.eimce.2024.02.014
83. Michalchuk Q., Zhang Q., Collet J.C. et al. Impact of copper-coated surfaces on healthcare-associated infections and microbial load in a pediatric tertiary care setting: an observational cohort study. *Infect. Control Hosp. Epidemiol*. 2026. Vol. 47. no. 8. Pp. 786–792. https://doi.org/10.1017/ice.2026.10476
84. Williams M.D., Bridges A., Coppin J.D. et al. Copper (Cu) for reducing environmental healthcare associated infections (CuRE HAI): a 10-year pragmatic copper surface implementation study. *Am. J. Infect. Control*. 2026. Vol. 54. no. 8. Pp. 866–872. https://doi.org/10.1016/j.ajic.2026.02.239
85. Omran F.S., Kaminsky V.V., Emelyanenko K.A. et al. Effect of biological contamination of copper surfaces with extreme wettability on their antibacterial properties. *Colloid J*. 2023. Vol. 85. no. 5. Pp. 757–769. https://doi.org/10.1134/S1061933X23600641
86. Cherednichenko Y.V., Ishmukhametov I.R., Fakhrullina G.I. Surface modifiers for reducing bacterial contamination in medicine and food industry. *Colloid J*. 2025. Vol. 87. no. 1. Pp. 54–67. https://doi.org/10.1134/S1061933X24601082

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Буглак Андрей Владимирович – канд. мед. наук; науч. сотр., Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, Москва, Российская Федерация
E-mail: avb_phyche@mail.ru

ABOUT THE AUTHOR

Buglak, Andrey V. – Cand. Sci. (Medicine); Research Officer, A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
E-mail: avb_phyche@mail.ru

Поступила в редакцию 21.08.2026 г.
После доработки 31.08.2026 г.
Принята к публикации 31.08.2026 г.

Received August 21, 2026
Revised August 31, 2026
Accepted August 31, 2026