КОЛЛОИДНЫЙ ЖУРНАЛ, 2025, том 87, № 1, с. 59–75

УДК 546.02

МОДИФИКАТОРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ОБСЕМЕНЕННОСТИ В МЕДИЦИНЕ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

© 2025 г. Ю. В. Чередниченко*, И. Р. Ишмухаметов, Г. И. Фахруллина

Институт фундаментальной медицины и биологии,

Казанского (Приволжского) федерального университета, ул. Кремлевская, д. 18,

г. Казань, РТ, 420008, Россия

**e-mail: serova.yuliya87@gmail.com*

Поступила в редакцию 08.09.2024 г.
После доработки 11.11.2024 г.
Принята к публикации 11.11.2024 г.

Антибактериальные покрытия находят применение в пищевой и текстильной промышленности, в строительной отрасли, биотехнологии и медицине. В обзоре рассмотрены основные виды покрытий, которые предотвращают обрастание биомакромолекулами и микроорганизмами: антиадгезивные, контактные, на основе релиза, многофункциональные и интеллектуальные («умные») покрытия. Для каждого вида покрытия описаны наиболее актуальные и эффективные действующие вещества и механизм их действия. Несмотря на широкое распространение антиадгезионных поверхностей и покрытий контактного типа, они имеют множество недостатков, которые ограничивают сферы их применения и снижают активность и долговечность. Многочисленные исследования показывают, что многофункциональные и интеллектуальные покрытия имеют высокий потенциал для практического применения и дальнейших исследований по их модификации для получения универсальных и экономически выгодных покрытий. Основной проблемой практического применения таких поверхностей является несовершенство методов оценки стабильности и антибактериальных свойств покрытия в лабораторных условиях.

Ключевые слова: антибактериальные покрытия, контактные, на основе релиза, антиадгезивные, многофункциональные, интеллектуальные

DOI: 10.31857/S0023291225010075, **EDN:** USCCCX

ВВЕДЕНИЕ

Первоначальная роль поверхностных покрытий в промышленном применении заключалась в обеспечении защиты от коррозии и механической стойкости материалов [1]. В последнее время большой интерес представляет разработка поверхностей, которые снижают адгезию микробов и обеспечивают биоцидную активность или проявляют комбинированные эффекты [2–5]. Антимикробные покрытия представляют собой материалы и вещества, которые модифицируют поверхность другого материала, и придают им функции, ограничивающие или предотвращающие рост и размножение микроорганизмов без изменения характеристик самого материала [6, 7]. Для создания таких покрытий используют различные физические и химические методы, обеспечивающие формирование однородных слоев. Чтобы покрытия были эффективными, они должны включать в себя активные соединения, обладающие широким спектром антимикробной активности, в том числе к антибиотикорезистентным микроорганизмам [8].

Устойчивость бактерий к антибиотикам является одной из важнейших проблем современной медицины. Бактериальные штаммы могут модифицировать мишени действия антибиотика, ингибировать проникновение и активное выведение антибиотика из микробной клетки (эффлюкс), формировать метаболические «шунты», вырабатывать ферменты, разрушающие противомикробные препараты [9, 10]. Особенно тревожным фактором является повсеместное распространение штаммов бактерий с множественной устойчивостью к противомикробным средствам, а также способность микроорганизмов к формированию биопленок [11]. Бактериальные биопленки представляют собой совокупность бактерий в самосекретируемой полимерной матрице. Они формируются как на биологических,

так и на небиологических поверхностях и являются важным этапом возникновения персистирующих инфекций. В составе биопленки микробы обладают повышенной устойчивостью к факторам иммунной системы, антибиотикам и дезинфектантам [12]. Матрикс бактериальных биопленок замедляет диффузию антибиотиков, а изменение химической микросреды внутри биопленки приводит к образованию персистирующих форм бактерий, которые обладают повышенной устойчивостью к противомикробным препаратам [13, 14]. Поэтому для борьбы с антибиотикорезистентностью необходим поиск новых антибактериальных средств, которые были бы эффективны в отношении изолированных бактериальных штаммов и бактериальных сообществ, формирующих биопленки.

Разработка и создание покрытий с антимикробными свойствами имеют большое практическое значение и находят применение в различных сферах [15–17]. Так, системы упаковки пищевых продуктов, содержащие противомикробные препараты, можно использовать не только для уменьшения количества патогенов, но и для борьбы с микроорганизмами, вызывающими порчу продуктов питания [18]. Такая упаковка изолирует пищу от окружающей среды и подавляет рост микроорганизмов, не влияя на ее состав [19]. Благодаря медленному и/или контролируемому высвобождению антибактериальных агентов, обеспечивается их ингибирование при транспортировке и хранении, что увеличивает срок годности продуктов [20, 21]. В медицинских учреждениях антимикробные покрытия применяют в качестве современного гигиенического метода борьбы с бактериальным загрязнением [22–24]. Существующие в настоящее время покрытия против бактериального обрастания и загрязнения способны: контролировать популяцию патогенов на поверхности и минимизировать риски возникновения резистентности к входящим в их состав противомикробным препаратам; быть стабильными и (эко)токсикологически безопасными; доступными и легко реализуемыми в больничных условиях [25–27]. Последние достижения в области архитектоники наноматериалов привели к появлению антибактериальных наночастиц, которые могут быть полезны в текстильной промышленности, с целью повышения антибактериальных свойств тканей, контроля распространения патогенных бактерий и связанных с ними инфекций среди людей, а также безопасных для здоровья человека и окружающей среды. Такие наночастицы внедряют на поверхность ткани при помощи плазменной техники, лазерной обработки, катионизации, а также путем их функционализации или модификации поверхности текстиля. Более того, в ткань внедряют биосенсорные наночастицы для мониторинга болезненных состояний человека [28–30]. Антимикробные свойства материалов применяются при строительстве учреждений, где требуются высокие стандарты гигиены для предотвращения образования бактериальных биопленок, плесени и грибка, а также для защиты сооружений от биодеградации [31, 32]. Антибактериальные агенты вводятся путем нанесения краски или покрытия на готовую поверхность после строительства, путем смешивания неорганических добавок (металлические наночастицы, оксиды металлов) с бетоном или раствором во время строительства и путем смешивания антимикробных агентов при изготовлении строительных материалов [33]. Создание защитного слоя в виде краски или покрытия, который проявляет активность против широкого спектра микроорганизмов и стабилен в широком диапазоне pH, является более востребованным в строительной сфере [34–36].

Таким образом, современные антибактериальные покрытия в медицинской и пищевой промышленности должны соответствовать таким критериям, как эффективность, безопасность и долговечность. В обзоре рассмотрены основные виды существующих антибактериальных покрытий, механизмы действия покрытий и их составных компонентов. Проведена оценка преимуществ и недостатков для дальнейшего проектирования будущих противомикробных материалов.

ВИДЫ АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

За последние два десятилетия внимание ученых и производителей биомедицинской продукции было сосредоточено на разработке покрытий, способных противостоять бактериальной колонизации, которые можно было бы наносить на различные поверхности и устройства [37, 38]. Антибактериальные покрытия (рис. 1) в зависимости от механизма их действия подразделяются на противомикробные покрытия контактного типа [39–41] и покрытия на основе релиза, антиадгезивные противомикробные покрытия [42–45], многофункциональные покрытия [46–48] и интеллектуальные противомикробные покрытия [49–51].

Более ранние конструкции антибактериальных покрытий по стратегии предотвращения бактериальной адгезии и последующего образования биопленок были в основном монофункциональными. Они основывались на антибактериальном эффекте, инактивирующем микроорганизмы, при контакте с поверхностью или препятствовали их прикреплению [52, 53]. Первыми в этой области были покрытия с оксидом меди, мышьяком, оксидом ртути и производными органоолова, которые предотвращали биообрастание морских судов [54, 55]. С 1906 года начались разработки антикоррозионных и противообрастающих красок для морских судов на основе оксида цинка и ртути [56]. В 1954 г. G.J.M. Der Van Kerk и J.G.A. Luijten показали биоцидные свойства оловоорганических соединений [57], которые в дальнейшем получили широкое распространение

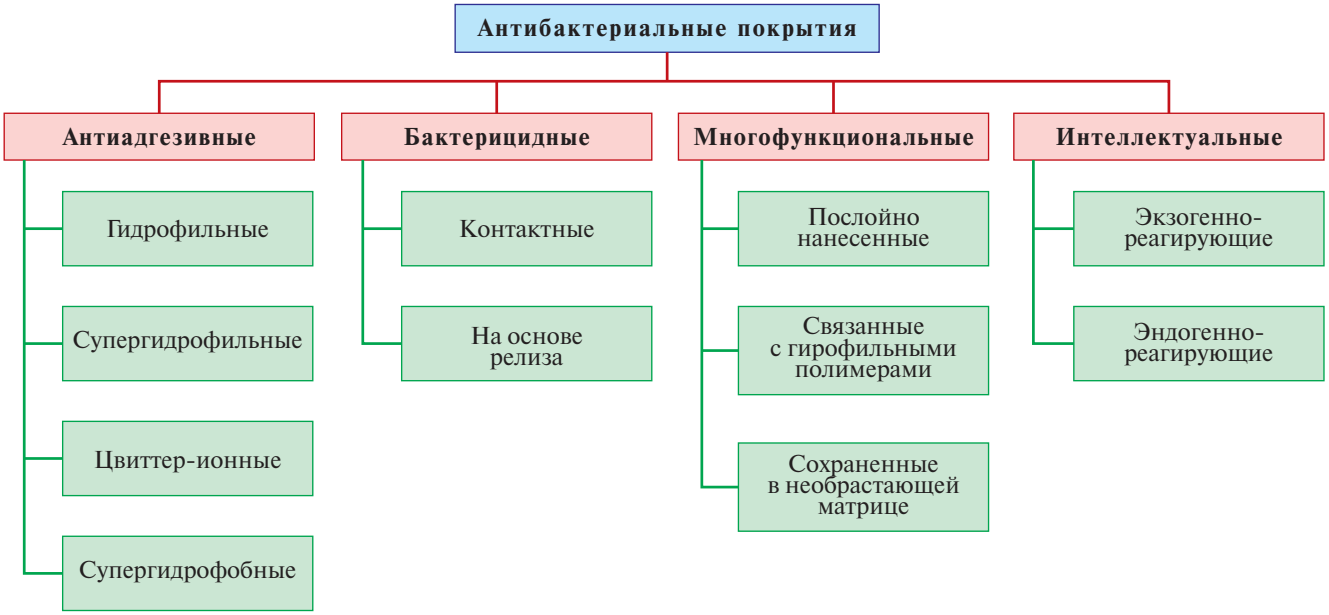

Рис. 1. Классификация основных видов антибактериальных покрытий.

в качестве эффективных противообрастающих покрытий. В 1995 г. были разработаны полиуретановые пленки, содержащие четвертичные аммониевые соединения, демонстрирующие высокую биоцидную активность против *Escherichia coli* [58], и полимерные покрытия, модифицированные нитратом серебра, которые проявляли антибактериальный эффект в отношении *Staphylococcus epidermidis* [59]. Lowe A.B. и др. в 2000 г. описали статистический сополимер бутилакрилата с сульфобетаинами, который при адсорбции на пластиковых дисках снижал адгезию *Pseudomonas aeruginosa*, макрофагов и фибробластов [60].

Современные покрытия против бактериального загрязнения и обрастания сосредоточены на синергическом сочетании антибактериального и антиадгезионного эффектов в форме многофункциональных, интеллектуальных покрытий или межфазных материалов [61]. Первый пример интеллектуального покрытия, состоящего из производных цвиттер-ионных полимеров, которые могут быстро переключать свои химические структуры и обладают антибактериальными, антиадгезивными свойствами и способностью к самоочищению, был описан Cheng G. и др., 2008 г. [62]. В дальнейшем методом интерферометрической литографии и поверхностной полимеризации были получены наноструктурированные покрытия, состоящие из термочувствительного поли-*N*-изопропилакриламида и четвертичной аммониевой соли, которые в ответ на изменения температуры обладают биоцидными свойствами и способностью к высвобождению инактивированных бактерий [63]. В 2018 г. методом последовательного осаждения слоя золотых наночастиц и пленки лизоцима с фазовым переходом была изготовлена гибридная пленка, которая под воздействием лазерного излучения в ближнем инфракрасном диапазоне обладала бактерицидной активностью, а погружение ее в витамин С способствовало удалению убитых бактерий и регенерации поверхности [64]. В последние годы при разработке различных покрытий активно внедряются методы машинного обучения. В 2021 г. был разработан метод машинного обучения (с использованием модели искусственной нейронной сети и модели на основе регрессии опорных векторов), с помощью которого были синтезированы новые антиадгезивные полимерные щетки, которые продемонстрировали превосходную устойчивость к адсорбции белка при оптимальной толщине пленки [65].

Антибактериальные покрытия контактного типа и покрытия на основе релиза антибактериальных веществ

Бактерицидные покрытия обеспечивают надежный и простой способ предотвратить образование биопленки, оказывая биоцидное воздействие на бактерии, прикрепленные к поверхности или находящиеся во взвешенном состоянии вблизи поверхности [5]. Они основаны на введении антибактериальных агентов в материал или на его поверхность, которые посредством постепенного высвобождения агентов (рис. 2б) или контактного действия (рис. 2а) инактивируют, повреждают или препятствуют росту бактерий [66, 61]. Различные биоциды фиксируются на поверхности методом погружения покрытия в антимикробное вещество, распыления и центрифугирования, а также используя технику послойного нанесения или модификацию поверхности различными полимерами [52]. Контактные покрытия можно разделить на неорганические и органические.

Неорганические антимикробные покрытия представлены наночастицами металлов и их оксидов (Ag, Au, Zn, Mg и Cu) [67] и антибиотиками (аминогликозиды, хинолоны, пенициллины, гликопептиды, тетрациклины, рифамицины) [68]. Органические антимикробные покрытия, представлены четвертичными аммониевыми солями (ЧАС) [69] и природными органическими веществами (антимикробные пептиды (АМП), ферменты и полисахариды (хитозан)) [70–72]. Наночастицы металлов и их оксидов являются эффективным антибактериальным агентом, поскольку могут проникать в бактериальные клетки через ионные каналы и запускать реакцию Фентона с образованием избыточных активных форм кислорода, повышать проницаемость бактериальной клеточной стенки и окислительный стресс в организме бактериальной клетки; могут образовывать вторичные токсичные метаболиты, влияя на метаболическую активность бактерий; вызывать изменения в генетической информации бактерий (например, 16S рДНК) [73]. Покрытия, высвобождающие антибиотики, способны доставлять их непосредственно к месту действия, что обеспечивает более высокую эффективность и позволяет избежать введения антибиотиков в высокой дозе, системную токсичность и развитие лекарственной устойчивости [74]. Антибиотики способны ингибировать синтез белка бактериальной клетки, репликацию и транскрипцию ДНК, воздействуя на ДНК-топоизомеразы II и IV или путем связывания с РНК-полимеразой, нарушать синтез пептидогликана клеточной стенки посредством ферментативного ингибирования или связываясь с аминокислотами [75, 76]. Многообещающим кандидатом на замену обычным антибиотикам считают АМП (рис. 2в) из-за их широкого спектра и неспецифического антибактериального механизма действия [77]. Они прикрепляются к поверхности бактериальной клеточной мембраны, что приводит к образованию различных форм повреждения мембран; препятствуют синтезу ДНК и РНК и ингибируют активность ферментов, вызывая гибель бактерий. Кроме того, АМП проявляют превосходную антибиопленочную активность. Катионные молекулы (например, ЧАС) могут эффективно убивать бактерии благодаря контактному эффекту уничтожения [78]. Они могут сначала адсорбироваться на стенке бактериальной клетки посредством электростатического действия, а затем диффундировать внутрь, нарушая потенциал мембраны, что приводит к повреждению мембраны, утечке цитоплазмы и гибели бактерий [73]. Хитозан и его производные проявляют антибактериальную активность в отношении грибов, грамположительных и грамотрицательных бактерий. Антибактериальная активность этого полимера может быть связана с взаимодействием аминогрупп хитозана с электроотрицательными зарядами поверхности бактериальной клетки, что приводит к утечке внутриклеточных компонентов [79]. Кроме того, он обладает биоразлагаемостью, биосовместимостью, полиморфизмом и сорбционными свойствами [80]. Антибактериальные ферменты способны напрямую атаковать микроорганизм, препятствовать образованию биопленки, разрушать биопленку и/или катализировать реакции, которые приводят к выработке противомикробных соединений [81]. Поверхности на основе релиза проявляют свою антибактериальную активность при высвобождении антибактериальных агентов методом диффузии, эрозии, деградации или гидролиза ковалентных связей в окружающую среду [82]. Соединения высвобождаются с поверхности материала, и антибактериальная активность происходит локально, только там, где это необходимо. В зависимости от антибактериального агента, включенного в матрицу, покрытия на основе релиза способны высвобождать антибиотики (пенициллин, хлортетрациклин, стрептомицин, ванкомицин), ионы и оксиды металлов (Ag, Zn и Cu) и неметаллические материалы фтор (F) [83, 84, 27]. В качестве носителя в таких поверхностях используют полиметакриловую кислоту, полиакриловую кислоту, сополимеры на основе молочной и гликолевой кислот, гидроксиапатит, полиуретан, гиалуроновую кислоту, хитозан и керамические наночастицы. Поверхности на основе высвобождения антибактериальных веществ получают путем пропитывания пористого материала или покрытия желаемым антибактериальным соединением, методом послойного нанесения или плазменного напыления полиэлекторлитов [85, 86, 52].

Основным недостатком таких покрытий являются ограниченные запасы антибактериальных агентов, которые делают покрытия непригодными после их истощения, а также токсичность некоторых антибактериальных веществ (ЧАС, наночастицы и ионы металлов). Наночастицы проникают в клетки и впоследствии оказывают токсическое воздействие на внутриклеточные структуры. Они вызывают повреждение митохондрий, окислительный стресс и аутофагию [87, 88], а в высоких концентрациях – некроз и апоптоз клеток [89]. Оксиды металлов (ZnO, MgO, CuO) также обладают цитотоксичностью и вызывают апоптоз, аутофагию, окислительный стресс и некроз [90]. Накопление инактивированных бактерий и внутриклеточных компонентов не только снижает эффективность покрытия, но и может способствовать образованию биопленок [61] и вызывать иммунные реакции или воспаление. Кроме того, большинство биоцидных агентов заряжены положительно и могут электростатически взаимодействовать с белками. Более того, в основе разных биоцидных методов лежат разные механизмы уничтожения, и каждый метод эффективен для определенного типа бактерий. С появлением бактериальных штаммов с множественной лекарственной устойчивостью, подходы, использующие единый механизм уничтожения, становятся менее эффективными [5]. Так, например, материалы на основе серебра обладают сильным

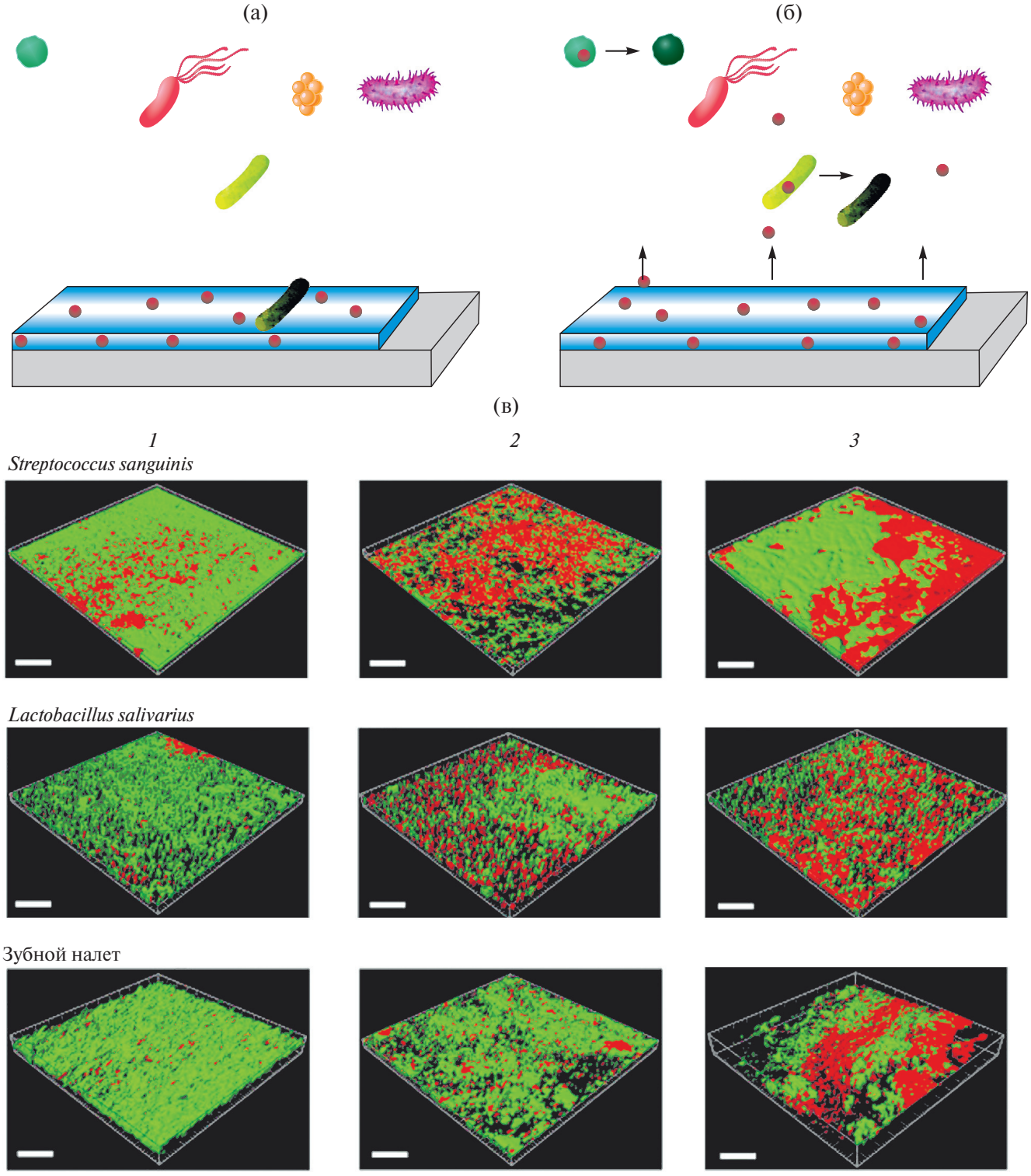

Рис. 2. а – Схематическое изображение механизма действия антибактериальных покрытий контактного типа; б – схематическое изображение механизма действия антибактериальных покрытий на основе релиза; в – изображения жизнеспособных клеток (зеленые) и мертвых бактерий (красные) *S. sanguinis*, *L. salivarius* и зубного налета, полученные с помощью конфокальной микроскопии с 20-кратным увеличением объектива через 4 недели инкубации при 37°C: *1* – на титановой поверхности, *2* – на титановой поверхности с электроосаждением серебра, *3* – на титановой поверхности, покрытой силаном триэтоксисилилпропилянтарным ангидридом, с иммобилизованнным пептидом hLf1–11. Воспроизведено из работы [39], с разрешения Американского химического общества, 2015 г.

бактерицидным действием, однако их активность со временем снижается, поскольку покрытия постоянно выделяют биоцидный агент. В случае покрытий на основе поликатионных полимеров может потребоваться обработка поверхности катионным поверхностно-активным веществом для восстановления антимикробной активности. Низкомолекулярные бактерицидные средства часто вызывают резистентность и со временем постепенно теряют свою эффективность [91].

Антиадгезионные противомикробные покрытия

Поверхностные характеристики материалов, включая поверхностный заряд, свободную энергию, морфологию, смачиваемость и т.д., оказывают важное влияние на бактериальную адгезию [92]. Бактерии могут прикрепляться к различным поверхностям и образовывать биопленки посредством неспецифических взаимодействий, таких как водородные связи, электростатические силы, гидрофобные взаимодействия и силы Ван-дер-Ваальса (рис. 3а). Таким образом, бактериальная адгезия на поверхности имплантированных устройств способствует возникновению девайс-ассоциированных инфекций и является основной причиной разработки антиадгезионных покрытий [93]. Чтобы предотвратить развитие биопленок на поверхностях биоматериалов, поверхность должна быть способна предотвращать начальную адгезию бактерий [22]. Антиадгезионные покрытия – это функциональные покрытия, созданные посредством модификации поверхности материалов, с изменением их физико-химических свойств (шероховатость, степень смачиваемости, заряд и т.д.), что препятствует адгезии бактерий, грибов и белков (рис. 3б) [94]. Действие таких покрытий основано на стерическом, электростатическом и супергидрофобном эффектах, которые можно наблюдать на гидрофильных, супергидрофильных, заряженных и супергидрофобных поверхностях, соответственно (рис. 3в) [52]. Гидрофильные поверхности препятствуют прикреплению клеток и бактерий за счет того, что они покрыты слоем молекул воды, тесно связанного водородными связями с гидрофильным материалом, и играют роль физического и энергетического барьера, который необходимо преодолеть для адсорбции. Гидрофильные полимеры также могут в некоторой степени ингибировать прикрепление бактерий, однако высокие противообрастающие свойства приобретаются только тогда, когда стерическое отталкивание дополняет поверхностную гидратацию [95]. Так, высокогидратированные полимеры, такие как полиэтиленгликоль (ПЭГ), нейтральные и гидрофильные полимеры поли-2-алкил-2-оксазолин продемонстрировали способность снижать бактериальную и белковую адгезию за счет стерических препятствий [96, 97]. Гидрофильные покрытия получают методом физической, химической адсорбции, прямым ковалентным присоединением и блочной или привитой сополимеризацией [98]. Лазерная обработка покрытий на основе металлов, обладающих антибактериальными свойствами, позволяет получать супергидрофильные покрытия. В зоне воздействия лазерного луча поверхность нагревается и происходит плавление, сублимация и взрывная абляция материала. При этом частицы металла удаляются с поверхности и впоследствии осаждаются, формируя микрорельеф вокруг зоны воздействия в виде микро- и наночастиц. Благодаря высокой смачиваемости супергидрофильных покрытий увеличивается площадь контакта и ионы металлов из образовавшихся наночастиц более эффективно переносятся в жидкость, вызывая окислительный стресс бактериальных клеток. Кроме того, формирование иерархической пористости поверхности приводит к гибели бактерий в результате перфорации и деформации мембраны элементами нанотекстуры и потери внутриклеточной жидкости [99–101]. По сравнению с гидрофильными полимерами, взаимодействие связанной воды посредством ионного сольватирования сильнее, чем слой воды с водородными связями, что усиливает противообрастающую природу цвиттер-ионных поверхностей [102]. Поверхности, функционализированные цвиттер-ионными полимерами, которые в своей структуре имеют равномерное распределение анионных и катионных групп вдоль их основной цепи, демонстрируют противообрастающие свойства. К ним относятся полиметакрилоилоксиэтилфосфорилхолин, полисульфобетаинметакрилат и полисульфобетаинакриламид, поскольку они содержат, с одной стороны, катионную четвертичную аммониевую соль, а с другой стороны, анионные карбоксилатные, фосфатные и сульфатные группы соответственно [103]. Помимо эффекта стерического препятствия этого гидратационного слоя, катионные группы также могут убивать бактерии при контакте. Кроме того, функционализированные цвиттер-ионными полимерами поверхности более универсальны и стабильны независимо от температуры и концентрации соли, чем функционализация ПЭГ. В связи с чем эти полимеры широко используются в качестве антибактериальных покрытий [104]. Супергидрофобные поверхности привлекли большое внимание своими превосходными свойствами самоочищения и возможностью применения в различных отраслях промышленности [105]. Угол контакта с водой таких поверхностей превышает 150°, и, следовательно, их трудно смачивать. Супергидрофобность снижает силу адгезии между бактериями и поверхностью и облегчает удаление первоначально прилипших бактерий до образования биопленки [106, 52, 22]. Такое явление объясняется двумя физическими принципами: низкой поверхностной энергией и шероховатыми структурами в микроскопическом масштабе. Химия и топография поверхности являются основными факторами, которые мешают взаимодействию

на границе раздела жидкость-твердое тело. Поверхностная энергия влияет на адгезию веществ к границе раздела, включая жидкости и микроорганизмы. Низкая поверхностная энергия снижает работу адгезии и, следовательно, увеличивает гидрофобность [107]. Супергидрофобные поверхности достигаются путем подготовки микро/наноструктур и их последующей пассивации молекулами с низкой поверхностной энергией [7]. Методы получения супергидрофобных противообрастающих покрытий включают химическое и физическое травление, метод погружения, золь-гель метод, химическое осаждение из паровой фазы, фотолитографию, центрифугирование, электропрядение, послойное осаждение и/или их комбинацию [108]. Однако превосходную долговечность функциональных свойств для таких поверхностей демонстрирует метод лазерного текстурирования [109, 110].

Противообрастающие покрытия только предотвращают адгезию бактерий, а не устраняют их (рис. 3г). Поэтому со временем происходит увеличение концентрации планктонных бактерий в субстрате, что способствует бактериальной обсемененности и приводит к возникновению инфекций. Кроме того, гидрофильные полимеры могут постепенно нейтрализоваться, пассивироваться или разлагаться другими соединениями, такими как белки, соли и амфифилы. Любые локальные дефекты супергидрофобных покрытий могут

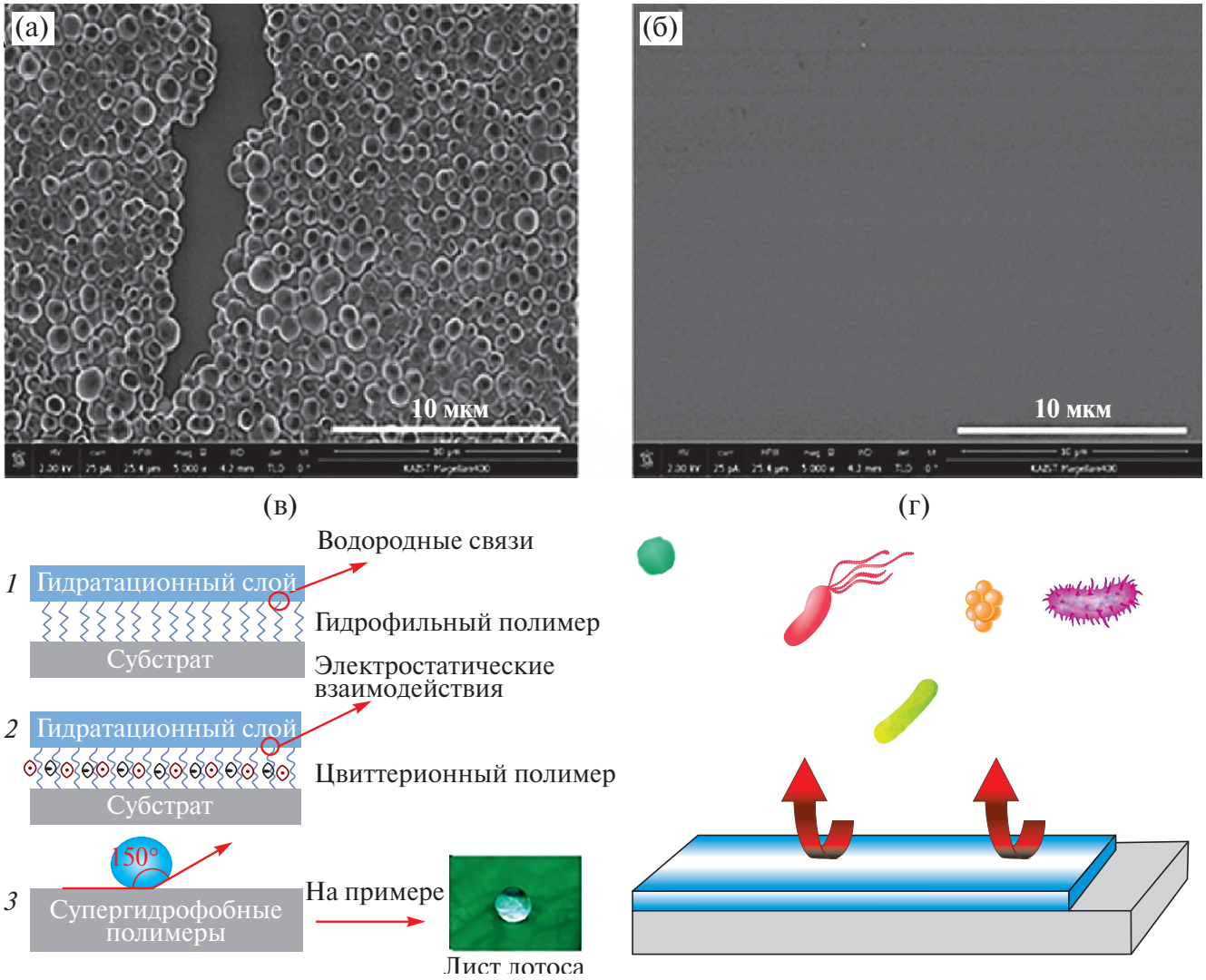

Рис. 3. а – электронная микрофоторгафия 7-дневной биопленки *S. aureus* на поверхности без покрытия; б – электронная микрофоторгафия покрытия из полидодецилметакрилат-полиэтиленгликоль метакрилат-акриловой кислоты, препятствующей образованию биопленки из *S. aureus* в течение 7 дней. Воспроизведено из работы [43], с разрешения Американского химического общества, 2017 г.; в – схематические изображения антиадгезионных покрытий. (*1*) – гидрофильные полимеры, (*2*) – цвиттерионные покрытия, (*3*) – супергидрофобные покрытия, угол контакта с водой более 150°, как у листа лотоса. Воспроизведено из работы [93], с разрешения 2020 John Wiley & Sons, Inc.; г – схематическое изображение механизма действия антиадгезионного покрытия.

выступать в качестве мест локальной адгезии для бактерий с последующим формированием биопленок.

Многофункциональные антимикробные покрытия

Достижения в области антибактериальных и противообрастающих покрытий обеспечили основу для разработки многофункциональных покрытий [111–113]. Они представляют собой класс противомикробных материалов, которые помимо инактивации бактерий обладают дополнительными возможностями, такими как долговременная активность, стабильность и возможность восстановления. Различные исследования показали, что такие покрытия могут уменьшить количество бактерий на поверхности более чем на 99% по сравнению с поверхностью без покрытия [114–116]. Механизм действия многофункциональных антибактериальных покрытий (рис. 4а) включает: антибиообрастание, бактерицидность и удаление мертвых и/или живых прикрепленных бактерий. Таким образом, поверхность может противостоять или предотвращать первоначальную адгезию и распространение бактерий за счет стерического и электростатического отталкивания или за счет сниженной поверхностной энергии, а если бактерии вступают в контакт или частично прикрепляются к ней, бактерицидные добавки, содержащиеся в покрытиях, уничтожают их (рис. 4б, в) [117, 118]. В зависимости от метода, используемого для включения антибактериальных агентов в антиадгезионные материалы, такие поверхности можно разделить на три категории: связанные с гидрофильными полимерами, послойно нанесенные или сохраненные в необрастающей матрице и высвобождающиеся из нее. В качестве антибактериальных агентов могут быть использованы природные и синтетические химические вещества, такие как соединения ЧАС, противомикробные ферменты, АМП, хитозан и бактериофаги [119]. Такие покрытия получают методом последовательного нанесения слоев, химической модификации, плазменным осаждением, ковалентным связыванием, методом конъюгации, иммобилизации и прививочной полимеризации [120].

Несмотря на высокую эффективность многофункциональных покрытий, остается много нерешенных проблем в практике их применения и изготовления. Бактерицидные агенты, входящие в состав таких покрытий, имеют недостатки, связанные со стабильностью при хранении, долгосрочной эффективностью, биосовместимостью, стоимостью и трудоемкостью внедрения их в состав покрытия. Кроме того, достаточно сложно подобрать материалы для разработки покрытия, которые проявляют хорошую биоцидную активность, свойства устойчивости к бактериям и удалению погибших бактерий. При применении многофункциональных покрытий на медицинских устройствах необходимо учитывать их состав, поскольку не всегда материалы, сочетающие в себе антибактериальные и антиадгезивные свойства, могут быть универсальным средством борьбы с бактериальными инфекциями. Например, использование антиадгезивных материалов недопустимо при изготовлении ортопедических и зубных имплантатов, поскольку поверхности должны подавлять бактериальную колонизацию и одновременно способствовать адгезии остеобластов [121]. При этом применение антиадгезивных материалов при изготовлении многофункциональных покрытий для мочевых и внутрисосудистых катетеров усиливают бактерицидные свойства поверхности, т.к. не требуют особых условий

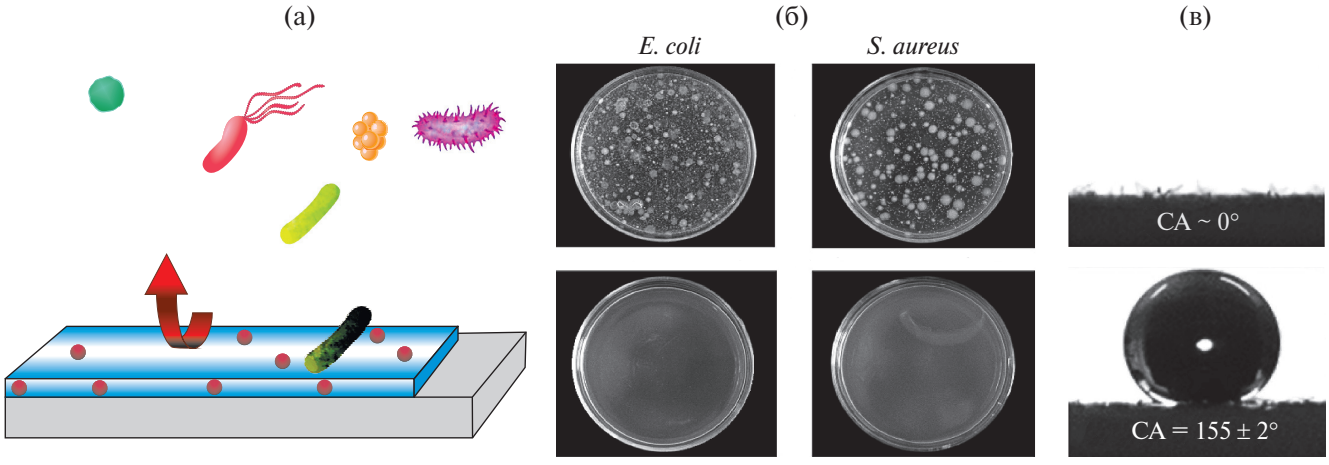

Рис. 4. а – схематическое изображение механизма действия многофункционального антибактериального покрытия; б – антибактериальная активность хлопчатобумажной ткани без покрытия и с покрытием, содержащим полиэтиленимин, фитиновую кислоту, ион железа (Fe^{3+}) и диметилоктадецил [3-триметоксисилил-пропил] хлорид аммония в отношении *E. coli* и *St. aureus* соответственно; в – оптические изображения капель воды, помещенных на хлопчатобумажные ткани без покрытия и с многофункциональным покрытием соответственно. Воспроизведено из работы [48], с разрешения Elsevier B.V., 2022 г.

помимо антибактериальных свойств [122]. Более того, для практического применения изготовление поверхностей должно быть простым, недорогим и воспроизводимым. Для объектов, контактирующих с морской водой, необходимо, чтобы поверхности демонстрировали повышенную коррозионную стойкость и долговечность, а также стойкость к обрастанию различными организмами, которые могут колонизировать любые подводные поверхности [123]. Следует отметить, что для биомедицинских применений необходимо в первую очередь определить токсические эффекты антибактериальных поверхностей и улучшить их биосовместимость [124].

Интеллектуальные антимикробные покрытия

В последние годы были разработаны интеллектуальные антибактериальные покрытия, которые сочетают антиадгезационные, бактерицидные и самоочищающиеся функции и реализуют контролируемое высвобождение антибактериальных агентов с помощью физических и химических подходов, тем самым достигая длительного воздействия, уменьшая

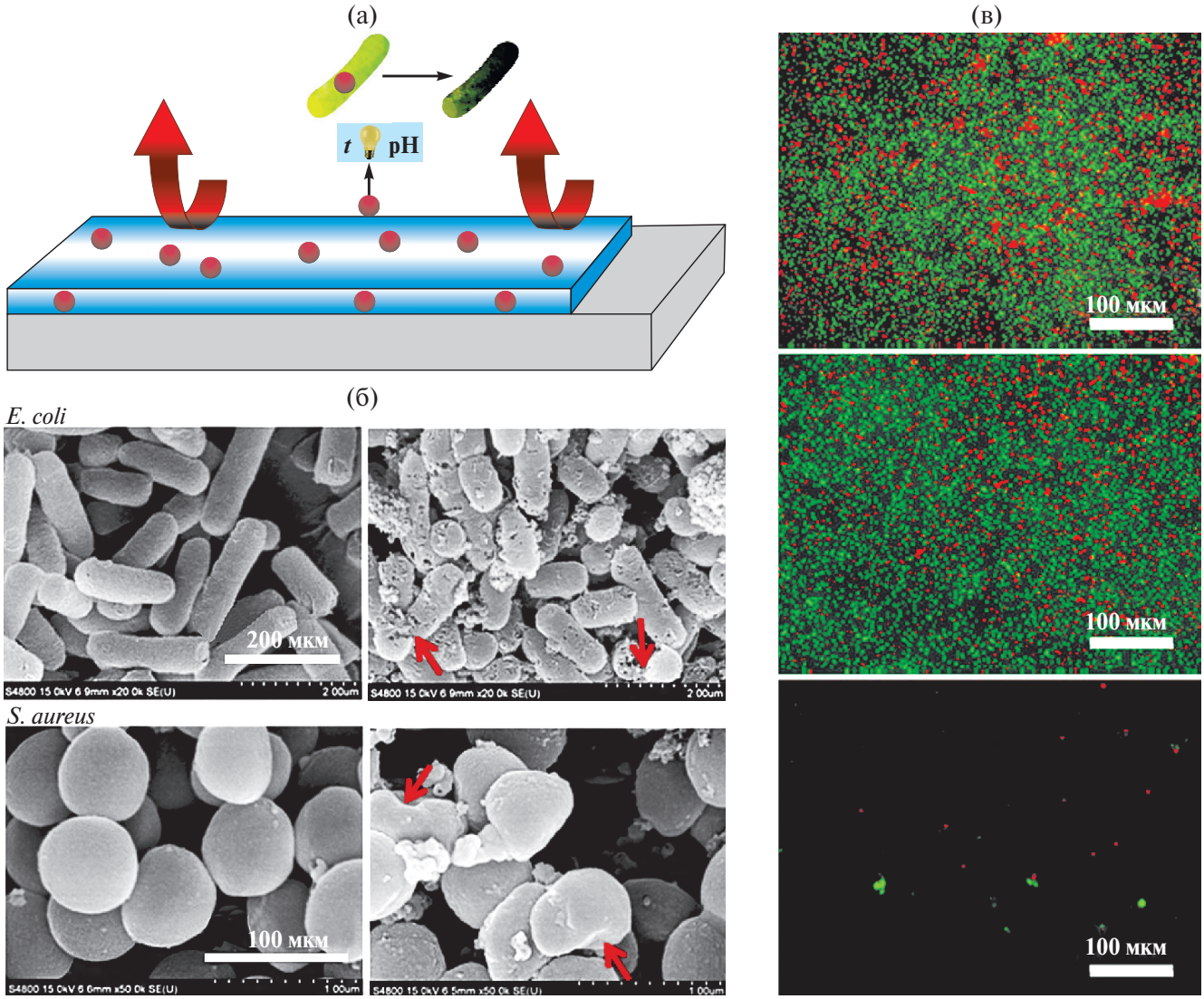

Рис. 5. а – схематическое изображение механизма действия интеллектуального антибактериального покрытия; б – электронные микрофотографии *E. coli* и *S. aureus*, культивируемых с углеродными капсулами, модифицированными полиэтиленгликолем и легированными азотом с облучением лазером 808 нм и без него. Воспроизведено из работы [138], с разрешения Американского химического общества, 2018 г.; в – изображения жизнеспособных клеток (зеленые) и мертвых бактерий (красные) *S. aureus*, полученные с помощью конфокальной микроскопии 3D-нанопористой поверхности без покрытия, 3D-нанопористой поверхности с покрытием дубильной кислотой, 3D-нанопористой поверхности с покрытием дубильной кислотой и гентамицина соотвественно. Воспроизведено из работы [129], с разрешения Американского химического общества, 2015 г.

потенциальные побочные эффекты (рис. 5а). Таким образом, интеллектуальные антибактериальные покрытия считаются наиболее оптимальными из всех существующих покрытий. Их можно разделить на эндогенно- и экзогенно-реагирующие типы [125]. Эндогенно-чувствительные покрытия в первую очередь включают реакцию на pH и бактериальные секреции. Первое в основном стимулируется посредством подкисления среды бактериальной инфекцией [126], тогда как последнее относится к реакции на различные ферменты (такие как фосфолипаза, гиалуронидаза, холестеринэстераза и металлопротеаза) или токсины, секретируемые в ходе метаболического процесса [127, 128]. Обычные чувствительные к pH покрытия получают методом электростатических взаимодействий. Например, покрытия, содержащие отрицательно заряженные молекулы и положительно заряженные антибиотики, получают методом послойной самосборки [129–132], или для синтеза используют кислотно-чувствительные основания Шиффа [133, 134], координационные связи металлов [135] и эфиры борной кислоты [136, 137]. Кроме того, покрытия, чувствительные к pH, могут быть получены на основе реактивного связывания между наночастицами и лекарственными средствами, а также чувствительных молекул, таких как полиметакриловая кислота [138]. Экзогенно-стимулированные покрытия проявляют антибактериальную активность при стимуляции внешних условий. Такие покрытия могут решить проблемы плохой стабильности, неконтролируемого высвобождения лекарств и появления бактериальной резистентности. К экзогенно-чувствительным покрытиям относятся поверхности, реагирующие на изменение температуры, светочувствительные поверхности, которые активируются под действием света, и биоэлектрические поверхности, активирующиеся под действием внешнего электрического поля [139–141]. Такие покрытия получают методом ковалентной связи, процессом осаждения из паровой фазы, нанесением многослойных пленок или гидрогелевых покрытий, содержащих чувствительные к ферментам компоненты, посредством фотополимеризации или сочетанием нескольких методов [127].

Анализ проведенных исследований указывает на большой потенциал интеллектуальных антибактериальных покрытий для практического применения, однако существует много возможностей для совершенствования текущих методов покрытия, чтобы сделать их более эффективными, универсальными и экономически выгодными. Перспективным в этом направлении будет создание интеллектуальных покрытий, которые обладают способностью активировать биоцидную активность в ответ на изменение определенных биологических микросред, а также усовершенствование их стабильности, долговечности и снижение цитотоксичности [142].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние десятилетия проводят активные исследования в области усовершенствования антибактериальных покрытий и придания им новых свойств, таких как возможность регенерации и очищения от погибших бактерий. Кроме того, комбинация нескольких антибактериальных агентов или сочетание различных видов антибактериальных покрытий улучшают их эффективность и долговечность. Так, например, в многофункциональных материалах, где в покрытия включено более одной стратегии защиты (супергидрофобная и антиадгезивная), происходит более эффективное предотвращение бактериальной адгезии, а если в составе имеются высвобождаемые антимикробные вещества, то при контакте с ними микробные клетки будут инактивироваться. Кроме того, снижается потребность и использование антибактериального агента, и срок службы такого покрытия может быть значительно выше, чем у антибактериальных поверхностей контактного типа. Интеллектуальные покрытия, созданные на основе активизации антибактериальных агентов в ответ на изменение факторов окружающей среды, делают поверхности еще более эффективными долговечными, экологичными и востребованными. Таким образом, дальнейшие исследования антибактериальных покрытий следующего поколения должны быть посвящены поиску новых и расширению существующих механизмов действия против бактерий и разработке дополнительных путей их активации, а также получению поверхностей, обладающих множественными интегрированными функциями.

Область разработки антимикробных и противообрастающих поверхностей является многообещающей, и потенциал для большого и быстрого воздействия за счет внедрения разработанных технологий очевиден. Большое количество описанных в литературе разработок и исследований в области создания антибактериальных покрытий не доходят до практического применения и даже до клинических исследований. Это связано с тем, что в лабораторных условиях для тестирования антибактериальных материалов сложно создавать условия, происходящие в живых организмах. Использование искусственного интеллекта и цифровых инструментов могут помочь решить эти проблемы. Так, аналитические инструменты помогают быстро и точно обрабатывать, и анализировать огромные объемы данных, а искусственный интеллект, анализируя химическую структуру покрытий, помогает определять токсичность материалов и подбирать соединения для включения их в состав, экономя время, ресурсы и минимизируя риски неблагоприятных последствий при проведении клинических испытаний.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного Фонда и Академии наук Республики Татарстан по проекту № 24-26-20074.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jiang C.C., Cao Y.K., Xiao G.Y. et al.* A review on the application of inorganic nanoparticles in chemical surface coatings on metallic substrates // RSC Advances. 2017. V. 7. № 13. P. 7531–7539. https://doi.org/10.1039/C6RA25841G
2. *Kausar A.* Polymer coating technology for high performance applications: Fundamentals and advances // Journal of Macromolecular Science, Part A. 2018. V. 55. № 5. P. 440–448. https://doi.org/10.1080/10601325.2018.1453266
3. *Makvandi P., Wang C.Y., Zare E.N. et al.* Metal-based nanomaterials in biomedical applications: Antimicrobial activity and cytotoxicity aspects // Advanced Functional Materials. 2020. V. 30. № 22. P. 1910021. https://doi.org/10.1002/adfm.201910021
4. *Erkoc P., Ulucan-Karnak F.* Nanotechnology-based antimicrobial and antiviral surface coating strategies // Prosthesis. 2021. V. 3. № 1. P. 25–52. https://doi.org/10.3390/prosthesis3010005
5. *Wei T., Yu Q., Chen H.* Responsive and synergistic antibacterial coatings: Fighting against bacteria in a smart and effective way // Advanced Healthcare Materials. 2019. V. 8. № 3. P. 18001381. https://doi.org/10.1002/adhm.201801381
6. *DeFlorio W., Liu S., White A.R. et al.* Recent developments in antimicrobial and antifouling coatings to reduce or prevent contamination and cross-contamination of food contact surfaces by bacteria // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2021. V. 20. № 3. P. 3093–3134. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12750
7. *Wang L., Guo X., Zhang H. et al.* Recent advances in superhydrophobic and antibacterial coatings for biomedical materials // Coatings. 2022. V. 12. № 10. P. 1469. https://doi.org/10.3390/coatings12101469
8. *Rezić I., Meštrović E.* Characterization of nanoparticles in antimicrobial coatings for medical applications – A review // Coatings. 2023. V. 13. № 11. P. 1830. https://doi.org/10.3390/coatings13111830
9. *Blair J.M., Webber M.A., Baylay A.J. et al.* Molecular mechanisms of antibiotic resistance // Nature reviews microbiology. 2015. V. 13. № 1. P. 42–51. https://doi.org/10.1038/nrmicro3380
10. *Давидович Н.В., Кукалевская Н.Н., Башилова Е.Н., Бажукова Т.А.* Основные принципы эволюции антибиотикорезистентности у бактерий (обзор литературы) // Клиническая лабораторная диагностика. 2020. Т. 65. № 6. С. 387–393. http://dx.doi.org/10.18821/0869-2084-2020-65-6-387-393
11. *Urban-Chmiel R., Marek A., Stępień-Pyśniak D. et al.* Antibiotic resistance in bacteria – A review // Antibiotics. 2022. V. 11. № 8. P. 1079. https://doi.org/10.3390/antibiotics11081079
12. *Cherednichenko Y., Batasheva S., Akhatova F. et al.* Antibiofilm activity of silver nanoparticles-halloysite nanocomposite in Serratia marcescens // Journal of Nanoparticle Research. 2024. V. 26. № 4. P. 71. https://doi.org/10.1007/s11051-024-05971-y
13. *Stewart P.S., Costerton J.W.* Antibiotic resistance of bacteria in biofilms // The lancet. 2001. V. 358. № 9276. P. 135–138. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(01)05321-1
14. *Чеботарь И.В., Маянский А.Н., Кончакова Е.Д. и др.* Антибиотикорезистентность биоплёночных бактерий // Клиническая микробиология и антимикробная химиотерапия. 2012. Т. 14. №. 1. С. 51–58.
15. *De Silva R.T., Pasbakhsh P., Lee S.M., Kit A.Y.* ZnO deposited / Encapsulated halloysite–poly (lactic acid) (PLA) nanocomposites for high performance packaging films with improved mechanical and antimicrobial properties // Applied Clay Science. 2015. V. 111. P. 10–20. https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.03.024
16. *Karthikeyan P., Mitu L., Pandian K. et al.* Electrochemical deposition of a Zn-HNT / P (EDOT-co-EDOP) nanocomposite on LN SS for anti-bacterial and anti-corrosive applications // New Journal of Chemistry. 2017. V. 41. № 12. P. 4758–4762. https://doi.org/10.1039/C6NJ03927H
17. *Stavitskaya A., Batasheva S., Vinokurov V. et al.* Antimicrobial applications of clay nanotube-based composites // Nanomaterials. 2019. V. 9. № 5. P. 708. https://doi.org/10.3390/nano9050708
18. *Mauriello G.* Chapter 11 - Control of microbial activity using antimicrobial packaging // Barros-Velazquez J. (ed). Antimicrobial Food Packaging. London, San Diego, USA: Academic Press. 2016. P. 141–152. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800723-5.00011-5
19. *Valencia-Chamorro S.A., Palou L., Del Río M.A., Pérez-Gago M.B.* Antimicrobial edible films and coatings for fresh and minimally processed fruits and vegetables: A review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2011. V. 51. № 9. P. 872–900. https://doi.org/10.1080/10408398.2010.485705

20. *Malhotra B., Keshwani A., Kharkwal H.* Antimicrobial food packaging: Potential and pitfalls // Frontiers in microbiology. 2015. V. 6. P. 611. https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00611
21. *Fu Y., Dudley E.G.* Antimicrobial-coated films as food packaging: A review // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2021. V. 20. № 4. P.3404–3437. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12769
22. *Pemmada R., Shrivastava A., Dash M. et al.* Science-based strategies of antibacterial coatings with bactericidal properties for biomedical and healthcare settings // Current Opinion in Biomedical Engineering. 2023. V. 25. P. 100442. https://doi.org/10.1016/j.cobme.2022.100442
23. *Paladini F., Pollini M., Sannino A., Ambrosio L.* Metal-based antibacterial substrates for biomedical applications // Biomacromolecules. 2015. V. 16. № 7. P. 1873–1885. https://doi.org/10.1021/acs.biomac.5b00773
24. *Jose A., Gizdavic-Nikolaidis M., Swift S.* Antimicrobial coatings: reviewing options for healthcare applications // Applied Microbiology. 2023. V. 3. № 1. P. 145–174. https://doi.org/10.3390/applmicrobiol3010012
25. *Adlhart C., Verran J., Azevedo N.F. et al.* Surface modifications for antimicrobial effects in the healthcare setting: A critical overview // Journal of Hospital Infection. 2018. V. 99. № 3. P. 239–249. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2018.01.018
26. *Simchi A., Tamjid E., Pishbin F., Boccaccini A.R.* Recent progress in inorganic and composite coatings with bactericidal capability for orthopaedic applications // Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine. 2011. V. 7. № 1. P. 22–39. https://doi.org/10.1016/j.nano.2010.10.005
27. *Chen X., Zhou J., Qian Y., Zhao L.* Antibacterial coatings on orthopedic implants // Materials Today Bio. 2023. V. 19. P. 100586. https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2023.100586
28. *Andra S., Balu S.K., Jeevanandam J., Muthalagu M.* Emerging nanomaterials for antibacterial textile fabrication // Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology. 2021. V. 394. P. 1355–1382. https://doi.org/10.1007/s00210-021-02064-8
29. *Dastjerdi R., Montazer M.* A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: Focus on anti-microbial properties // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2010. V. 79. № 1. P. 5–18. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2010.03.029
30. *Aguda O.N., Lateef A.* Recent advances in functionalization of nanotextiles: A strategy to combat harmful microorganisms and emerging pathogens in the 21st century // Heliyon. 2022. V. 8. №. 6. P. e09761. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09761
31. *Hochmannova L., Vytrasova J.* Photocatalytic and antimicrobial effects of interior paints // Progress in Organic Coatings. 2010. V. 67. № 1. P. 1–5. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2009.09.016
32. *Kocer H. B., Cerkez I., Worley S.D. et al.* N-halamine copolymers for use in antimicrobial paints // ACS Applied Materials & Interfaces. 2011. V. 3. № 8. P. 3189–3194. https://doi.org/10.1021/am200684u
33. *Kirthika S.K., Goel G., Matthews A., Goel S.* Review of the untapped potentials of antimicrobial materials in the construction sector // Progress in Materials Science. 2023. V. 133. P. 101065. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101065
34. *Gupta S., Puttaiahgowda Y.M., Nagaraja A., Jalageri M.D.* Antimicrobial polymeric paints: An up-to-date review // Polymers for Advanced Technologies. 2021. V. 32. № 12. P. 4642–4662. https://doi.org/10.1002/pat.5485
35. *Tornero A.F., Blasco M.G., Azqueta M.C. et al.* Antimicrobial ecological waterborne paint based on novel hybrid nanoparticles of zinc oxide partially coated with silver // Progress in Organic Coatings. 2018. V. 121. P. 130–141. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.04.018
36. *Bakina O., Pikuschak E., Prokopchuk A. et al.* Enhanced Biocidal Activity of Heterophase Zinc Oxide/Silver Nanoparticles Contained within Painted Surfaces // Coatings. 2024. V. 14. № 2. P. 241. https://doi.org/10.3390/coatings14020241
37. *Vasilev K., Cook J., Griesser H.J.* Antibacterial surfaces for biomedical devices // Expert Review of Medical Devices. 2009. V. 6. № 5. P. 553–567. https://doi.org/10.1586/erd.09.36
38. *Cavallaro A., Taheri S., Vasilev K.* Responsive and "smart" antibacterial surfaces: Common approaches and new developments // Biointerphases. 2014. V. 9. № 2. P. 029005. https://doi.org/10.1116/1.4866697
39. *Godoy-Gallardo M., Wang Z., Shen Y. et al.* Antibacterial coatings on titanium surfaces: A comparison study between in vitro single-species and multispecies biofilm // ACS Applied Materials & Interfaces. 2015. V. 7. № 10. P. 5992–6001. https://doi.org/10.1021/acsami.5b00402
40. *Bharadishettar N., Bhat K.U., Bhat Panemangalore D.* Coating technologies for copper based antimicrobial active surfaces: A perspective review // Metals. 2021. V. 11. № 5. P. 711. https://doi.org/10.3390/met11050711
41. *Ferreira T.P.M., Nepomuceno N.C., Medeiros E.L. et al.* Antimicrobial coatings based on poly (dimethyl siloxane) and silver nanoparticles by solution blow spraying // Progress in Organic Coatings. 2019. V. 133. P. 19–26. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.04.032
42. *Yu K., Lo J. C., Yan M. et al.* Anti-adhesive antimicrobial peptide coating prevents catheter associated

infection in a mouse urinary infection model // Biomaterials. 2017. V. 116. P. 69–81. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2016.11.047

43. *Keum H., Kim J.Y., Yu B. et al.* Prevention of bacterial colonization on catheters by a one-step coating process involving an antibiofouling polymer in water // ACS Applied Materials & Interfaces. 2017. V. 9. № 23. P. 19736–19745. https://doi.org/10.1021/acsami.7b06899
44. *Li X., Li P., Saravanan R. et al.* Antimicrobial functionalization of silicone surfaces with engineered short peptides having broad spectrum antimicrobial and salt-resistant properties // Acta Biomaterialia. 2014. V. 10. № 1. P. 258–266. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.09.009
45. *Banerjee I., Pangule R.C., Kane R.S.* Antifouling coatings: recent developments in the design of surfaces that prevent fouling by proteins, bacteria, and marine organisms // Advanced Materials. 2011. V. 23. № 6. P. 690–718. https://doi.org/10.1002/adma.201001215
46. *Raphel J., Holodniy M., Goodman S.B., Heilshorn S.C.* Multifunctional coatings to simultaneously promote osseointegration and prevent infection of orthopaedic implants // Biomaterials. 2016. V. 84. P. 301–314. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2016.01.016
47. *Liao T.Y., Easton C.D., Thissen H., Tsai, W.B.* Aminomalononitrile-assisted multifunctional antibacterial coatings // ACS Biomaterials Science & Engineering. 2020. V. 6. № 6. P. 3349–3360. https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.0c00148
48. *Li C. B., Wang F., Sun R. Y. et al.* A multifunctional coating towards superhydrophobicity, flame retardancy and antibacterial performances // Chemical Engineering Journal. 2022. V. 450. P. 138031. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138031
49. *Ni X., Li C., Lei Y. et al.* Design of a smart self-healing coating with multiple-responsive superhydrophobicity and its application in antibiofouling and antibacterial abilities // ACS Applied Materials & Interfaces. 2021. V. 13. № 48. P. 57864–57879. https://doi.org/10.1021/acsami.1c15239
50. *Li X., Wu B., Chen H. et al.* Recent developments in smart antibacterial surfaces to inhibit biofilm formation and bacterial infections // Journal of Materials Chemistry B. 2018. V. 6. № 26. P. 4274–4292. https://doi.org/10.1039/C8TB01245H
51. *Wei T., Yu Q., Zhan W., Chen H.* A smart antibacterial surface for the on-demand killing and releasing of bacteria // Advanced Healthcare Materials. 2016. V. 5. № 4. P. 449–456. https://doi.org/10.1002/adhm.201500700
52. *Olmo JA-D., Ruiz-Rubio L., Pérez-Alvarez L. et al.* Antibacterial coatings for improving the performance of biomaterials // Coatings. 2020. V. 10. № 2. P. 139. https://doi.org/10.3390/coatings10020139
53. *Jose A., Gizdavic-Nikolaidis M., Swift S.* Antimicrobial coatings: Reviewing options for healthcare applications // Applied Microbiology. 2023. V. 3. № 1. P. 145–174. https://doi.org/10.3390/applmicrobiol3010012
54. *Yebra D.M., Kiil S., Dam-Johansen K.* Antifouling technology – Past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings // Progress in Organic Coatings. 2004. V. 50. № 2. P. 75–104. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2003.06.001
55. *Li L., Hong H., Cao J., Yang Y.* Progress in marine antifouling coatings: Current status and prospects // Coatings. 2023. V. 13. № 11. P. 1893. https://doi.org/10.3390/coatings13111893
56. *Francis W.J.* Shipbottom paints. Past, present and future research and development on anticorrosive and antifouling shipbottom compositions // Journal of the American Society for Naval Engineers. 1954. V. 66. № 4. P. 857–866. https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1954.tb05931.x
57. *Van Kerk G.J.M.D., Luijten J.G.A.* Investigations on organo-tin compounds. III. The biocidal properties of organo-tin compounds //Journal of Applied Chemistry. 1954. V. 4. № 6. P. 314–319. https://doi.org/10.1002/jctb.5010040607
58. *Hazziza-Laskar J., Helary G., Sauvet G.* Biocidal polymers active by contact. IV. Polyurethanes based on polysiloxanes with pendant primary alcohols and quaternary ammonium groups // Journal of Applied Polymer Science. 1995. V. 58. № 1. P. 77–84. https://doi.org/10.1002/app.1995.070580108
59. *Jansen B., Kohnen W.* Prevention of biofilm formation by polymer modification // Journal of Industrial Microbiology. 1995. V. 15. № 4. P. 391–396. https://doi.org/10.1007/BF01569996
60. *Lowe A.B., Vamvakaki M., Wassall M.A. et al.* Well-defined sulfobetaine-based statistical copolymers as potential antibioadherent coatings // Journal of Biomedical Materials Research. 2000. V. 52. № 1. P. 88–94. https://doi.org/10.1002/1097-4636(200010)52:1%3C88::AID-JBM11%3E3.0.CO;2-%23
61. *Mu M., Wang X., Taylor M. et al.* Multifunctional coatings for mitigating bacterial fouling and contamination // Colloid and Interface Science Communications. 2023. V. 55. P. 100717. https://doi.org/10.1016/j.colcom.2023.100717
62. *Cheng G., Xue H., Zhang Z. et al.* A switchable biocompatible polymer surface with self-sterilizing and nonfouling capabilities // Angewandte Chemie International Edition. 2008. V. 47. № 46. P. 8831–8834. https://doi.org/10.1002/anie.200803570
63. *Yu Q., Cho J., Shivapooja P. et al.* Nanopatterned smart polymer surfaces for controlled attachment, killing, and release of bacteria // ACS Applied Materials & Interfaces. 2013. V. 5. № 19. P. 9295–9304. https://doi.org/10.1021/am4022279

64. *Qu Y., Wei T., Zhao J. et al.* Regenerable smart antibacterial surfaces: Full removal of killed bacteria via a sequential degradable layer // Journal of Materials Chemistry B. 2018. V. 6. № 23. P. 3946–3955. https://doi.org/10.1039/C8TB01122B

65. *Liu Y., Zhang D., Tang Y. et al.* Machine learning-enabled repurposing and design of antifouling polymer brushes //Chemical Engineering Journal. 2021. V. 420. P. 129872. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129872

66. *Kaur R., Liu S.* Antibacterial surface design – Contact kill // Progress in Surface Science. 2016. V. 91. № 3. P. 136–153. https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2016.09.001

67. *Nasri N., Rusli A., Teramoto N. et al.* Past and current progress in the development of antiviral / Antimicrobial polymer coating towards COVID-19 prevention: A Review // Polymers. 2021. V. 13. № 23. P. 4234. https://doi.org/10.3390/polym13234234

68. *Pan C., Zhou Z., Yu X.* Coatings as the useful drug delivery system for the prevention of implant-related infections // Journal of Orthopaedic Surgery and Research. 2018. V. 13. P. 220. https://doi.org/10.1186/s13018-018-0930-y

69. *Elena P., Miri K.* Formation of contact active antimicrobial surfaces by covalent grafting of quaternary ammonium compounds // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2018. V. 169. P. 195–205. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.04.065

70. *Yu K., Alzahrani A., Khoddami S. et al.* Rapid assembly of infection-resistant coatings: Screening and identification of antimicrobial peptides works in cooperation with an antifouling background // ACS Applied Materials & Interfaces. 2021. V. 13. № 31. P. 36784–36799. https://doi.org/10.1021/acsami.1c07515

71. *Alves D., Olívia Pereira M.* Mini-review: Antimicrobial peptides and enzymes as promising candidates to functionalize biomaterial surfaces // Biofouling. 2014. V. 30. № 4. P. 483–499. https://doi.org/10.1080/08927014.2014.889120

72. *Qu B., Luo Y.* A review on the preparation and characterization of chitosan-clay nanocomposite films and coatings for food packaging applications // Carbohydrate Polymer Technologies and Applications. 2021. V. 2. P. 100102. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100102

73. *Li W., Thian E.S., Wang M. et al.* Surface design for antibacterial materials: From fundamentals to advanced strategies // Advanced Science. 2021. V. 8. № 19. P. 2100368. https://doi.org/10.1002/advs.202100368

74. *Shahid A., Aslam B., Muzammil S., et al.* The prospects of antimicrobial coated medical implants // Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials. 2021. V. 19. P. 22808000211040304. https://doi.org/10.1177/22808000211040304

75. *Campoccia D., Montanaro L., Arciola C.R.* A review of the biomaterials technologies for infection-resistant surfaces // Biomaterials. 2013. V. 34. № 34. P. 8533–8554. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2013.07.089

76. *Zilberman M., Elsner J.J.* Antibiotic-eluting medical devices for various applications // Journal of Controlled Release. 2008. V. 130. № 3. P. 202–215. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2008.05.020

77. *Batoni G., Maisetta G., Esin S.* Antimicrobial peptides and their interaction with biofilms of medically relevant bacteria // Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes. 2016. V. 1858. № 5. P. 1044–1060. https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2015.10.013

78. *Chen R., Shi C., Xi Y. et al.* Fabrication of cationic polymer surface through plasma polymerization and layer-by-layer assembly // Materials and Manufacturing Processes. 2020. V. 35. № 2. P. 221–229. https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1675892

79. *Li J., Zhuang S.* Antibacterial activity of chitosan and its derivatives and their interaction mechanism with bacteria: Current state and perspectives // European Polymer Journal. 2020. V. 138. P. 109984. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109984

80. *Wrońska N., Katir N., Miłowska K. et al.* Antimicrobial effect of chitosan films on food spoilage bacteria // International Journal of Molecular Sciences. 2021. V. 22. № 11. P. 5839. https://doi.org/10.3390/ijms22115839

81. *Thallinger B., Prasetyo E.N., Nyanhongo G.S., Guebitz G.M.* Antimicrobial enzymes: an emerging strategy to fight microbes and microbial biofilms // Biotechnology Journal. 2013. V. 8. № 1. P. 97–109. https://doi.org/10.1002/biot.201200313

82. *Campoccia D., Montanaro L., Arciola C.R.* A review of the biomaterials technologies for infection-resistant surfaces //Biomaterials. 2013. V. 34. № 34. P. 8533–8554. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2013.07.089

83. *Hickok N.J., Shapiro I.M.* Immobilized antibiotics to prevent orthopaedic implant infections // Advanced drug delivery reviews. 2012. V. 64. № 12. P. 1165–1176. https://doi.org/10.1016/j.addr.2012.03.015

84. *Cooper L.F., Zhou Y., Takebe J. et al.* Fluoride modification effects on osteoblast behavior and bone formation at TiO2 grit-blasted cp titanium endosseous implants // Biomaterials. 2006. V. 27. № 6. P. 926–936. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.07.009

85. *Valverde A., Pérez-Álvarez L., Ruiz-Rubio L. et al.* Antibacterial hyaluronic acid/chitosan multilayers onto smooth and micropatterned titanium surfaces // Carbohydrate polymers. 2019. V. 207. P. 824–833. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.12.039

86. *Lv H., Chen Z., Yang X., et al.* Layer-by-layer self-assembly of minocycline-loaded chitosan/alginate multilayer on titanium substrates to inhibit biofilm formation //Journal of dentistry. 2014. V. 42. № 11. P. 1464–1472. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2014.06.003

87. *Li K., Zhao X.K. Hammer B.K., Du S., Chen Y.* Nanoparticles inhibit DNA replication by binding to DNA: Modeling and experimental validation // ACS Nano. 2013. V. 7. № 11. P. 9664–9674. https://doi.org/10.1021/nn402472k

88. *Gorbachevskii M.V., Stavitskaya A.V., Novikov A.A. et al.* Fluorescent gold nanoclusters stabilized on halloysite nanotubes: in vitro study on cytotoxicity // Applied Clay Science. 2021. V. 207. P. 106106. https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106106

89. *Iskuzhina L., Batasheva S., Kryuchkova M. et al.* Advances in the Toxicity Assessment of Silver Nanoparticles derived from a Sphagnum fallax extract for Monolayers and Spheroids // Biomolecules. 2024. V. 14. № 6. P. 611. https://doi.org/10.3390/biom14060611

90. *Mohammadinejad R., Moosavi M.A., Tavakol S. et al.* Necrotic, apoptotic and autophagic cell fates triggered by nanoparticles //Autophagy. 2019. V. 15. № 1. P. 4–33. https://doi.org/10.1080/15548627.2018.1509171

91. *Pangule R.C., Brooks S.J., Dinu C.Z. et al.* Antistaphylococcal nanocomposite films based on enzyme – Nanotube conjugates // ACS Nano. 2010. V. 4. № 7. P. 3993–4000. https://doi.org/10.1021/nn100932t

92. *Zhan Y., Yu S., Amirfazli A. et al.* Recent advances in antibacterial superhydrophobic coatings // Advanced Engineering Materials. 2022. V. 24. № 4. P. 2101053. https://doi.org/10.1002/adem.202101053

93. *Ghilini F., Pissinis D. E., Minan A. et al.* How functionalized surfaces can inhibit bacterial adhesion and viability // ACS Biomaterials Science & Engineering. 2019. V. 5. № 10. P. 4920–4936. https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.9b00849

94. *Sun X., Zhang S., Li H., Bandara N.* Chapter 1 - Anti-adhesive coatings: A technique for prevention of bacterial surface fouling // Boddula R., Ahamed M.I., Asiri A.M. (ed.). Green Adhesives: Preparation, Properties and Applications. USA: Scrivener Publishing LLC. 2020. P. 1–23. https://doi.org/10.1002/9781119655053.ch1

95. *Desrousseaux C., Sautou V., Descamps S., Traoré O.* Modification of the surfaces of medical devices to prevent microbial adhesion and biofilm formation // Journal of Hospital Infection. 2013. V. 85. № 2. P. 87–93. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2013.06.015

96. *Hadjesfandiari N., Yu K., Mei Y., Kizhakkedathu J.N.* Polymer brush-based approaches for the development of infection-resistant surfaces // Journal of Materials Chemistry B. 2014. V. 2. № 31. P. 4968–4978. https://doi.org/10.1039/C4TB00550C

97. *Cloutier M., Mantovani D., Rosei F.* Antibacterial coatings: Challenges, perspectives, and opportunities // Trends in Biotechnology. 2015. V. 33. № 11. P. 637–652. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.09.002

98. *Huang Z., Ghasemi H.* Hydrophilic polymer-based anti-biofouling coatings: Preparation, mechanism, and durability //Advances in Colloid and Interface Science. 2020 V. 284. P. 102264. https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102264

99. *Boinovich L.B., Kaminsky V.V., Domantovsky A.G. et al.* Bactericidal activity of superhydrophobic and superhydrophilic copper in bacterial dispersions // Langmuir. 2019. V. 35. № 7. P. 2832–2841. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b03817

100. *Emelyanenko A.M., Kaminskii V.V., Pytskii I.S. et al.* Antibacterial properties of superhydrophilic textured copper in contact with bacterial suspensions // Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 2020. V. 168. P. 488–491. https://doi.org/10.1007/s10517-020-04737-5

101. *Омран Ф.Ш., Каминский В.В., Емельяненко К.А. и др.* Влияние биологической загрязненности медных поверхностей с экстремальным смачиванием на их антибактериальные свойства // Коллоидный журнал. 2023. Т. 85. №. 5. С. 641–654. https://doi.org/10.31857/S0023291223600499

102. *Chen S., Li L., Zhao C., Zheng J.* Surface hydration: Principles and applications toward low-fouling / Nonfouling biomaterials // Polymer. 2010. V. 51. № 23. P. 5283–5293. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.08.022

103. *Schlenoff J.B.* Zwitteration: Coating surfaces with zwitterionic functionality to reduce nonspecific adsorption // Langmuir. 2014. V. 30. №. 32. P. 9625–9636. https://doi.org/10.1021/la500057j

104. *Estephan Z.G., Schlenoff P.S., Schlenoff J.B.* Zwitteration as an alternative to PEGylation // Langmuir. 2011. V. 27. № 11. P. 6794–6800. https://doi.org/10.1021/la200227b

105. *Hooda A., Goyat M.S., Pandey J.K. et al.* A review on fundamentals, constraints and fabrication techniques of superhydrophobic coatings // Progress in Organic Coatings. 2020. V. 142. P. 105557. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105557

106. *Kang S.M., You I., Cho W.K. et al.* One-step modification of superhydrophobic surfaces by a mussel-inspired polymer coating // Angewandte Chemie International Edition. 2010. V. 49. № 49. P. 9401–9404. https://doi.org/10.1002/anie.201004693

107. *Packham D.E.* Surface energy, surface topography and adhesion // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2003. V. 23. № 6. P. 437–448. https://doi.org/10.1016/S0143-7496(03)00068-X

108. *Xu L., Karunakaran R.G., Guo J., Yang S.* Transparent, superhydrophobic surfaces from one-step spin coating of hydrophobic nanoparticles // ACS Applied Materials & Interfaces. 2012. V. 4. № 2. P. 1118–1125. https://doi.org/10.1021/am201750h

109. *Serles P., Nikumb S., Bordatchev E.* Superhydrophobic and superhydrophilic functionalized surfaces by

picosecond laser texturing //Journal of Laser Applications. 2018. V. 30. № 3. P. 032505. https://doi.org/10.2351/1.5040641

110. *Emelyanenko A.M., Shagieva F.M., Domantovsky A.G., Boinovich L.B.* Nanosecond laser micro-and nanotexturing for the design of a superhydrophobic coating robust against long-term contact with water, cavitation, and abrasion //Applied Surface Science. 2015. V. 332. P. 513–517. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.202
111. *Song B., Zhang E., Han X. et al.* Engineering and application perspectives on designing an antimicrobial surface // ACS Applied Materials & Interfaces. 2020. V. 12. № 19. P. 21330–21341. https://doi.org/10.1021/acsami.9b19992
112. *Cheng G., Li G., Xue H. et al.* Zwitterionic carboxybetaine polymer surfaces and their resistance to long-term biofilm formation // Biomaterials. 2009. V. 30. № 28. P. 5234–5240. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.05.058
113. *Wang W., Lu Y., Zhu H., Cao Z.* Superdurable coating fabricated from a double-sided tape with long term "zero" bacterial adhesion // Advanced Materials. 2017. V. 29. № 34. P. 1606506. https://doi.org/10.1002/adma.201606506
114. *Feng Y., Wang Q., He M. et al.* Antibiofouling zwitterionic gradational membranes with moisture retention capability and sustained antimicrobial property for chronic wound infection and skin regeneration // Biomacromolecules. 2019. V. 20. № 8. P. 3057–3069. https://doi.org/10.1021/acs.biomac.9b00629
115. *Liang X., Chen X., Zhu J. et al.* A simple method to prepare superhydrophobic and regenerable antibacterial films // Materials Research Express. 2020. V. 7. № 5. P. 055307. https://doi.org 10.1088/2053-1591/ab903a
116. *Ma Y., Li J., Si Y. et al.* Rechargeable antibacterial N-halamine films with antifouling function for food packaging applications // ACS Applied Materials & Interfaces. V. 11. № 19. P. 17814–17822. https://doi.org/10.1021/acsami.9b03464
117. *Del Olmo J.A., Pérez-Álvarez L., Martínez V.S. et al.* Multifunctional antibacterial chitosan-based hydrogel coatings on Ti6Al4V biomaterial for biomedical implant applications // International Journal of Biological Macromolecules. 2023. V. 231. P. 123328. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123328.
118. *Chug M.K., Brisbois E.J.* Recent developments in multifunctional antimicrobial surfaces and applications toward advanced nitric oxide-based biomaterials // ACS Materials Au. 2022. V. 2. № 5. P. 525–551. https://doi.org/10.1021/acsmaterialsau.2c00040
119. *Kaminskii V.V., Aleshkin A.V., Zul'karneev E.R. et al.* Development of a bacteriophage complex with superhydrophilic and superhydrophobic nanotextured surfaces of metals preventing healthcare-associated infections (HAI) // Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 2019. V. 167. P. 500–503. https://doi.org/10.1007/s10517-019-04559-0
120. *Yu Q., Wu Z., Chen H.* Dual-function antibacterial surfaces for biomedical applications // Acta Biomaterialia. 2015. V. 16. P. 1–13. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2015.01.018
121. *Hu X., Neoh K.G., Shi Z. et al.* An in vitro assessment of titanium functionalized with polysaccharides conjugated with vascular endothelial growth factor for enhanced osseointegration and inhibition of bacterial adhesion // Biomaterials. 2010. V. 31. № 34. P. 8854–8863. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2010.08.006
122. *Zhao J., Song L., Shi Q. et al.* Antibacterial and hemocompatibility switchable polypropylene nonwoven fabric membrane surface // ACS Applied Materials & Interfaces. 2013. V. 5. № 11. P. 5260–5268. https://doi.org/10.1021/am401098u
123. *Yuan S.J., Pehkonen S.O., Ting Y.P. et al.* Antibacterial inorganic-organic hybrid coatings on stainless steel via consecutive surface-initiated atom transfer radical polymerization for biocorrosion prevention // Langmuir. 2010. V. 26. № 9. P. 6728–6736. https://doi.org/10.1021/la904083r
124. *Zou Y., Zhang Y., Yu Q., Chen H.* Dual-function antibacterial surfaces to resist and kill bacteria: Painting a picture with two brushes simultaneously // Journal of Materials Science & Technology. 2021. V. 70. P. 24–38. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.07.028
125. *Blum A.P., Kammeyer J.K., Rush A.M. et al.* Stimuli-responsive nanomaterials for biomedical applications // Journal of the American Chemical Society. 2015. V. 137. № 6. P. 2140–2154. https://doi.org/10.1021/ja510147n
126. *Zhang J., Liu L., Wang L. et al.* pH responsive zwitterionic-to-cationic transition for safe self-defensive antibacterial application // Journal of Materials Chemistry B. 2020. V. 8. № 38. P. 8908–8913. https://doi.org/10.1039/D0TB01717E
127. *Wei T., Yu Q., Chen H.* Responsive and synergistic antibacterial coatings: Fighting against bacteria in a smart and effective way // Advanced Healthcare Materials. 2019. V. 8. № 3. P. 1801381. https://doi.org/10.1002/adhm.201801381
128. *Cado G., Aslam R., Séon L. et al.* Self-defensive biomaterial coating against bacteria and yeasts: Polysaccharide multilayer film with embedded antimicrobial peptide // Advanced Functional Materials. 2013. V. 23. № 38. P. 4801–4809. https://doi.org/10.1002/adfm.201300416
129. *Ye J., Zhang X., Xie W. et al.* An enzyme-responsive prodrug with inflammation-triggered therapeutic drug release characteristics // Macromolecular Bioscience. 2020. V. 20. № 9. P. 2000116. https://doi.org/10.1002/mabi.202000116

130. *Fischer N.G., Chen X., Astleford-Hopper K. et al.* Antimicrobial and enzyme-responsive multi-peptide surfaces for bone-anchored devices // Materials Science and Engineering: C. 2021. V. 125. P. 112108. https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.112108

131. *Hizal F., Zhuk I., Sukhishvili S. et al.* Impact of 3D hierarchical nanostructures on the antibacterial efficacy of a bacteria-triggered self-defensive antibiotic coating // ACS Applied Materials & Interfaces. 2015. V. 7. № 36. P. 20304–20313. https://doi.org/10.1021/acsami.5b05947

132. *Sutrisno L., Wang S., Li M. et al.* Construction of three-dimensional net-like polyelectrolyte multilayered nanostructures onto titanium substrates for combined antibacterial and antioxidant applications // Journal of Materials Chemistry B. 2018. V. 6. № 32. P. 5290–5302. https://doi.org/10.1039/C8TB00192H

133. *Bu Y., Zhang L., Liu J. et al.* Synthesis and properties of hemostatic and bacteria-responsive in situ hydrogels for emergency treatment in critical situations // ACS Applied Materials & Interfaces. 2016. V. 8. № 20. P. 12674–12683. https://doi.org/10.1021/acsami.6b03235

134. *Hu Q., Du Y., Bai Y. et al.* Smart zwitterionic coatings with precise pH-responsive antibacterial functions for bone implants to combat bacterial infections //Biomaterials Science. 2024. V. 12. № 17. P. 4471–4482. https://doi.org/10.1039/D4BM00932K

135. *Wang T., Liu X., Zhu Y. et al.* Metal ion coordination polymer-capped pH-triggered drug release system on titania nanotubes for enhancing self-antibacterial capability of Ti implants // ACS Biomaterials Science & Engineering. 2017. V. 3. № 5. P. 816–825. https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.7b00103

136. *Liu T., Yan S., Zhou R. et al.* Self-adaptive antibacterial coating for universal polymeric substrates based on a micrometer-scale hierarchical polymer brush system // ACS Applied Materials & Interfaces. 2020. V. 12. № 38. P. 42576–42585. https://doi.org/10.1021/acsami.0c13413

137. *Zou Y., Lu K., Lin Y. et al.* Dual-functional surfaces based on an antifouling polymer and a natural antibiofilm molecule: Prevention of biofilm formation without using biocides // ACS Applied Materials & Interfaces. 2021. V. 13. № 38. P. 45191–45200. https://doi.org/10.1021/acsami.1c10747

138. *Wei H., Song X., Liu P. et al.* Antimicrobial coating strategy to prevent orthopaedic device-related infections: Recent advances and future perspectives // Biomaterials Advances. 2022. V. 135. P. 212739. https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2022.212739

139. *Zhang L., Wang Y., Wang J. et al.* Photon-responsive antibacterial nanoplatform for synergistic photothermal-/pharmaco-therapy of skin infection // ACS Applied Materials & Interfaces. 2018. V. 11. № 1. P. 300–310. https://doi.org/10.1021/acsami.8b18146

140. *Wu Q., Wei G., Xu Z. et al.* Mechanistic insight into the light-irradiated carbon capsules as an antibacterial agent // ACS Applied Materials & Interfaces. 2018. V. 10. № 30. P. 25026–25036. https://doi.org/10.1021/acsami.8b04932

141. *Chen X., Zhou J., Qian Y., Zhao L.* Antibacterial coatings on orthopedic implants // Materials Today Bio. 2023. V. 19. P. 100586. https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2023.100586

142. *Wei T., Qu Y., Zou Y. et al.* Exploration of smart antibacterial coatings for practical applications // Current Opinion in Chemical Engineering. 2021. V. 34. P. 100727. https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100727

SURFACE MODIFIERS FOR REDUCING BACTERIAL CONTAMINATION IN MEDICINE AND FOOD INDUSTRY

Yu. V. Cherednichenko, I. R. Ishmukhametov, G. I. Fakhrullina

Antibacterial coatings are used in the food and textile industries, in the construction industry, in biotechnology and medicine. The review considers the main types of coatings that prevent fouling with biomacromolecules and microorganisms: anti-adhesive, contact, release-based, multifunctional and intelligent ("smart") coatings. For each type of coating, the most relevant and effective active substances and their mechanism of action are described. Despite the widespread use of anti-adhesive surfaces and contact coatings, they have many disadvantages that limit the scope of their application and reduce activity and durability. Numerous studies show that multifunctional and intelligent coatings have high potential for practical application and further research on their modification to obtain universal and cost-effective coatings. The main problem of the practical application of such surfaces is the imperfection of methods for assessing the stability and antibacterial properties of the coating in laboratory conditions.

Keywords: antibacterial coatings, contact, release-based, anti-adhesive, multifunctional, intelligent