



**МЕХАНИЧЕСКОЕ УНИЧТОЖЕНИЕ БАКТЕРИЙ С ПОМОЩЬЮ
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ:
БИОМИМЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К БОРЬБЕ С БИОПЛЁНКАМИ**

*Ташкентский Государственный Медицинский Университет
Доцент кафедры микробиологии, вирусологии с иммунологией
Ташкентского Государственного Медицинского университета*

Алиев Шавкат Рuzиматович

*Студент 2 курса Ташкентского Государственного Медицинского
университета*

Амиркулова Фарангиз Джамшидовна

Ключевые слова: Биоплёнки, наноструктурированные поверхности, биомиметика, металлоорганические каркасы (MOF), механическое уничтожение бактерий, антибиотикорезистентность, наношипы, эпитаксиальный рост.

Аннотация: Бактериальные биоплёнки представляют собой одну из ключевых проблем современной медицины и биотехнологии, поскольку обеспечивают высокую устойчивость микроорганизмов к антибиотикам и факторам иммунной защиты. В данной работе рассмотрен альтернативный подход к профилактике и подавлению биоплёночных инфекций, основанный на механическом уничтожении бактерий с помощью наноструктурированных поверхностей.

**MECHANICAL DESTRUCTION OF BACTERIA USING
NANOSTRUCTURED SURFACES: A BIOMIMETIC APPROACH TO
BIOFILM CONTROL**

Aliyev Shavkat Ruzimatovich, Associate Professor of the Department of Microbiology, Virology and Immunology, Tashkent State Medical University.

Amirkulova Farangiz Djamshidovna, 2nd-year student, Tashkent State Medical University.



Abstract: *Bacterial biofilms represent a critical challenge in modern medicine due to their high resistance to antibiotics and immune defense. This paper discusses an alternative approach to biofilm prevention based on the mechanical destruction of bacteria using nanostructured surfaces.*

Keywords: *Biofilms, nanostructured surfaces, biomimetics, metal-organic frameworks (MOF), mechanical bactericidal effect, antibiotic resistance, nanospikes, epitaxial growth.*

Введение.

Бактерии, попадая на различные поверхности, способны образовывать биоплёнки — плотные многослойные колонии, окружённые вязкой слизистой матрицей. В таком состоянии микроорганизмы становятся практически неуязвимыми для антибиотиков и факторов иммунной системы. Именно поэтому биоплёнки лежат в основе хронических инфекций, особенно в условиях стационара, где бактерии легко закрепляются на катетерах, протезах, искусственных суставах и других медицинских устройствах, вызывая внутрибольничные (нозокомиальные) инфекции. Эти инфекции широко распространены во всём мире, сопровождаются тяжёлыми клиническими последствиями, значительными экономическими затратами и способствуют росту антибиотикорезистентности.

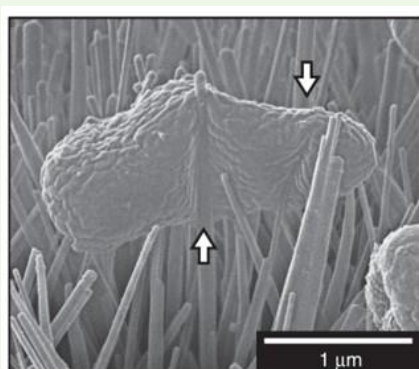
Материалы и методы.

Лучший способ борьбы с биоплёнками — предотвращение их образования. Для этого применяют покрытия с антиадгезионными, антимикробными или бактерицидными свойствами, включая соединения тяжёлых металлов и антимикробные вещества. Однако такие подходы имеют серьёзные ограничения: развитие устойчивости микроорганизмов, токсичность для человека и окружающей среды, а также истощение активных химических компонентов со временем, что снижает эффективность покрытий.

Природа предлагает альтернативное решение этой проблемы — механическое уничтожение бактерий. Крылья насекомых, таких как цикады и стрекозы, а также кожа гекконов покрыты наноструктурами в виде столбиков

или шипов. Эти наностолбики способны физически разрушать бактериальные клетки. Исследования показали, что бактерии, например *Pseudomonas aeruginosa*, погибают на крыльях цикад в течение нескольких минут. Дополнительные микроскопические эксперименты выявили механизм действия: когда бактериальная клетка оседает на наностолбиках, её мембрана провисает между выступами, растягивается и разрывается. Трещина формируется именно между наноструктурами, а не в результате химического воздействия. Это подтверждается тем, что даже при нанесении золотого покрытия, изменяющего химический состав поверхности, антибактериальные свойства крыльев сохраняются. Таким образом, бактерицидный эффект обусловлен исключительно физическими и структурными факторами.

Клетка *Klebsiella pneumoniae*, пронзённая морем наношипов, является наглядным примером механического бактерицидного действия наноструктурированных поверхностей. Электронная микроскопия показывает, что острые наношипы физически повреждают клеточную оболочку бактерии, прокалывая её в нескольких точках. Несмотря на наличие защитной капсулы, характерной для *K. pneumoniae*, механическое воздействие приводит к разрушению мембраны и гибели клетки. Такой способ уничтожения бактерий не связан с химическим воздействием и не способствует формированию устойчивости.



Клетка *Klebsiella pneumoniae*, пронзённая морем наношипов.

Этот природный механизм вдохновил учёных на создание искусственных наноструктурированных поверхностей. Однако воспроизведение подобных структур долгое время оставалось сложным и



дорогостоящим, что ограничивало возможность их массового применения. Кроме того, для достижения максимального бактерицидного эффекта необходимо строго контролировать плотность, высоту и диаметр наноструктур, что представляет серьёзную технологическую задачу. Наноструктуры часто самоорганизуются, и получающийся рисунок приходится анализировать с помощью сканирующей электронной микроскопии. Эффективность таких поверхностей также варьирует в зависимости от типа бактерий, поскольку грамположительные и грамотрицательные микроорганизмы имеют различия в строении клеточной оболочки. Исследователи применили метод эпитаксиального роста — выращивания одного кристалла на поверхности другого. Сначала были синтезированы кристаллы MOF типа UiO-66 на основе циркония, которые служили фундаментом. Затем на их поверхности вырастили кристаллы другого типа — MIL-88B на основе железа. В результате сформировались гибридные наночастицы, напоминающие по форме противотанковые ежи: они имеют центральное ядро и множество острых игл, торчащих во все стороны. Длина игл составляет около 300 нанометров, а диаметр их кончика — менее пяти нанометров, что сопоставимо с размерами бактериальных клеток.

Были протестированы два способа нанесения таких наноструктур на поверхность: выращивание шипов непосредственно на подложке и нанесение раствора с уже готовыми «наноежами». Второй метод оказался более эффективным. При капельном нанесении частицы оседают хаотично, ориентируясь таким образом, что сразу несколько острых игл направлены вверх, формируя плотное «минное поле» для бактерий.

Результаты исследования.

В экспериментах с кишечной палочкой (*Escherichia coli*) поверхность, созданная методом капельного нанесения, уничтожила 83 % микроорганизмов за 24 часа. Электронная микроскопия показала, что гибель клеток носит исключительно механический характер. Бактерии не подвергались химическому отравлению: их мембраны пронзались иглами, некоторые клетки



буквально нанизывались на шипы и разрывались, а в других случаях повреждения запускали внутренние механизмы программируемой клеточной гибели. При этом такие покрытия оказались безопасными для клеток человека. Из-за значительной разницы в размерах человеческие клетки воспринимают наношипы не как режущие структуры, а как слегка шероховатую поверхность. Главным преимуществом данного подхода является невозможность выработки бактериальной устойчивости, поскольку разрушение происходит за счёт физических повреждений, а не химического воздействия.

Заключение.

Таким образом, использование наноструктурированных поверхностей, вдохновлённых природными механизмами и реализованных с помощью металлоорганических каркасов, открывает перспективный путь борьбы с биоплёнками в медицине, промышленности и транспорте без применения антибиотиков, токсичных металлов и биоцидов.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Алиев Ш. Р., Мухамедов И. М.** *Микробиологиядан лаборатория машгулотларига доир қўлланма* — учебное пособие для студентов медицинских вузов, освещающее основные методы микробиологической практики, включая оценку антимикробной активности (Ташкент, 2011).
2. **Aliev S. R.** *Analysis of Antimicrobial and Antifungal Activity of Synthetic Structural Compounds*
3. **Жалилова М. Т., Алиев Ш. Р., Халилов З. С.** *Microbiological landscape and antibiotic sensitivity in acute and chronic gaymoritis*
4. **Jenkins J., et al.** *Nature Communications*
5. **Garcia A. et al.** *Effective reduction of biofilm through photothermal therapy by gold core@shell based mesoporous silica nanoparticles*