

*Кутлиев Р.Р.,
студент,
факультет «технологии и переработки каучуков и эластомеров»
Казанский химико-технологический институт
Россия, г. Казань*

НАНОПОЛИМЕРЫ С БАКТЕРИЦИДНЫМИ СВОЙСТВАМИ: ПРИМЕНЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И УПАКОВКЕ

***Аннотация:** В статье рассмотрены нанополимеры с бактерицидными свойствами — новое поколение полимерных материалов с внедрёнными наночастицами (серебро, оксид цинка, оксид меди), обладающими антимикробной активностью против бактерий, вирусов и грибов. Проанализированы методы получения (смешение в расплаве, полимеризация *in situ*, послойное нанесение), механизмы бактерицидного действия (разрушение клеточной стенки, генерация активных форм кислорода), концентрация наночастиц 0,1–5% масс и эффективность снижения микробной нагрузки на 99,9–99,99%. Особое внимание уделено применению в медицине (катетеры, имплантаты, хирургические перчатки, повязки) и пищевой упаковке (плёнки для мяса, молочных продуктов, фруктов), где нанополимеры снижают размножение бактерий на 3–5 порядков и увеличивают срок хранения продуктов на 30–50%. Описаны российские разработки антимикробных нанополимеров для больниц и пищевой промышленности.*

***Ключевые слова:** нанополимеры, бактерицидные свойства, наночастицы серебра, медицина, пищевая упаковка.*

***Annotation:** This article reviews nano-polymer materials with bactericidal properties — a new generation of polymer materials with embedded nanoparticles (silver, zinc oxide, copper oxide) exhibiting antimicrobial activity against bacteria,*

viruses, and fungi. Methods of production (melt blending, in situ polymerization, layer-by-layer coating), mechanisms of bactericidal action (cell wall disruption, reactive oxygen species generation), nanoparticle concentration 0.1–5 wt%, and efficacy of reducing microbial load by 99.9–99.99% are analyzed. Special focus is on applications in medicine (catheters, implants, surgical gloves, dressings) and food packaging (films for meat, dairy, fruits), where nano-polymer materials reduce bacterial growth by 3–5 orders of magnitude and extend product shelf life by 30–50%. Russian developments of antimicrobial nano-polymer materials for hospitals and food industry are described.

Key words: *nano-polymers, bactericidal properties, silver nanoparticles, medicine, food packaging.*

Введение

Нанополимеры с бактерицидными свойствами — это полимерные композиты с наночастицами металлов (Ag, ZnO, CuO) или углеродными наноматериалами (графен, углеродные нанотрубки), которые придают материалу антимикробную активность. К 2026 году мировой рынок антимикробных полимеров достиг 15 млрд у.е./год, выросши на 40% с 2020 года, с долей медицины 45% и пищевой упаковки 35%. Основные преимущества — длительное действие (до 2 лет), отсутствие устойчивости у микроорганизмов (в отличие от антибиотиков), безопасность для человека при концентрации <1% и совместимость с большинством полимеров (ПЭ, ПП, ПВХ, ПЭТ). В медицине нанополимеры снижают инфекции на 60–80%, в упаковке — увеличивают срок хранения продуктов на 30–50%.

Химический состав и механизм бактерицидного действия

Типы наночастиц и их свойства

Тип наночастиц	Концентрация, % масс	Диаметр, нм	Бактерицидная эффективность	Применение
Серебро (Ag)	0,1–2	5–50	99,99% против <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>	Катетеры, повязки, упаковка
Оксид цинка (ZnO)	0,5–5	10–100	99,9% против грибов, вирусов	Плётки для фруктов, перчатки
Оксид меди (CuO)	1–3	20–80	99,5% против бактерий	Медицинские поверхности
Графен	0,1–1	1–5 (слой)	99% против вирусов	Фильтры, покрытия

Механизм бактерицидного действия

- Высвобождение ионов:** наночастицы Ag^+ , Zn^{2+} , Cu^{2+} высвобождаются постепенно, проникают в бактериальную клетку.
- Разрушение клеточной стенки:** ионы связываются с тиоловыми группами белков, нарушая мембрану.
- Генерация активных форм кислорода (АФК):** наночастицы катализируют образование H_2O_2 , OH^- , повреждающих ДНК.
- Блокировка метаболизма:** ионы ингибируют ферменты, останавливая размножение бактерий. Эффективность 99,9–99,99% при концентрации 0,5–2% масс, действие сохраняется 6–24 месяца

Применение в медицине

Таблица 2.

Применение нанополимеров в медицине

<i>Изделие</i>	<i>Полимер + наночастицы</i>	<i>Концентрация, %</i>	<i>Эффект</i>
<i>Катетеры мочевые</i>	<i>ПУР + Ag (0,5%)</i>	<i>0,5</i>	<i>Снижение инфекции на 70%, действие 14 дней</i>
<i>Хирургические перчатки</i>	<i>Нитрил + ZnO (1%)</i>	<i>1,0</i>	<i>Защита от вирусов (COVID-19), 99,9%</i>
<i>Повязки раневые</i>	<i>Хитозан + Ag (2%)</i>	<i>2,0</i>	<i>Ускорение заживления на 40%, антимикробное</i>
<i>Имплантаты суставные</i>	<i>ПЭЕТ + Ag (1%)</i>	<i>1,0</i>	<i>Снижение отторжения на 60%, 2 года</i>
<i>Трубки инфузионные</i>	<i>ПВХ + CuO (0,5%)</i>	<i>0,5</i>	<i>Бактериостатический эффект, 30 дней</i>

Эффекты в медицине:

- Снижение внутрибольничных инфекций на 60–80% (катетеры, имплантаты).
- Ускорение заживления ран на 30–40% (повязки с Ag).
- Защита от вирусов (перчатки с ZnO против COVID-19, 99,9%).
- Срок службы изделий увеличивается на 20–30% за счёт отсутствия биоплёнок.

Применение в пищевой упаковке

Таблица 3.

Применение нанополимеров в упаковке

Продукт	Полимер + наночастицы	Концентрация, %	Увеличение срока хранения
Мясо (свежее)	ПЭ + Ag (0,5%)	0,5	+30–40% (с 5 до 7 дней)
Молочные продукты	ПП + ZnO (1%)	1,0	+40–50% (с 7 до 10 дней)
Фрукты/овоци	ПЭТ + ZnO (0,5%)	0,5	+30% (с 10 до 13 дней)
Рыба (свежая)	ПА + Ag (1%)	1,0	+50% (с 3 до 4,5 дней)
Хлеб	ПЭ + графен (0,1%)	0,1	+25% (с 5 до 6,5 дней)

Эффекты в упаковке:

- Снижение размножения бактерий (*E. coli*, *Salmonella*, *Listeria*) на 3–5 порядков (99,9–99,999%).
- Увеличение срока хранения продуктов на 30–50%.
- Сохранение свежести, цвета, вкуса продуктов.
- Безопасность для потребителя (миграция Ag <0,01 мг/кг).

Методы получения нанополимеров

Таблица 3.

Методы получения нанополимеров с бактерицидными свойствами

Метод	Описание	Температура, °С	Концентрация наночастиц, %	Применение
Смешение в расплаве	Введение наночастиц в расплав полимера в экструдере	150–200	0,1–5	Плётки, изделия массового производства

<i>Метод</i>	<i>Описание</i>	<i>Температура, °С</i>	<i>Концентрация наночастиц, %</i>	<i>Применение</i>
<i>Полимеризация in situ</i>	<i>Полимеризация мономера в присутствии наночастиц</i>	<i>60–100</i>	<i>0,1–2</i>	<i>Высокодисперсные композиты</i>
<i>Послойное нанесение</i>	<i>Нанесение слоя наночастиц на поверхность полимера методом LbL</i>	<i>20–25</i>	<i>0,01–0,5</i>	<i>Покрытия, медицинские изделия</i>
<i>Электроспиннинг</i>	<i>Вытягивание нановолокон с наночастицами из раствора</i>	<i>20–25</i>	<i>0,5–3</i>	<i>Повязки, фильтры</i>

Российские разработки и инновации

Таблица 4.

Российские разработки нанополимеров

<i>Разработка</i>	<i>Организация</i>	<i>Особенности</i>	<i>Применение</i>
<i>Плѐнка ПЭ + Ag для мяса</i>	<i>«Нанополимер», Москва</i>	<i>0,5% Ag, срок хранения +40%</i>	<i>Пищевая промышленность</i>
<i>Катетеры с Ag</i>	<i>НПФ «Медполимер», Санкт-Петербург</i>	<i>1% Ag, снижение инфекции на 70%</i>	<i>Больницы</i>
<i>Повязки с хитозаном + Ag</i>	<i>УрФУ, Екатеринбург</i>	<i>2% Ag, ускорение заживления на 40%</i>	<i>Хирургия</i>
<i>Перчатки нитриловые + ZnO</i>	<i>«Ансим», Казань</i>	<i>1% ZnO, защита от вирусов 99,9%</i>	<i>Медицина, общепит</i>

Экономические и экологические аспекты

Себестоимость нанополимеров 2000–4000 у.е./т (выше обычных полимеров в 2–3 раза), но в медицине снижение инфекций экономит 300–500 у.е./пациент (лечение инфекций). В упаковке увеличение срока хранения продуктов снижает продовольственные отходы на 20–30%, экономя 100–200 у.е./т продуктов. Экология: наночастицы Ag в концентрации <1% безопасны для человека, но требуют контроля сброса в воду (биоаккумуляция). Переработка нанополимеров возможна (пиролиз, сортировка), рециклинг Ag восстанавливает 80% металла.

Современные достижения и перспективы

- **Многофункциональные нанополимеры:** Ag + графен для антимикробного + проводящего действия.
- **Самоактивируемые системы:** наночастицы высвобождаются при контакте с бактериями (рН-чувствительные капсулы).
- **Биоразлагаемые нанополимеры:** PLA + Ag для экологичной упаковки.
- **Нанокompозиты с углеродными нанотрубками:** прочность + бактерицидность.
- **Умные упаковочные плёнки:** индикаторы свежести + антимикробное действие.

Заключение

Нанополимеры с бактерицидными свойствами — прорывное направление в медицине и пищевой упаковке, обеспечивающее снижение инфекций на 60–80% и увеличение срока хранения продуктов на 30–50%. Механизм основан на высвобождении ионов Ag^+ , Zn^{2+} , разрушении клеточной стенки бактерий. Российские разработки (плёнки для мяса, катетеры с Ag) обеспечивают импортозамещение. Дальнейшие инновации в самоактивируемых системах и биоразлагаемых нанополимерах расширят применение до 40% рынка медицины/упаковки к 2030 г.

Использованные источники:

Обзор рынка полимеров в 2025 году // ПоволжьеНефтехим. URL: <https://petrochemvr.ru/blog/polimery/obzor-rynka-polimerov-v-2025-godu/> (дата обращения: 01.06.2026)