

И. Д. Масальский

*магистрант 2 курса, группы, института ветеринарно-санитарной
экспертизы и агробезопасности*

А. А. Казан

*аспирант кафедры ветеринарно-санитарной экспертизы и биологической
безопасности*

Научный руководитель: А. М. Абдуллаева

*д-р биол. наук, доцент, зав. кафедрой ветеринарно-санитарной экспертизы и
биологической безопасности*

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва 125080,

Российская Федерация

ПАРАМЕТРЫ ПРИМЕНЕНИЯ БАКТЕРИОФАГОВ ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ САНАЦИИ БАКТЕРИАЛЬНЫХ БИОПЛЁНОК НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ АПК

Аннотация. Наличие биоплёнок на различных поверхностях объектов агропромышленного комплекса является одной из ключевых проблем обеспечения биологической безопасности пищевой продукции. Эффективность применения бактериофагов для санации биоплёнок на объектах АПК зависит от множества факторов, таких как: концентрация фагового препарата, продолжительность экспозиции, температура окружающей среды и тип обрабатываемой поверхности. В связи с этим, для внедрения данного вида обработки на предприятиях АПК необходима разработка дифференцированных протоколов биологической деконтаминации, учитывающих материал поверхности и температурный режим эксплуатации оборудования.

Ключевые слова: бактериофаги, биоплёнки, агропромышленный комплекс, биологическая санация, нержавеющая сталь, полимерные поверхности.

Введение

В агропромышленном комплексе биоплёнки, формирующиеся на технологическом оборудовании и контактных поверхностях, являются одним из основных источников повторной контаминации сырья и готовой продукции [1, с. 3–5]. Биоплёнки представляют собой организованные микробные сообщества, погружённые в экстрацеллюлярный полимерный матрикс (EPS), который выполняет защитную функцию, ограничивая проникновение антимикробных веществ и способствуя сохранению жизнеспособности микроорганизмов. Кроме того, внутри биоплёнки формируются субпопуляции клеток с пониженной метаболической активностью, обладающие повышенной устойчивостью к неблагоприятным факторам внешней среды [2, с. 3–6].

В результате традиционные методы санитарной обработки, основанные преимущественно на применении химических дезинфицирующих средств, не всегда обеспечивают полное удаление биоплёночных структур, что создаёт предпосылки для повторной колонизации поверхностей и распространения патогенной микрофлоры. В связи с этим возрастает интерес к биологическим методам санации, одним из наиболее перспективных направлений которых является применение бактериофагов.

Антимикробное действие бактериофагов при обработке биоплёнок может снижаться вследствие экранирования рецепторов бактериальных клеток экстрацеллюлярной матрицей и перехода части клеток в состояние пониженной метаболической активности [2, с. 3–6]. Однако данные ограничения являются не единственными параметрами, определяющими эффективность фаговой санации. Существенное влияние оказывают концентрация фагового препарата, продолжительность экспозиции, температура окружающей среды, а также физико-химические свойства обрабатываемой поверхности, определяющие особенности формирования и устойчивости биоплёнок.

Материалы и методы: Проведён аналитический обзор публикаций в открытых источниках, посвящённых применению бактериофагов для контроля биоплёнок на нержавеющей стали и полимерных поверхностях в рамках их применения на предприятиях АПК.

Результаты исследования и обсуждение: Результативность фаговой санации прежде всего определяется концентрацией бактериофага, продолжительностью экспозиции и возрастом биоплёнки [3, с. 6–9]. Существенное влияние также оказывают параметры жизненного цикла бактериофага, включая латентный период и размер выхода потомства, а также состав применяемого фагового препарата. Недостаточная экспозиция или низкий титр, как правило, обеспечивают лишь частичную редукцию численности микроорганизмов, что создаёт условия для последующего восстановления биоплёночного сообщества.

Эффективность бактериофагов во многом определяется их способностью преодолевать защитный экстрацеллюлярный полимерный матрикс (EPS). Отдельные бактериофаги синтезируют деполимеразы и другие ферменты, разрушающие полисахаридные компоненты матрикса, благодаря чему облегчается проникновение фаговых частиц в толщу биоплёнки и повышается доступность бактериальных клеток для литической инфекции. Согласно результатам систематических обзоров, наибольший эффект достигается при использовании фаговых коктейлей, содержащих несколько бактериофагов с различными механизмами действия, что позволяет эффективнее воздействовать на гетерогенные бактериальные сообщества [3, с. 12–15; 4].

Не менее важным фактором является тип обрабатываемой поверхности. Микрошероховатость, гидрофобность и физико-химические свойства материала оказывают существенное влияние на адгезию микроорганизмов и последующее формирование биоплёнок. Полимерные материалы, как правило, характеризуются более высокой адгезией бактериальных клеток по сравнению с

нержавеющей сталью, однако это не всегда сопровождается снижением эффективности фаговой обработки [1; 6, с. 15]. В исследовании Brás и соавт. (2024) показано, что при температуре 25 °C и значении MOI = 10 максимальная редукция зрелой биоплёнки *Escherichia coli* после 6 часов экспозиции достигала 5,5 log КОЕ/см² на пластике и 4,0–4,1 log КОЕ/см² на нержавеющей стали. Авторы также установили более высокое удержание бактериальных клеток и фаговых частиц на полимерных поверхностях, что может способствовать увеличению локальной концентрации бактериофага в зоне биоплёнки и может объяснять более выраженный эффект санации [6, с. 15].

Полученные данные согласуются с данными систематического обзора и метаанализа Azari и соавт. (2024), согласно которым средняя эффективность бактериофаговой обработки биоплёнок на поверхностях из нержавеющей стали составляет около 38 %. Авторы показали, что применение фаговых коктейлей повышает эффективность обработки в среднем в 1,26 раза по сравнению с использованием монофагов, а для достижения выраженного антимикробного эффекта титр фагового препарата должен составлять не менее 10⁷ БОЕ/мл. Кроме того, снижение температуры до 4 °C уменьшало эффективность санации приблизительно в 3,5 раза, что имеет принципиальное значение при разработке санитарных режимов для предприятий пищевой промышленности, функционирующих в условиях холодильного хранения [5, с. 5].

Заключение: Проведённый анализ литературных данных показал, что эффективность применения бактериофагов для биологической санации бактериальных биоплёнок на технологических поверхностях объектов агропромышленного комплекса определяется комплексом взаимосвязанных факторов. Наибольшее влияние оказывают концентрация фагового препарата, продолжительность экспозиции, температура окружающей среды, свойства обрабатываемой поверхности, а также способность бактериофагов проникать в структуру биоплёнки и разрушать её экстрацеллюлярный матрикс.

Установлено, что использование фаговых коктейлей позволяет повысить эффективность санации по сравнению с применением монофагов, а свойства материала поверхности могут существенно изменять результат обработки за счёт различий в адгезии микроорганизмов и удержании бактериофагов. Полученные данные свидетельствуют о необходимости разработки дифференцированных протоколов биологической деkontаминации, учитывающих тип поверхности, температурный режим эксплуатации оборудования и параметры применения бактериофагов. Такой подход позволит повысить эффективность контроля биоплёнок и снизить риск вторичной контаминации продукции на предприятиях агропромышленного комплекса.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Nakanishi E.Y., et al. Interaction between biofilm formation, surface material and cleanability in livestock facilities // Sustainability. — 2021. — Vol. 13, No. 11. — Art. 5836. — DOI: 10.3390/su13115836.
2. Гордина Е. М., Божкова С. А., Смирнова Л. Н. Антибактериальное и антибиопленочное действия бактериофагов в отношении *Klebsiella pneumoniae* и *Pseudomonas aeruginosa*, выделенных от пациентов с ортопедической инфекцией // Тихоокеанский медицинский журнал. 2023. Т. 0, № 1. С. 59–63. DOI: 10.34215/1609–1175-2023-1-30-34.
3. Meneses L. и др. A systematic review of the use of bacteriophages for in vitro biofilm control // Eur J Clin Microbiol Infect Dis. 2023. Т. 42, № 8. С. 919–928. DOI: 10.1007/s10096-023-04638-1.
4. Mayorga-Ramos A. и др. Bacteriophage-mediated approaches for biofilm control // Front Cell Infect Microbiol. 2024. Т. 14. С. 1428637. DOI: 10.3389/fcimb.2024.1428637.
5. M. Azari и др. Controlling of foodborne pathogen biofilms on stainless steel by bacteriophages: A systematic review and meta-analysis // Biofilm. 2024. Т. 7. С. 100170. DOI: 10.1016/j.biofilm.2023.100170.
6. Brás A. и др. Effect of Bacteriophages against Biofilms of *Escherichia coli* on Food Processing Surfaces // Microorganisms. 2024. Т. 12, № 2. С. 366. DOI: 10.3390/microorganisms12020366.