

УДК 628.316.12

ПЕСЧАНСКАЯ А.А., ИСМАГУЛОВ С.Е., студенты гр. ПИ416 (ЮГУ)
Научный руководитель ШЕВЧЕНКО А.С., к.ф.-м.н., доцент (ЮГУ)
г. Ханты-Мансийск

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРООРГАНИЗМОВ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Современная промышленность сталкивается с нарастающим давлением со стороны экологических регуляторов и общества, которые непрерывно требуют минимизации воздействия производств на окружающую среду. Промышленные стоки, особенно в целлюлозно-бумажной и химической отраслях, действительно представляют собой серьёзную проблему из-за высокого содержания трудноразлагаемых органических соединений, таких как лигносульфонаты, фенолы и хлорорганические вещества. Традиционные методы очистки, такие как химическое окисление или механическая фильтрация, часто оказываются недостаточно эффективными и дорогостоящими, а в ряде случаев и вовсе приводят к образованию вторичных загрязнителей, что лишь усугубляет ситуацию [2].

Целлюлозно-бумажная промышленность, как отмечают ведущие эксперты в области промышленной экологии, ежегодно генерирует миллионы кубометров сточных вод с высоким уровнем биохимической потребности в кислороде (БПК₅) и химической потребности в кислороде (ХПК), что делает её одним из лидеров по объёму загрязнения [4]. Химическая промышленность, в свою очередь, добавляет в этот список фенольные соединения и нефтепродукты, требующие специализированных подходов к утилизации. В данном контексте биотехнологии, использующие микроорганизмы-деструкторы, становятся перспективной альтернативой, позволяющей не только эффективно очищать стоки, но и помогать производствам соответствовать принципам устойчивого развития. Настоящее исследование направлено на оценку эффективности таких методов, их практической применимости и экономической целесообразности.

Исследование материалов и методов проводилось в три основных этапа, каждый из которых был ориентирован на получение комплексной картины применения биотехнологий. Первый этап включал лабораторные испытания, где тестировалась способность различных штаммов микроорганизмов разлагать модельные загрязнители, характерные для целлюлозно-бумажной и химической промышленности. Второй этап был посвящён анализу реального опыта внедрения технологий на крупных предприятиях. Третий этап сосредоточился на экономической оценке, сравнивающей биологические методы с традиционными подходами.

Для экспериментов были выбраны три штамма микроорганизмов, известных своими деградиционными свойствами:

1. *Phanerochaete chrysosporium* — гриб белой гнили, способный разлагать лигнин и его производные благодаря мощной ферментативной системе;
2. *Pseudomonas putida* — бактерия с высокой метаболической активностью, эффективно разрушающая фенолы и ароматические соединения;
3. *Rhodococcus erythropolis* — бактерия, устойчивая к токсичным средам и специализирующаяся на деградации нефтепродуктов.

Лабораторные испытания проводились в биореакторах объёмом 10 л при контролируемых условиях: температура 28–30°C, pH 6.5–7.5, аэрация для поддержания уровня растворённого кислорода. Эффективность очистки оценивалась по снижению показателей БПК₅ и ХПК [5], а также по степени разложения специфических загрязнителей, измеренной с помощью газовой хроматографии и спектрофотометрии. Данные о внедрении были собраны на основе отчётов предприятий и публикаций за 2023–2025 годы.

Проведённые лабораторные испытания показали, что эффективность микроорганизмов значительно различается в зависимости от типа загрязнителя; были выявлены сравнительные преимущества различных штаммов. Так, штамм *Phanerochaete chrysosporium* показал выдающиеся результаты в разложении лигносульфонатов, обеспечивая 92% деградации за 72 ч. Такой высокий показатель объясняется наличием у гриба уникальных ферментов — лигнин-пероксидазы и марганец-зависимой пероксидазы, которые эффективно расщепляют сложные полимерные структуры лигнина. В то же время *Pseudomonas putida* оказалась лидером в очистке фенольных соединений, демонстрируя 87% деградации за 48 ч. благодаря своей способности метаболизировать ароматические кольца. Штамм *Rhodococcus erythropolis*, хотя и уступал другим по скорости (65% деградации нефтепродуктов за 96 ч.), при этом выделялся устойчивостью к высоким концентрациям токсичных веществ, что делает его ценным в условиях реальных стоков.

Полученные результаты подчёркивают важность подбора микроорганизмов с учётом специфики состава сточных вод [7]. Например, в целлюлозно-бумажной промышленности, где преобладают лигносульфонаты, более эффективны грибы, тогда как в химической промышленности, характеризующейся высоким содержанием фенолов, предпочтительнее использование бактерий. Подробные сведения о сравнительной эффективности приведены в таблице 1.

Таблица 1. Эффективность деградации загрязнителей различными штаммами

Штамм	Загрязнитель	Степень деградации (%)	Время (ч)
<i>P. chrysosporium</i>	Лигносульфонаты	92	72
<i>P. putida</i>	Фенолы	87	48
<i>R. erythropolis</i>	Нефтепродукты	65	96

Реальный опыт применения биотехнологий подтверждает лабораторные выводы. На Архангельском целлюлозно-бумажном комбинате внедрение биореакторов с *Phanerochaete chrysosporium* позволило снизить ХПК стоков с 1200 до 156 мг/л, что составляет 87% очистки [1]. Данный результат не только обеспечил соответствие предприятия строгим нормативам НДТ, но и сократил

эксплуатационные затраты на 35% за счёт отказа от дорогостоящих химических реагентов. Переход на биологический метод также уменьшил объём осадка, что упростило дальнейшую утилизацию отходов.

Аналогичные результаты были достигнуты на Омском НПЗ (ПАО «Газпромнефть»), где применение биореакторов с штаммами *Pseudomonas putida* и *Rhodococcus erythropolis* позволило снизить концентрацию нефтепродуктов в сточных водах с 280 до 12 мг/л и уменьшить показатель ХПК на 88%. Внедрение технологии обеспечило соответствие экологическим нормативам, сократило эксплуатационные затраты на 35% за счет отказа от химических реагентов и уменьшило объем отходов на 40% [3]. Руководство отметило полное исключение штрафов за превышение ПДК и улучшение экологического рейтинга предприятия, что подтверждает комплексные преимущества биотехнологий – от экологической эффективности до экономической выгоды.

Анализ экономической эффективности и перспектив использования биотехнологий в очистке сточных вод показал, что биологические методы в сравнении с традиционными (такими как хлорное окисление или адсорбция на активированном угле) позволяют снизить затраты на 20–40% в долгосрочной перспективе. Данное преимущество связано с возможностью регенерации биомассы микроорганизмов, минимальным потреблением энергии и отсутствием необходимости в постоянных поставках химикатов [6]. Однако стоит учесть, что первоначальные затраты на установку биореакторов могут быть выше — а значит, их введение в эксплуатацию требует тщательного планирования инвестиций и оценки окупаемости на этапе внедрения.

В заключение хотелось бы подчеркнуть следующее: проведённое исследование доказывает, что биотехнологические методы очистки промышленных стоков с использованием микроорганизмов обладают значительным потенциалом для целлюлозно-бумажной и химической промышленности. Высокая эффективность (до 92% деградации загрязнителей), экономическая целесообразность (снижение затрат на 20–40%) и соответствие принципам НДТ делают их важным инструментом в борьбе с загрязнением водных ресурсов.

Перспективы дальнейших исследований включают разработку комбинированных систем, в которых грибы и бактерии могли бы работать совместно, усиливая эффект очистки. Также в этой связи актуальны селекция новых штаммов с повышенной скоростью деградации и оптимизация параметров биореакторов для сокращения времени обработки. Указанные меры позволят вывести биотехнологии на новый уровень, укрепив их позиции как ключевого элемента устойчивого промышленного производства.

Список литературы:

1. Байбородин А. М., Воронцов К. Б., Богданович Н. И. Коагуляционная очистка сильнозагрязненного стока ДПЦ-3 ОАО «Архангельский ЦБК» // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2012. № 4.
(дата обращения: 29.03.2025).

2. Болотова К. С., Новожилов Е. В. Применение ферментных технологий для повышения экологической безопасности целлюлозно-бумажного производства // Химия растительного сырья. 2015. № 3. (дата обращения: 29.03.2025).
3. ПАО "Газпром нефть". Отчёт по устойчивому развитию ПАО "Газпром нефть", 2022 [Электронный ресурс]. — 2022. — URL: <https://www.gazprom.ru/f/posts/56/691615/gazprom-sustainability-report-ru-2022.pdf> (дата обращения: 30.03.2025).
4. Dagar S., Singh S. K., Gupta M. K. Economics of advanced technologies for wastewater treatment: Evidence from pulp and paper industry // Front. Environ. Sci. 2022. Vol. 10, article 960639. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.960639>
5. Madan S., et al. A Review on Bioremediation of Pulp and Paper Mill Effluent: An Alternative to Conventional Remedial Technologies // Journal of Applied and Natural Science. 2018. Vol. 10, no. 1. С. 367–374. <https://doi.org/10.31018/JANS.V10I1.1632> (дата обращения: 25.03.2025).
6. Ram C., Chhotu, Rani P., Gebru K. A., Mariam A., Mebrhit G. Pulp and paper industry wastewater treatment: use of microbes and their enzymes // Physical Sciences Reviews. 2020. Vol. 5, no. 10, article 20190050. <https://doi.org/10.1515/psr-2019-0050> (дата обращения: 25.03.2025).
7. Siddiqui N., Dahiya P. Chapter 3 - Key role of microorganisms in industrial wastewater treatment // Shah M. P., Rodriguez-Couto S., Nadda A. K., Daverey A. (ред.). Development in Wastewater Treatment Research and Processes. Elsevier, 2023. С. 31–47. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88505-8.00009-7> (дата обращения: 26.03.2025).