

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКИЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

УСПЕХИ
В ХИМИИ И ХИМИЧЕСКОЙ
ТЕХНОЛОГИИ

Том XXXIX

№ 10

Москва
2025

УДК 66.01-52
ББК 24. 35
У78

Рецензент:
Российский химико-технологический университет
имени Д. И. Менделеева

У78 **Успехи в химии и химической технологии:** сб. науч. тр. Том XXXIX,
№ 10 (292). – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2025. – 152 с.

В сборник вошли статьи по актуальным вопросам в области теоретической и экспериментальной химии.

Материалы сборника представлены для широкого обсуждения на XXI Международном конгрессе молодых ученых по химии и химической технологии «UCChT-2025», XXXIX Международной конференции молодых ученых по химии и химической технологии «МКХТ-2025», ряде международных и российских конференций, симпозиумов и конкурсов, а также на интернет-сайтах.

Сборник представляет интерес для научно-технических работников, преподавателей, аспирантов и студентов химико-технологических вузов.

УДК 66.01-52
ББК 24. 35

Содержание

Аралова П.К., Павленко Е.О., Морозова Е.А., Шагаев А.А., Марквичев Н.С. Исследование стабилизации бактериальных культур на поверхности семян при инокуляции с растворами полимеров.....	7
Беликова А.В., Нистратов А.В. Разработка этапов формования и активации в получении активного угля из полимерных отходов производства сантехники	12
Брагазина Е.М., Ермоленко Б.В. Статистический анализ образования и обращения с растительными отходами сельского хозяйства и пищевой промышленности в Евросоюзе, Германии и России	15
Бхандари М.Р., Кастро Карраско З.Д. Оценка возможности применения альдольной конденсации для очистки фенол-формальдегидных модельных сточных вод	19
Быкова А.А., Решетова О.В., Белов А.А. Инактивация и стабилизация цистеина хитозаном	22
Васильев И.П., Красноштанова А.А. Получение липосом в качестве носителей нуклеозидов для пероральной доставки	27
Вашурин А.В., Ермоленко Б.В. Оценка потенциалов развития солнечной и ветровой энергетики и применение гис-системы на территории Красноярского края.....	30
Вердегло Д.С., Прутских М.С., Ермоленко Б.В. Анализ предпосылок развития ветровой и солнечной энергетики на территории Уральского федерального округа.....	34
Волков В.А., Посадская О.М., Сачавский А.А., Калёнов С.В. Исследование метилотрофных бактерий, выделенных из образцов ила озера вертлино .	38
Гарбуз М.И., Красноштанова А.А. Получение липосом, инкапсулированных полиненасыщенными жирными кислотами .	41
Голикова Е.В., Иванцова Н.А. Очистка модельной сточной воды от ПАВ.....	44
Гуина Е.М., Иванцова Н.А. Исследование кинетики и эффективности фото-Фентон окисления нитрофуранов и нитроимидазола в водных растворах.....	47
Золотов С.С., Блинова А.А., Костылева Е.В. Оценка возможности извлечения ионов железа (III) из водных сред, содержащих оксиэтилендифосфоновую кислоту, синтетическими ионитами.....	50

Иванов А.А., Иванцова Н.А. Электрохимическое окисление фенола и гидрохинона	54
Кениг Л.Л., Саранцева А.А. Обеззараживание хозяйственно-бытовых сточных вод ферратом натрия	57
Коваленок Р.Р., Нистратов А.В., Грошева С.В. Испытания активных углей при очистке сточных вод от нефтепродуктов	61
Куленова Д.Р., Бочарова А.В., Грошева В.Д. Повышение эффективности ферментативного гидролиза соевой мелассы при использовании активированного угля	64
Кутовая М.К., Романова М.В., Викулов Д.Д., Кривошеева А.Н., Белодед А.В. Исследование свойств агрегирующих форм молочнокислых бактерий <i>lactobacillus paracasei</i>	67
Ли В.А., Колосова О.Ю., Лозинский В.И. Полимерные матрицы для фитогормонов на основе криогелей поливинилового спирта	71
Лоскутова Е.В., Рогозина Д.А., Каленов С.В., Гусева Е.В. Исследование метилотрофных культур <i>Rhizobium pisi</i> и <i>Sinorhizobium fredii</i> на способность синтезировать наночастицы серебра	74
Матвеева А.С., Махотин П.Д., Морозова Е.А., Шагаев А.А., Марквичёв Н.С. Исследование антагонистической активности бактерий рода <i>Lactobacillus spp.</i> и <i>Leuconostoc spp.</i> по отношению к бактериям ризосферы корневой системы	77
Мельник М.Д., Сачавский А.А., Юрков Д.А., Яковлева Е.А., Суясов Н.А. Влияние источников азота на накопление углеводов микробным сообществом на основе метанотрофных бактерий	82
Михрабов А.И., Тихонова И.О. Критериальная оценка потенциала формирования экотехнопарка в промышленном кластере	85
Мокроусова С.А., Романова М.В., Белодед А.В. Исследование антимикробной активности термофильных штаммов бактерий семейства <i>bacillaceae</i>	88
Морозова С.А. Очистка высококонцентрированных сточных вод от фенола и формальдегида с применением электрохимического окисления	92
Мостовык П.Р., Пономарева Е.А., Любушкин Т.Г. Фотодеструкция метилового красного в присутствии пероксосоединений	95
Новикова А.А., Шевченко А.Т., Евдокимова С.А. Влияние экстрактов чабреца и иван-чая, богатых полифенолами, на рост бифидобактерий	98

Осадчая Е.А., Курилкин А.А., Нистратов А.В. Влияние времени выдержки модифицированного с помощью трансформаторного масла силикагеля на эффективность адсорбции паров бензола	102
Павленко Е.О., Кускова А.В., Морозова Е.А., Шагаев А.А., Марквичев Н.С. Исследование колонизации корневой системы огурца бактериями рода <i>Streptomyces sp.</i> и <i>Pseudomonas sp.</i>	105
Пересунько Ю. Д., Азопков С. В. Оценка эффективности дефторирования сточных вод с использованием промышленных отходов.....	110
Петров А.С., Юмашева Ю.Ю., Тихонова И.О. Возможности использования строительных отходов, образованных при ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде	113
Писарева А. А., Кунилова И. В. Оценка влияния обескремнивания на выщелачивание ценных элементов из золошлаковых отходов.....	116
Сахно Е.А., Кениг Л.Л. Оценка эффективности очистки воды от фуразолидона с помощью озонирования	119
Сачавский А.А., Яковлева Е.А., Мухамедова Л.Д., Мельник М.Д., Волков В.А., Калёнов С.В. Совместное культивирование метано- и метилотрофных микроорганизмов в ходе получения биомассы с высоким содержанием белка	122
Леонов Э.М., Соловьев К.Д. Оценка сорбционных свойств опоки Вольского месторождения по отношению к нефтепродуктам.....	126
Тетерина С.А., Романова М.В., Белодед А.В. Скрининг термофильных штаммов бактерий сем. <i>Bacillaceae</i> — продуцентов внеклеточных термостабильных манназ и оценка их субстратной специфичности ...	129
Трофимова В.Р., Долгов А.А., Мурзина Е.Д. Влияние питательной среды на скорость биodeградации полиэтиленовых пленок низкой плотности	133
Федоров Е.А. Обезвоживание осадка сточных вод мясообрабатывающей промышленности.....	136
Хвостова А.И., Нистратов А.В. Разработка гидрофобных минерально-углеродных адсорбентов для улавливания паров бензола	139
Хромова И.И., Красноштанова А.А. Получение липосом, нагруженных белками, для пероральной доставки	142
Шлыкова А.Ю., Иванцова Н.А. Сравнительное исследование методов окисления для очистки сернисто-щелочных сточных вод	145

Юмашева Ю.Ю., Петров А.С., Тихонова И.О.

Комплексный подход к переработке текстильных отходов148

УДК 573.4 + 631.53.02

Аралова П.К., Павленко Е.О., Морозова Е.А., Шагаев А.А., Марквичев Н.С.

Исследование стабилизации бактериальных культур на поверхности семян при инокуляции с растворами полимеров

Аралова Полина Константиновна¹ – магистрант 1-го курса кафедры биотехнологии;

poly.aralova@yandex.ru

Павленко Екатерина Олеговна¹ – магистрант 1-го курса кафедры биотехнологии;

Морозова Екатерина Андреевна¹ – аспирант кафедры биотехнологии;

Шагаев Антон Александрович¹ – к.б.н., ассистент кафедры биотехнологии;

Марквичев Николай Семёнович¹ – к.т.н., доцент кафедры биотехнологии;

¹ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва, 125480, Героев Панфиловцев, дом 20.

*Исследована эффективность природных и синтетических стабилизаторов для сохранения жизнеспособности ризосферных микроорганизмов на семенах сельскохозяйственных культур. Установлена видоспецифичность действия стабилизаторов: поливиниловый спирт показал универсальную эффективность, ксантановая камедь наиболее подошла для актиномицетов, а гуаровая - для бактерий рода *Pseudomonas*. Результаты подтверждают перспективность использования биополимеров в качестве экологичной альтернативы синтетическим стабилизаторам при предпосевной обработке семян.*

Ключевые слова: жизнеспособность, инокуляция, колонизация, обработка семян

Study of the stabilization of bacterial cultures on the surface of seeds during inoculation with polymer solutions

Aralova P.K., Pavlenko E.O., Morozova E.A., Shagaev A.A., Markvichev N.S.

*The effectiveness of natural and synthetic stabilizers for maintaining the viability of rhizospheric microorganisms on agricultural seeds has been investigated. The species specificity of the stabilizers has been established: polyvinyl alcohol has shown universal effectiveness, xanthan gum is most suitable for actinomycetes, and guar gum is most suitable for bacteria of the genus *Pseudomonas*. The results confirm the prospects of using biopolymers as an environmentally friendly alternative to synthetic stabilizers in pre-sowing seed treatment.*

Key words: viability, inoculation, colonization, seed treatment

Введение

Ризосфера растений определяет формирование и развитие растений. Эта область представляет собой динамическую экосистему, в которой происходит активное взаимодействие между растением и микроорганизмами, обитающими в непосредственной близости к корням. Согласно литературным данным, корневая система растений выделяет в окружающую среду экссудаты — органические и неорганические вещества, такие как сахара, аминокислоты, органические кислоты, ферменты и сигнальные молекулы [1]. Они играют ключевую роль в формировании ризосферы, создавая уникальную микробиологическую среду, которая способствует привлечению микроорганизмов. Экссудаты корневой системы растений служат источником питания для микроорганизмов. Взаимодействия в ризосфере растения отличается от процессов, происходящих в свободной почве [2]. Ризосферные микроорганизмы способствуют повышению доступности питательных веществ, снижению потребности в химических удобрениях и уменьшению негативного воздействия на окружающую среду.

Микроорганизмы, участвующие в формировании ризосферы, представляют собой сложную и разнообразную группу бактерий, грибов и актиномицетов. Среди них особое значение имеют не только симбиотические бактерии рода *Rhizobium*, способные обогащать почву доступным азотом [3], поскольку азот, как доминирующий макроэлемент

для роста растений, может в значительной степени влиять на время цветения, а также играть ведущую роль в адаптации растений к дефициту макро- и микроэлементов [4], но и микроорганизмы, продуцирующие биологически активные вещества на определенной стадии своего развития, обладающие фунгицидной активностью, например, бактерии рода *Streptomyces* позволяет эффективно контролировать фитопатогенные грибы без использования химических пестицидов [5,6], что способствует сохранению биоразнообразия и снижению риска развития фитопатогенных организмов. Также в настоящее время исследователи уделяют особое внимание бактериальной культуре рода *Pseudomonas* поскольку применение данного штамма способствует стимуляции роста корневой системы растений за счет продуцирования фитогормонов и ауксинов; как следствие, активируется поглощение воды и питательных веществ [7], а также усиливается защита к биотическим и абиотическим стрессам [8]. Взаимодействие этих микроорганизмов с растением формирует устойчивую и продуктивную ризосферу, что делает их использование важным инструментом в биотехнологиях, направленных на повышение урожайности и устойчивости сельскохозяйственных культур. В связи с этим, формирование и стабилизация ризосферы является важнейшей задачей в области агробиотехнологии, направленной на повышение продуктивности сельскохозяйственных культур и обеспечение экологической устойчивости.

Существует ряд методик формирования ризосферы, включающих обработку почвы, инокуляцию семян, внесение микроорганизмов в прикорневую зону с поливом и использование биофунгицидных препаратов. Эти подходы направлены на создание благоприятных условий для развития корневых систем растений и повышения их устойчивости к стрессам за счет активизации микробиологической активности в зоне корня. Однако среди них наиболее перспективной считается обработка семян, поскольку данный метод обеспечивает внесение полезных микроорганизмов в начальные стадии развития растения, что способствует более эффективной колонизации ризосферы и формированию устойчивого микробиологического ценоза. В связи с этим крайне важно, чтобы микроорганизмы сохраняли жизнеспособность на поверхности семян в течение длительного времени. Для этого применяют стабилизаторы, повышающие их устойчивость к неблагоприятным условиям, а также способствующие сохранению их биологической активности на протяжении всего периода до посева. В технологии стимулирования роста растения микроорганизмы наносят на поверхность семян и далее в течение 3-5 суток проводят посев. Однако данные бактерии плохо выживают на поверхности семян без стабилизатора [9], поэтому целью нашей работы является изучение способности повышения выживаемости ризосферных микроорганизмов на поверхности. Исследователи считают, что применение таких полимеров, как желатин, альгинат, хитозан, поливинилпирролидон, камедь и пр. способствует стабилизации культуры за счет затруднения диффузии и, как следствие, защите от абиотических стрессов [10]. Для этого в качестве стабилизаторов были выбраны следующие вещества: гуаровая и ксантановая камеди, и поливиниловый спирт - для того, чтобы исследовать влияние полимеров различной природы на стабилизацию и жизнеспособность микроорганизмов на поверхности семян при высушивании. В связи с данной целью были поставлены следующие задачи:

- Оценить влияние растворов стабилизаторов на сохранность микроорганизмов разных групп на поверхности при инокуляции семян при высушивании.

- Оценить влияние полимеров на свойства микроорганизмов.

Экспериментальная часть

На внешней части семян содержится своя микрофлора и биологически активные вещества, которые могут оказывать некоторое влияние на сохранность микроорганизмов, однако на первом этапе исследования необходимо определить влияние растворов стабилизаторов на выживаемость клеток *Bradyrhizobium japonicum* B1118, *Pseudomonas fluorescens* B1015 и *Streptomyces rimosus* B1204, в связи с этим нами была выбрана модельная система, где в качестве поверхности было выбрано предметное стекло, чтобы исключить влияние различных факторов. В качестве контрольного варианта вместо растворов стабилизаторов добавляли воду.

Для этого культивировали данные микроорганизмы в колбах Эрленмейера при 180 об/мин на орбитальном шейкере в следующих жидких питательных средах: L-бульон [11], Base и маннитно-дрожжевая среда [12]. Далее готовили рабочие растворы. В качестве сохраняющего агента использовали растворы гуаровой и ксантановой камеди и раствор поливинилового спирта (ПВС). Для этого готовили 1%-ный раствор гуаровой и ксантановой камедей, а также 5%-ный раствор ПВС. Подбор рабочих концентраций исследуемых растворов стабилизаторов осуществлялся экспериментальным путем в ходе предварительных лабораторных испытаний в рамках данного исследования [13]. Далее смешивали данные растворы стабилизаторов с разбавленными культуральными жидкостями таким образом, чтобы в конечном рабочем растворе концентрация клеток составила 10^6 КОЕ/мл, а стабилизирующего агента – 0,5%. Для разбавления использовали стерильную воду. Далее растворы перемешивали и наносили пульверизатором на предметное стекло в объеме 200 μ л. Затем сушили на воздухе при комнатной температуре. После высушивания делали смыв с предметного стекла и определяли концентрацию клеток с помощью метода последовательных разведений (метод Коха). Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Изменение концентрации бактериальных клеток ризосферных микроорганизмов при высушивании на инертном материале с различными стабилизаторами

Микроорганизм	Состояние	Стабилизатор, КОЕ/см ²			
		Контроль (вода)	Ксантановая камедь (0,5%)	Гуаровая камедь (0,5%)	Поливиниловый спирт (0,5%)
<i>Pseudomonas fluorescens</i> B1015	До высушивания	$4,3 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^5$	$5,9 \cdot 10^4$
	После высушивания	$2,1 \cdot 10^3$	$8,0 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^4$
<i>Streptomyces rimosus</i> B1204	До высушивания	$6,9 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^4$	$6,4 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$
	После высушивания	$1,3 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^3$	$7,5 \cdot 10^3$
<i>Bradyrhizobium japonicum</i> B1118	До высушивания	$7,0 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^5$
	После высушивания	0	0	$1,0 \cdot 10^2$	$2,0 \cdot 10^3$

Как можно заметить, все исследуемые стабилизаторы демонстрируют различную эффективность в зависимости от вида микроорганизма. Следует отметить, что раствор поливинилового спирта (ПВС) проявляет наиболее стабильные защитные свойства. В частности, для *Pseudomonas fluorescens B1015* ПВС обеспечивает сохранность клеток на уровне 27%, что в 54 раза превышает показатели контроля. Растворы ксантановой и гуаровой камедей также повышают стабилизацию клеток на поверхности при высушивании на 8% и 1,2% соответственно. Также из таблицы можно отметить, что раствор ксантановой камеди способствует стабилизации 44% клеток культуры *Streptomyces rimosus B1204* на поверхности инертного материала, что превышает данные контроля в 8,5 раз. Растворы ПВС и гуаровой камеди для данного штамма сохраняют 68% и 44% клеток соответственно, что также значительно превышает контрольные значения (19%). Также в ходе исследования было показано, что стабилизации свойств клубеньковых бактерий *Bradyrhizobium japonicum B1118* способствуют растворы поливинилового спирта и гуаровой камеди, которые предотвращают полную гибель культуры, сохраняя 0,7% и 0,5% клеток соответственно.

Таким образом, наибольшую эффективность в качестве раствора стабилизатора при высушивании микроорганизмов на инертном носителе демонстрирует поливиниловый спирт, особенно для штаммов *Pseudomonas fluorescens B1015* и *Streptomyces rimosus B1204*. Ксантановая и гуаровая камеди также проявляют стабилизирующие свойства, но их эффективность варьируется в зависимости от штамма.

Семена часто содержат патогенную (*p. Fusarium*, *p. Alternaria*) и сапрофитную (*p. Aspergillus*) [14] микрофлору на своей поверхности, а также обладают комплексом биологически активных веществ [15]. В связи с этим можно предположить, что растворы стабилизаторов способствуют снижению агрессивных условий, связанных с процессом высыхания, создавая более мягкую и щадящую среду для выживания микроорганизмов. Возможно свойства растворов полимеров обеспечат сохранение их жизнеспособности и стабилизацию на поверхности семян при высыхании. Поэтому дальнейшей задачей нашего исследования являлась оценка жизнеспособности клеток ризосферных микроорганизмов на поверхности семян сои и ячменя при высушивании после инокуляции совместно с растворами исследуемых стабилизаторов. Для этого семена стерилизовали путем выдерживания в 70%-ном этиловом спирте: яровой ячмень – 1 минута, соя – 3 минуты, с последующим промыванием водой. Далее стерильные семена обрабатывали аналогичным образом исследуемыми растворами, приготовленными по технологии, описанной выше. Растворы для инокуляции с клетками культур рода *Pseudomonas* и *Streptomyces* наносили на семена ячменя, растворы с клетками рода *Bradyrhizobium* – на семена сои. Затем сушили на воздухе при комнатной температуре. После высыхания делали смыв с семян и определяли концентрацию клеток с помощью метода последовательных разведений (метод Коха). Выбор данных культур обусловлен широкой распространенностью и востребованностью в сельском хозяйстве, а также их периодом возделывания (весна), во время которого происходит активное формирование ризосферы. Средний размер семян сои сорта «Мавка» достигал 1,53 см², а семян ячменя сорта «Мамлюк» – 0,4 см². Результаты исследования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Изменение концентрации бактериальных клеток ризосферных микроорганизмов при высушивании на семенах после инокуляции с различными стабилизаторами

Микроорганизм	Состояние	Стабилизатор, КОЕ/см ²			
		Контроль (вода)	Ксантановая камедь (0,5%)	Гуаровая камедь (0,5%)	Поливиниловый спирт (0,5%)
<i>Pseudomonas fluorescens B1015</i>	До высыхания	6,6*10 ¹	4,6*10 ³	6,6*10 ²	2,6*10 ³
	После высыхания	Менее 10 ¹	2,8*10 ²	3,1*10 ²	1,1*10 ²
<i>Streptomyces rimosus B1204</i>	До высыхания	1,3*10 ³	2,6*10 ³	6,6*10 ²	2,6*10 ³
	После высыхания	2,8*10 ²	7,9*10 ³	5,1*10 ²	5,4*10 ¹
<i>Bradyrhizobium japonicum B1118</i>	До высыхания	2,6 *10 ⁶	2,0 *10 ⁶	2,0 *10 ⁶	5,3 *10 ⁶
	После высыхания	2,6*10 ⁴	1,3*10 ⁶	1,3*10 ⁵	2,0*10 ⁶

В ходе исследования были показаны различия в эффективности растворов стабилизаторов для различных групп микроорганизмов, что подчеркивает важность учета видовой специфичности при разработке

препаратов на основе ризосферных культур. В частности, для бактерий штамма *Pseudomonas fluorescens B1015*, наиболее эффективной оказалась гуаровая камедь, которая способствовала лучшей

стабилизации клеток в сравнении с контролем в 31 раз, а ксантановая камедь — в 28 раз. Инокуляция совместно с раствором поливинилового спирта при этом также увеличивала стабилизацию клеток на поверхности семян в 11 раз по сравнению с контролем. В случае *Streptomyces rimosus* B1204 применение раствора ксантановой камеди в качестве стабилизатора при инокуляции способствовало увеличению жизнеспособности клеток в 28,2 раза по сравнению с контролем, тогда как инокуляция семян совместно с гуаровой камедью обеспечила результат в 1,8 раза выше контроля. Также было показано, что для клубеньковых бактерий, таких как *Bradyrhizobium japonicum* B1118, применение раствора ПВС при обработке семян способствовало эффективной стабилизации клеток на поверхности при высушивании — в 76,9 раза лучше контроля, при этом применение растворов ксантановой и гуаровой камедей также способствовало сохранению жизнеспособности клеток в 50 и 5 раз лучше контроля соответственно.

Таким образом, показано, что исследуемые растворы ксантановой и гуаровой камеди и поливинилового спирта обладают стабилизирующими свойствами и способствуют сохранности жизнеспособности исследуемых ризосферных микроорганизмов на поверхности семян при высушивании после инокуляции. Полученные результаты подтверждают перспективность применения растворов полимеров в агrobiотехнологических процессах, требующих хранения семян после инокуляции.

Заключение

Таким образом, на основании проведенного исследования можно заключить, что применение растворов полимеров растительного и микробиологического происхождения в качестве стабилизатора клеток микроорганизмов на поверхности семян после инокуляции демонстрирует соизмеримую стабилизирующую эффективность с синтетическим поливиниловым спиртом.

Полученные данные позволяют рассматривать гуаровую и ксантановую камедь как перспективную альтернативу синтетическим стабилизаторам. Важным преимуществом биополимеров является их экологическая безопасность и биоразлагаемость, что соответствует современным тенденциям "зеленой" биотехнологии. Однако следует отметить, что эффективность стабилизации может варьировать в зависимости от конкретного штамма микроорганизмов и условий лиофилизации, что требует дальнейших исследований по оптимизации концентраций и разработке универсальных композиционных составов.

Перспективным направлением представляется изучение комбинированных составов на основе ксантановой и гуаровой камедей, которые потенциально могут обеспечить синергетический эффект. Таким образом, переход на биополимерные стабилизаторы бактериального и растительного происхождения представляется возможным, однако требует дополнительных исследований.

Список литературы

1. Пухальский Я. В., Шапошников А. И., Белимов А. А. Характеристика состава корневых экссудатов высокопродуктивного сорта гороха Софья // Национальная ассоциация ученых. - 2016. - №1 (17). - С. 141-144.
2. Дубинина М. Н., Лыхман В. А. Влияние ризосферы почвы на ее микробиологическую активность // Эпоха науки. - 2020. - №21. - С. 11-14.
3. Губин А.С. Бессонова А.В. Зудилин О.Е. Клубеньковые бактерии // Наука и образование. - 2023
4. Иванов Р.Г. Налиухин А.Н. Влияние биомодифицированных азотных удобрений на урожайность и динамику доступного азота в почве под посевами гречихи // Международный научно-исследовательский журнал. - 2025. - №3. - С. 1-16.
5. Арзамасова Е.Г. Грипась М.Н. Попова Е.В. Влияние штамма *Streptomyces hygroscopicus* A-4 на кормовую продуктивность и поражение корневыми гнилями клевера лугового // Владимирский земледелец. - 2015. - №3. - С. 31-33.
6. Перспективы использования *Streptomyces* sp. для улучшения качества экомочвы в защищённом грунте и развития здоровой ризосферы / В. А. Писаревская, Е. О. Павленко, А. А. Шагаев и др. // Гавриш. — 2024. — № 4. — С. 22–27.
7. Самарина Л.С. Маляровская В.И. Рогожина Е.В. Малюкова Л.С. Эндифитные микроорганизмы как промоутеры роста растений в культуре in vitro // Сельскохозяйственная биология. - 2017. - №5. Том 52. - С. 917-927.
8. И.И. Новикова Э.В. Попова Л.Е. Колесников Ю.Р. Колесникова С.С. Чекурова Устойчивость к болезням, продуктивность и содержание фотосинтетических пигментов в листьях яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) под влиянием полифункциональных биопрепаратов и комплексов на основе микроорганизмов и хитозана // Сельскохозяйственная биология. - 2023. - №1, Том 58. - С. 158-183.
9. Исследование раствора поливинилового спирта в качестве стабилизатора для инокулянта на основе *Mesorhizobium ciceri* / П. К. Аралова, А. С. Журавлева, Е. А. Морозова [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. — 2023. — Т. 37, № 12(274). — С. 12-15.
10. Оценка адаптивности исходного материала озимой пшеницы на фонах искусственно создаваемых абиотических стрессов на ранних этапах онтогенеза / Л. А. Марченкова, И. Ф. Лапочкина, О. В. Павлова [и др.] // Аграрная Россия. — 2021. — № 1. — С. 12-17. — DOI 10.30906/1999-5636-2021-1-12-17.
11. Градова Н.Б. и др. Лабораторный практикум по микробиологии. - М: ДеЛи принт, 2001. - 131 с.
12. Якименко М.В. Бегун С.А. Сорокина А.И. Оценка интенсивности роста штаммов *Bradyrhizobium japonicum* и *Sinorhizobium fredii* дальневосточной селекции на средах с различными углеводами // Достижения науки и техники АПК. - 2020. - №6. - С. 33-37.

13. Исследование влияния ксантановой и гуаровой камеди на выживаемость клеток *Pseudomonas fluorescens* при хранении и возможность их использования в защищенном грунте / Е. А. Морозова, Е. О. Павленко, А. В. Кускова и др. // Материалы XXIV Ежегодной молодежной конференции с международным участием ИБХФ РАН-ВУЗы “Биохимическая физика”. — ИБХФ РАН Москва: 2024. — С. 236–241.

14. Гагкаева Т.Ю. Дмитриев А.П. Павлюшин В.А. Микробиота зерна - показатель его качества и безопасности // Защита и карантин растений. - 2012. - С. 14-18.

15. Чебан А.Н. Щербакова Т.И. Будаков А.Б. Природные ингибиторы из растений сои и их взаимодействие с экзопроотеиназами микроорганизмов рода *Fusarium* // Вестник защиты растений. - 2016. - С. 179-181.

УДК 661.183.2:631.53.027.32

Беликова А.В., Нистратов А.В.

Разработка этапов формования и активации в получении активного угля из полимерных отходов производства сантехники

Беликова Анастасия Вячеславовна – студент кафедры промышленной экологии;

Нистратов Алексей Викторович – к.т.н., доцент кафедры промышленной экологии;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9

Настоящая работа направлена на разработку этапов формования и активации водяным паром активного угля из отходов АБС-пластика и древесно-стружечных плит для удаления вредных веществ, в частности, стирола из воздушных выбросов. Цель исследования заключается в выявлении режима получения продукта, имеющего сочетание развитой пористой структуры и механической прочности. Установлено, что удовлетворительные по прочности карбонизаты получают при добавлении к ним 50 масс. % каменноугольной смолы и прессовании смеси под давлением 5 атм. Рекомендуемые условия активации полупродукта водяным паром: температура 800 °С и выдержка 45 мин, обеспечивают равномерно развитую пористую структуру активата и его потенциальную пригодность для адсорбции паров стирола.

Ключевые слова: активный уголь; АБС-пластик; ДСП; прессование; паровая активация; адсорбция.

Development of molding and activation stages in obtaining active carbon from polymeric waste from sanitary ware production

Belikova A.V., Nistratov A.V.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The present work is aimed at developing the steps of molding and water vapor activation of active carbon from ABS plastic and particleboard waste to remove harmful substances, in particular styrene from air emissions. The aim of the study is to identify the mode of obtaining a product having a combination of developed porous structure and mechanical strength. It is established that satisfactory in strength carbonizates are obtained by adding to them 50 wt. % of coal tar and pressing the mixture under pressure of 5 atm. The recommended conditions of activation of the semi-product by water steam: temperature 800 °C and exposure time 45 min, provide a uniformly developed porous structure of the activate and its possible suitability for adsorption of styrene vapors.

Key words: active carbon; ABS plastic; particleboard; compression; steam activation; adsorption.

Введение

Современные экологические требования и принципы устойчивого развития стимулируют поиск новых эффективных технологий переработки промышленных отходов в ценные продукты. Особый интерес представляет утилизация сложных композитных материалов, таких как отходы акрилонитрил-бутадиен-стирола (АБС) и древесно-стружечных плит (ДСП), образующихся при производстве сантехнических изделий. Приоритетное по экологической опасности загрязняющее вещество в данном производстве – стирол; его пары обладают выраженным токсическим действием, раздражая слизистые оболочки глаз и дыхательных путей, оказывая негативное влияние на кроветворную и нервную системы [1,2], при этом имея крайне низкие предельно допустимые концентрации (ПДК_{м.р.} = 0,04 мг/м³; ПДК_{с.с.} = 0,002 мг/м³) [3].

АБС-пластик представляет собой важный промышленный сополимер с регулируемыми свойствами, широко применяемый в автомобилестроении, электронике и производстве бытовых изделий [4], но требующий специальной обработки поверхности перед использованием. ДСП-отходы, относящиеся к IV классу опасности [5], содержат формальдегидные смолы (мочевино-, меламино-, фенолформальдегидные) [6], при этом альтернативные связующие (изоцианаты), хотя и менее токсичны, но менее распространены [7].

Существующие технологии утилизации полимерных отходов имеют существенные ограничения: захоронение и сжигание приводят к вторичному загрязнению, механическая переработка применима только для однородных материалов, а химические методы требуют сложного оборудования и энергозатрат [8]. В данной работе предложен альтернативный подход - получение активного угля из смеси АБС- и ДСП-стружки с использованием стирола в качестве связующего. Основные отличия от подобных решений включают использование комплексного сырья (полимер + древесный наполнитель), замену токсичного толуола (в работах Кудрина И.М. [9]) на стирол, а также оптимизацию параметров активации.

Экспериментальная часть

В ходе исследования был проведен комплекс работ по получению активного угля. На рис. 1 представлены промежуточные продукты каждого из этапов получения активного угля. На первом этапе готовилась сырьевая смесь, состоящая из АБС-стружки, ДСП-стружки и стирола в соотношении 1:2:4 по массе (13 г : 26 г : 52 г соответственно). Данный состав был установлен в работе [9] как оптимальный. Приготовленная смесь выдерживалась в течение семи дней для достижения равномерного распределения компонентов перед термической обработкой.

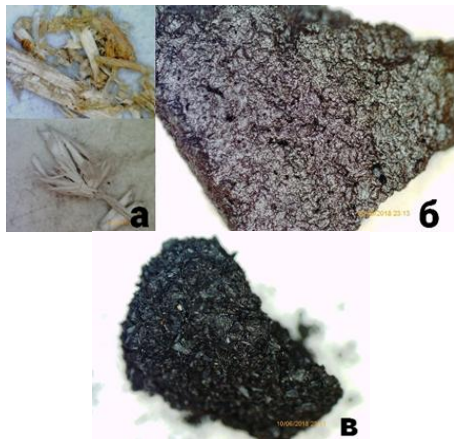


Рис. 1. Сырье (а) и продукты каждого из этапов получения активного угля (увеличение $\times 500$): карбонизация (б), активация (в)

Процесс карбонизации проводили при температуре $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, которая контролировалась с помощью термопары, находящейся в средней части трубчатого закрытого снизу реактора. Скорость подъема температуры составляла $7\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в минуту. По достижению необходимой температуры эксперимента образец выдерживали в реакторе в течение 1 часа, а затем охлаждали до комнатной температуры. Изменение внешнего вида материала по мере термообработки (рис. 1) свидетельствует о постепенном его зауглероживании и формировании первичной макропористой структуры. Осредненные показатели выхода целевого продукта по отношению к сырью представлены в таблице 1.

Таблица 1. Выход твёрдого продукта пиролиза по отношению к сырьевой композиции

Показатель	Значение в опытах				
	1	2	3	4	среднее
Выход карбонизата, %	14,5	20,3	13,0	16,5	16,1

Значения выхода карбонизата весьма малы по сравнению с выходом летучих продуктов, что объясняется преобладанием в сырье стирола, играющего роль растворителя.

После завершения этапа карбонизации полученный продукт подвергался формованию. Для этого его тщательно измельчали в фарфоровой ступке до получения однородного порошкообразного состояния, требуемого для последующего смешивания со связующим компонентом – каменноугольной смолой (КУ), которая добавлялась к измельчённому карбонизату в различных пропорциях. Прессование полученной смеси осуществляли в ручном и гидравлическом прессе в виде таблеток в трёх вариантах. Первая формовка проводилась с содержанием смолы 50% при давлении 10 атм. Вторая формовка – 50% смолы при давлении 5 атм. Третья – 40% смолы при давлении 5 атм. После формования образцы находились в сушильном шкафу при $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1,5 часов для удаления остаточной влаги и стабилизации структуры.

Наблюдения за полученными образцами показали существенную зависимость механических характеристик от параметров формования. Образец, спрессованный при давлении 10 атм., демонстрировал значительно более высокую плотность и механическую прочность по сравнению с материалами, полученными при 5 атм. Особенно заметной была разница в устойчивости к крошению краёв таблеток – при более высоком давлении прессования кромки оставались ровными и не осыпались. Стоит отметить, что уменьшение содержания каменноугольной смолы с 50 до 40% при одинаковом давлении (5 атм.) также приводило к ухудшению, но не критичному, механических

свойств таблеток. Эти наблюдения свидетельствуют о важности обоих параметров – как давления формования, так и содержания связующего компонента – для получения прочных формованных карбонизатов.

Завершающий этап термической обработки – активация карбонизатов водяным паром, позволяющая контролировать формирование пористой структуры активатов. Данный процесс проводился в проточном трубчатом реакторе, исключая доступ атмосферного воздуха. Температурный режим: температуру активации T и выдержку при ней t задавали регулятором с обратной связью по температуре, измеряемой термопарой непосредственно в реакторе. Особенностью методики было введение водяного пара с постоянным расходом около 1 г/мин (до 9,5 г/г карбонизата) при достижении $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, непрерывная подача его при нагреве и выдержке образцов и отключение только после охлаждения реактора до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Выходы и структурно-адсорбционные показатели целевых продуктов (активных углей) представлены в табл. 2.

Наилучшие адсорбционные характеристики демонстрирует образец, активированные при температуре $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30 минут. В частности, для образца, сформованного с 50% содержанием каменноугольной смолы под давлением 5 атм, наблюдается высокий суммарный объём пор ($1,12\text{ см}^3/\text{г}$), что свидетельствует о развитой пористой структуре. При этом адсорбционная способность по воде ($0,25\text{ см}^3/\text{г}$) и органическим соединениям, таким как бензол ($0,32\text{ см}^3/\text{г}$) и тетрахлорметан ($0,13\text{ см}^3/\text{г}$), подтверждает пригодность материала для улавливания паров стирола.

Таблица 2. Выход и структурно-адсорбционные свойства целевых продуктов активации

Показатели		Условия формования							
		50% КУ / 10 атм		50% КУ / 5 атм		40% КУ / 5 атм		30% КУ / 10 атм	
		Условия активации							
		T=850°C; t=45 мин	T=750°C; t=45 мин	T=750°C; t=45 мин	T=800°C; t=30 мин	T=750°C; t=25 мин	T=800°C; t=0 мин	T=750°C; t=0 мин	T=800°C; t=0 мин
Выход активата, %		выгорание до золы	47	33	30	44	42	40	38
Суммарный объём пор V _Σ , см ³ /г			1,41	1,4	1,12	1,15	1,69	1,25	1,17
Объём сорбирующих пор, см ³ /г	V _{SH2O}		0,16	0,47	0,25	0,20	0,21	0,21	0,30
	V _{SCCl4}		0,09	0,08	0,13	0,08	0,11	0,08	0,14
	V _{SC6H6}		0,18	0,21	0,32	0,19	0,19	0,19	0,20

Снижение содержания связующего до 40 или 30% приводит к ухудшению механических свойств и адсорбционных показателей. Критически важным является контроль температурного режима: при 850 °С происходит полное выгорание угля, тогда как температуры 750–800 °С обеспечивают значительный выход продукта (30–47%) без потери его поглотительных свойств. Таким образом, для получения активного угля с высокой адсорбционной способностью и механической прочностью рекомендуются условия формования: добавка 50 масс. % каменноугольной смолы к карбонизату, давление формования 5 атм и последующая его активация водяным паром при 800 °С в течение 30 минут.

Заключение

Проведенные исследования позволяют разработать этапы формования и активации возможного производства активного угля из промышленных отходов сантехнического производства. В процессе формования важную роль играет сочетание добавки связующего в пределах 40–50% от массы карбонизата и давления прессования 5–10 атм. Активацию полученной композиции водяным паром следует проводить при 800 °С в течение 30 мин – данный режим обеспечивает наибольшее развитие микропор по бензолу.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности изучаемой технологии, сочетающей экологические преимущества (утилизация производственных отходов) и экономическую эффективность (создание потенциально недорогого сорбента природоохранного назначения). Для дальнейшего совершенствования разработки рекомендуется сосредоточить внимание на оптимизации состава сырьевой смеси, в частности, добавки стирола. Особое значение будут иметь сравнительные испытания полученного активата с промышленными аналогами при поглощении паров стирола из газовых потоков, которые позволят оценить его конкурентные преимущества.

Список литературы

- Seiki T., Keito B., Hitoshi T., Takeo N. Adsorption of Styrene on activated carbon and regeneration of spent activated carbon // Chemical & pharmaceutical bulletin. Vol.28. Т. 12. Р. 3681-3685. DOI: 10.1248/cpd.28.3681
- Weiping Zh., Guiying Li, Huajie Yin etc. Adsorption and desorption mechanism of aromatic VOCs onto porous carbon adsorbents for emission control and resource recovery: recent progress and challenges // Environmental science: Nano. 2022. Vol. 9. Р. 81. DOI: 10.1039/d1en00929j
- ГОСТ 10003-90. «Стирол. Технические условия»
- Vaclav J., Martin C., Pata V. etc. Design and surface enhancement of ABS parts manufactured by Arburg plastic freeforming (APF) using chemical vapor treatment // Materials & Design. 2025. Vol. 253. Р. 113940. DOI: 10.1016/j.matdes.2025.113940
- Федеральный классификационный каталог отходов: сайт. URL: <https://rpn.gov.ru/fkko/> (Дата обращения: 13.05.2025)
- Шайманова Р., Шайманова Н. и др. Виды клея, используемые при производстве ДСП // Research Focus. 2023. Vol. 2. Т.1. Р. 210-213
- Романов Н.М. Современные связующие для производства древесных плит. Состояние и тенденции // Вестник ВНИИДРЕВ. 2014. 6(11). С. 183
- Qingqing H., Yu Zh., Chongqing W. Porous carbon derived from waste plastics for energy and environmental application: A review // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. Р. 115368. DOI: 10.1016/j.jece.2025.115368
- Кудрин И.М., Цуркин Ю.Д. и др. Исследование результативности переработки отходов полистирола и древесностружечных плит на активные угли // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том XXXVII, № 12 (274). – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2023. С. 83-86.

УДК 67.08

Брагазина Е.М., Ермоленко Б.В.

Статистический анализ образования и обращения с растительными отходами сельского хозяйства и пищевой промышленности в Евросоюзе, Германии и России

Брагазина Екатерина Максимовна – студент 2 курса магистратуры кафедры промышленной экологии; ekaterina.bragazina@gmail.com.

Ермоленко Борис Викторович – к.т.н., доцент кафедры промышленной экологии;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»;

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В статье приведен статистический анализ образования и обращения с растительными отходами сельского хозяйства и пищевой промышленности. Впервые рассматриваются данные по управлению растительными отходами не только по Российской Федерации, но и по Евросоюзу (ЕС) и Германии с целью сравнения опыта в данном направлении.

Ключевые слова: растительные отходы, статистика, сельское хозяйство, пищевая промышленность.

Statistical analysis of the formation and management of plant waste from agriculture and the food industry in the European Union, Germany and Russia

Bragazina E.M., Ermolenko B.V.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation.

The article provides a statistical analysis of the formation and management of plant waste from agriculture and the food industry. For the first time, data on plant residue management is being reviewed not only for the Russian Federation, but also for the European Union (EU) and Germany to compare experiences in this area.

Keywords: plant waste, statistics, agriculture, food industry.

Введение

Растительные отходы образуются при выращивании сельскохозяйственных культур в виде пожнивных остатков, а также при переработке сельскохозяйственной продукции на предприятиях пищевой промышленности (например, подсолнечный шрот, свекловичный жом, картофельная мезга).

Данная статья является дополнением к предыдущему исследованию [1], в котором был проведен анализ объемов образования и обращения с растительными отходами в РФ по данным за 2019–2021 гг. Далее приведена статистика за 2022–2024 гг. по РФ и впервые представлены похожие сведения по Евросоюзу и Германии для оценки и сравнения уровня и направлений переработки растительных отходов.

Проблема статистического анализа информации

Приведение корректных цифр для анализа образования и обращения с растительными отходами сельского хозяйства и пищевой промышленности в Европе вызывает определенные сложности. Это обусловлено труднодоступностью информации, связанной со слабой детализацией статистики ввиду объединения данных по органическим отходам под общим понятием «биоотходы» или «пищевые отходы». В ЕС отсутствует единая форма отчетности, в каждой стране свои системы классификации информации, из-за чего данные для статистики агрегируют, и проанализировать их в рамках конкретных видов отходов не представляется возможным.

Производство биоотходов в ЕС и Германии

На рис. 1 и 2 отражена тенденция образования отходов в ЕС и Германии на основе официальной статистической базы данных ЕС – сайта «eurostat».

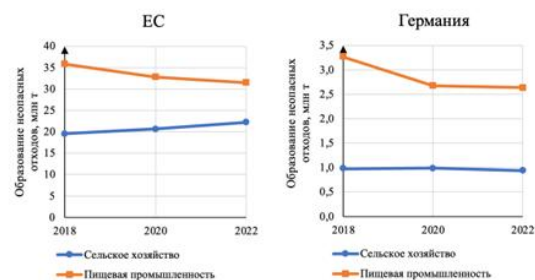


Рис. 1 – Масса опасных отходов, образованных в отраслях сельского хозяйства и пищевой промышленности в ЕС и Германии [2].

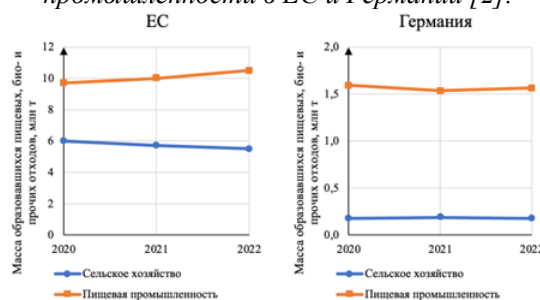


Рис. 2 – Масса пищевых, био- и прочих отходов, образованных в отраслях сельского хозяйства и пищевой промышленности в ЕС и Германии [2].

Согласно Директиве 2008/98/ЕС приоритетной задачей является сокращение образования отходов [3]. Однако с этой точки зрения статистика неоднозначна. В ЕС количество образовавшихся биоотходов в пищевой промышленности увеличивается, в то время как в сельском хозяйстве ситуация ровно наоборот. В Германии цифры более стабильны, но существенной тенденции на понижение не наблюдается.

Статистика обращения с биоотходами в Германии

Согласно принятому в 2012 году «Закону об экономике замкнутого цикла Германии», целями цикличной экономики являются предотвращение

образования отходов и их утилизация [4]. Смысл заключается в снижении потребления ресурсов за счет эффективного использования сырья и сохранения его в промышленном цикле как можно дольше.

Экономика замкнутого цикла окупается с финансовой точки зрения. Ее внедрение в сектора экономики Германии делает их эффективными. Около 11 000 компаний обеспечивают годовой оборот примерно в 80 миллиардов евро. Инфраструктура включает в себя 14 500 объектов, которая обеспечивает высокие показатели переработки коммунальных отходов (67%), производственных и коммерческих отходов (около 70%), а также отходов строительства (почти 90%) [5].

Данные о количестве переработанных отходов в сельском хозяйстве и пищевой промышленности в графическом виде представлены на рис. 3 на основе информации из базы данных Федерального статистического управления Германии.



Рис. 3 – Масса переработанных отходов сельского хозяйства и пищевой промышленности по данным за 2018 и 2022 гг. [6].

За последние 30 лет объем биологических отходов значительно увеличился и продолжает расти. По данным Федерального статистического управления, в 2020 году в Германии около 13,65 млн тонн биоразлагаемых отходов из частных домохозяйств, предприятий коммерческого и промышленного происхождения было переработано на установках для компостирования (около 7,41 млн тонн), а также на установках для анаэробного сбраживания и биогазовых установках (около 6,24 млн тонн).

В том же году в статистике отходов было зарегистрировано 1102 установки для компостирования и анаэробного сбраживания, перерабатывающие биоразлагаемые отходы отдельно или вместе с другими. Из них 218 – сооружения для компостирования биологических отходов, 599 – для компостирования экологически чистых отходов, 227 – установки для анаэробного сбраживания (биогазовые установки) и 58 комбинированных установок для анаэробного сбраживания и компостирования. В общей сложности 97 % всех биоразлагаемых отходов, поступивших на предприятия по переработке отходов в 2020 году, подверглись рекуперации. Из биологических отходов было произведено около 4,8 миллиона тонн компоста, который использовался в качестве удобрений и улучшителей почвы в различных отраслях [5].

На основе изученной информации можно выделить основные направления утилизации растительных отходов в Германии:

- компостирование;
- анаэробное сбраживание – производство биометана.

Статистика по образованию и обращению с растительными отходами в России

В РФ информацию об обращении с отходами, сортированными по каталогу ФККО, можно найти на сайте Росприроднадзора в отчетах по форме 2-ТП (отходы).

На рис. 4 представлена динамика образования растительных отходов.



Рис. 4 – Образование растительных отходов сельского хозяйства и пищевой промышленности в РФ в период 2022-2024 гг. (на основе отчетности по форме 2-ТП) [7].

Вторым по приоритету в иерархии обращения с отходами согласно ФЗ №89 является путь предотвращения образования отходов [8]. Однако стоит понимать, что в данных отраслях, в отличие от других, имеет место влияние на количество произведенной продукции уровня урожайности, который в свою очередь зависит от многих факторов (погодные условия, действие удобрений и пр.). Поэтому количество образуемых отходов в определенной степени зависит от колебания уровня урожайности, и в отслеживании динамики это необходимо учитывать.

По представленным данным существенного тренда на уменьшение образования отходов не наблюдается.

Информация о дальнейшем обращении с отходами представлена на рис. 5.

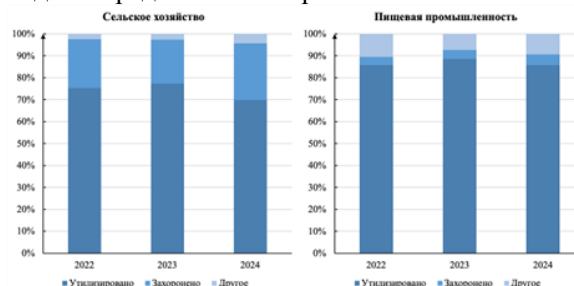


Рис. 5 – Обращение с растительными отходами сельского хозяйства и пищевой промышленности в РФ в период 2022-2024 гг. (на основе отчетности по форме 2-ТП) [7].

Согласно паспорту отраслевой программы Минсельхоза РФ «Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в сфере сельского хозяйства на 2022 - 2030 годы» прогнозируемая доля утилизированных отходов сельского хозяйства в общем объеме образованных отходов в 2023 году должна составить 73%, к 2030 году – 80% [9].

В 2023 году процент утилизации растительных сельскохозяйственных отходов составил 77,4%, однако в следующем году возник значительный спад до 69,9%, что ниже ожидаемых значений. Тем не менее наблюдается положительная тенденция, так как в 2021 году данный показатель равнялся 61,4% [1].

Здесь стоит отметить рост процента захоронения – с 22,2% в 2022 до 25,9% в 2024. Вероятно, есть необходимость в проработке стабильных вариантов переработки, чтобы поддерживать и улучшать данный показатель.

Касательно растительных отходов пищевой промышленности ситуация более обнадеживающая и стабильная – на протяжении трех последних лет процент утилизации не был ниже 85%. Имеется тренд на повышение количества отходов, направляемых на захоронение – с 3,6% в 2022 до 4,9% в 2024.

Детальной статистики об используемых методах переработки в РФ не ведется, но можно ознакомиться с дальнейшими планами, связанными с утилизацией растительных отходов.

Заместителем Председателя Правительства при подведении итогов работы компании «Российский экологический оператор» (РЭО) в 2024 была обозначена необходимость во введении стимулирующих мер по использованию вторсырья. Также перед РЭО вице-премьером была поставлена задача реализации отраслевых программ по интеграции вторичных ресурсов в сельском хозяйстве [10].

По распоряжению Правительства РФ от 25.01.2018 № 84-р была утверждена «Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года». В ней обозначены следующие перспективные методы переработки:

- аэробное и анаэробное биотермическое компостирование с целью получения биогумуса и компоста;
- производство биогаза;
- производство твердого топлива;
- производство строительных изделий.

Согласно Стратегии, организация предприятий по переработке биоотходов поможет сократить уровень их захоронения и обеспечить производство почвенных смесей и удобрений, необходимых при мелиорации и рекультивации [11].

Заключение

Анализ образования и обращения с отходами в ЕС, Германии и РФ показал во многом схожие тенденции, которые заключаются в следующем:

- стабильные показатели образования растительных отходов;

- рост процента утилизации остатков.

В случае Германии акцент сделан на компостировании и анаэробном сбраживании биоотходов. Учитывая рост уровня захоронения растительных остатков в РФ, нашей стране следует обратить внимание на европейский опыт и внедрить поддержку упомянутых направлений утилизации для дальнейшего улучшения показателей переработки.

Проведенный анализ свидетельствует о высокой актуальности разработки региональных программ комплексной переработки растительных отходов. Учитывая сложность данной проблемы и ограниченность финансовых ресурсов для ее решения, ключевое значение имеет разработка инструментов, позволяющих определить оптимальные направления инвестирования в инфраструктуру по утилизации таких отходов.

В качестве подобного инструментария предполагается разработка экономико-математической модели частично целочисленного линейного программирования, которая поможет выбрать наиболее эффективный способ переработки.

Список литературы

1. Е. М. Брагазина, Б. В. Ермоленко. Анализ возможных направлений использования растительных отходов сельского хозяйства и пищевой промышленности - Текст : непосредственный // Успехи в химии и химической технологии. – 2023. – Т. 37, № 12(274). – С. 22-26.
2. Database [Electronic resource] // eurostat. – 2025. – URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/explore/all/envir?lang=en&subtheme=env.env_was&display=list&sort=category (дата обращения: 17.04.2025).
3. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance) [Electronic resource] // Official Journal of the European Union. – 2008. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098> (дата обращения: 02.04.2025).
4. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) [Elektronische Ressource] // Bundesgesetzblatt. – 2012. – URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg> (дата обращения: 03.04.2025).
5. Waste Management in Germany 2023. Facts, data, figures [Electronic resource] // Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection (BMUV). – 2024. – P. 50. – URL: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/abfallwirtschaft_2023_en_bf.pdf (дата обращения: 20.04.2025).
6. Veröffentlichungsverzeichnis [Electronic resource] // Destatis Statistisches Bundesamt. – 2025. – URL: https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/Veroeffentlichungsverzeichnis/_inhalt.html# (дата обращения: 21.04.2025).
7. Информация об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, размещении отходов

производства и потребления [Электронный ресурс] // Росприроднадзор : [сайт]. – 2025. – URL: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/> (дата обращения: 22.04.2025).

8. Российская Федерация. Законы. Об отходах производства и потребления : Федеральный закон № 89-ФЗ : [принят Государственной думой 22 мая 1998 года : одобрен Советом Федерации 10 июня 1998 года] - Текст : электронный // Консультант-Плюс : [сайт]. – 2025. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/ (дата обращения: 07.04.2025).

9. Паспорт отраслевой программы. Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в сфере сельского хозяйства на 2022 - 2030 годы : утв. Правительством Российской Федерации 29 дек. 2022 г. №16133п-П11. – 2022. – 48 с.

10. Виктория Абрамченко приняла участие в публичном отчёте о деятельности ППК «Российский экологический оператор» // Правительство России : [сайт]. – 2024. – URL: <http://government.ru/news/51360/> (дата обращения: 23.04.2025).

11. Распоряжение Правительства РФ от 25.01.2018 № 84-р «Об утверждении Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года» - Текст : электронный // Консультант-Плюс : [сайт]. – 2025. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_289114/ (дата обращения: 25.04.2025).

УДК 628.31

Бхандари М.Р.¹, Кастро Карраско З.Д.¹

Оценка возможности применения альдольной конденсации для очистки фенол-формальдегидных модельных сточных вод

Бхандари Мария Рамовна – студентка группы Э-31; problemka0970@yandex.ru

Кастро Карраско Заира Джулианне – студентка группы Э-31; castrocarrascozaira@gmail.com

¹ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В настоящей работе исследуется возможность применения альдольной конденсации в качестве метода очистки модельных сточных вод, содержащих фенол и формальдегид. Альдольная конденсация представляет собой перспективный подход к удалению органических загрязнителей из водных растворов. Целью данного исследования является оценка ключевых факторов, влияющих на эффективность процесса, включая температуру, pH среды и концентрацию реагентов. В ходе работы были проведены лабораторные эксперименты, результаты которых указывают на потенциальную применимость альдольной конденсации для снижения содержания формальдегида в сточных водах. Установлено, что использование CaO в качестве коагулянта оказалось неэффективным для удаления фенола в исследуемых условиях, в то время как эффективность очистки от формальдегида напрямую зависит от дозы CaO и температуры процесса. Полученные данные вносят вклад в разработку новых методов очистки сточных вод и могут быть полезны для промышленных предприятий, сталкивающихся с проблемой загрязнения вод фенолом и формальдегидом.

Ключевые слова: сточные воды, фенол, коагуляция, формальдегид, очистка

Assessment of the Feasibility of Aldol Condensation for the Treatment of Phenol-Formaldehyde Model Wastewater

Bkhandari M.R.; Castro Carrasco Z. J.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

This study investigates the feasibility of applying aldol condensation as a treatment method for model wastewater containing phenol and formaldehyde. Aldol condensation represents a promising approach for the removal of organic contaminants from aqueous solutions. The objective of this research is to evaluate the key factors influencing the efficiency of the process, including temperature, pH, and reagent concentrations. Laboratory experiments were conducted, and the results indicate the potential applicability of aldol condensation for reducing formaldehyde concentrations in wastewater. It was determined that the use of CaO as a coagulant was ineffective for phenol removal under the tested conditions, whereas the efficiency of formaldehyde removal was directly dependent on the CaO dosage and process temperature. The findings contribute to the development of novel wastewater treatment methods and may prove valuable for industrial facilities facing challenges related to phenol and formaldehyde contamination.

Keywords: wastewater, phenol, coagulation, formaldehyde, purification

Введение

В настоящее время загрязнение окружающей среды углеводородами представляет собой серьезную экологическую проблему. Основными источниками этих загрязнений являются предприятия нефтехимической, химической и лакокрасочной промышленности, включая производства машиностроительных и аэрокосмических комплексов. Это обуславливает актуальность разработки и внедрения эффективных технологий удаления углеводородов и сопутствующих соединений из промышленных сточных вод и отходов производства. [5]

Фенол и формальдегид относятся к числу наиболее токсичных органических поллютантов, обнаруживаемых в поверхностных водах, куда они поступают со стоками предприятий химической, нефтехимической, фармацевтической и других отраслей промышленности. Для очистки сточных вод от данных загрязнителей перспективным представляется использование комбинированных адсорбционных методов [1]. Формальдегид характеризуется высокой токсичностью, что подтверждается низкими значениями предельно допустимых концентраций (ПДК): 0,5 мг/м³ в воздухе

рабочей зоны и 0,05 мг/л в воде. Это свидетельствует о его высокой опасности даже при низких концентрациях. Проникая в организм человека через дыхательные пути и кожные покровы, формальдегид оказывает негативное воздействие на репродуктивные органы, повреждая генетический материал, а также поражает центральную нервную систему, вызывая неврологические расстройства [6]. В связи с высокой токсичностью и широким распространением формальдегида в промышленных сточных водах, разработка эффективных методов его удаления из воды является актуальной задачей для защиты здоровья населения и сохранения окружающей среды [6].

Фенолы также являются распространенными загрязнителями поверхностных вод, поступающими со стоками промышленных предприятий. Фенол представляет особую опасность из-за его хорошей растворимости в воде. Попадание фенолсодержащих стоков в водоемы ухудшает их санитарное состояние, оказывая негативное воздействие на живые организмы, изменяя режим биогенных элементов и растворенных газов (кислорода, углекислого газа) [2]. Проблема полной очистки производственных стоков от растворенных в воде фенолов является одной из

наиболее важных. Несмотря на огромное число отечественных и зарубежных разработок, данную проблему нельзя считать решенной. Причинами этого является, в частности, то, что многие эффективные способы глубокой очистки сопряжены с большими экономическими и ресурсными затратами, использованием дефицитных реагентов с последующей их регенерацией, утилизацией или захоронением отходов. Поэтому поиск новых эффективных способов очистки промышленных сточных вод является по-прежнему актуальным [3]. Процесс самоочищения водоемов от фенола протекает относительно медленно и его следы могут уноситься течением реки на большие расстояния, поэтому до сброса фенолсодержащие стоки должны подвергаться достаточной очистке. [4]

В связи с высокой токсичностью фенола и формальдегида, в большинстве стран мира установлены строгие нормы и требования к содержанию этих веществ в сточных водах, сбрасываемых в водные объекты. Существующие методы очистки сточных вод от фенола и формальдегида, такие как сорбция, экстракция, обратный осмос, окисление, биологическая очистка, имеют свои ограничения и недостатки. В частности, альдольная конденсация – это химический процесс, позволяющий превратить фенол и формальдегид в более крупные, менее растворимые и менее токсичные соединения, которые могут быть легко удалены из воды путем осаждения или фильтрации. Процесс может быть адаптирован для различных концентраций фенола и формальдегида. Альдольная конденсация может быть использована в качестве предварительной стадии очистки, снижающей концентрацию загрязнителей перед применением других методов.

Оценка возможности применения альдольной конденсации для очистки фенол-формальдегидных модельных сточных вод является актуальной задачей, направленной на разработку эффективного, экономичного и экологически безопасного метода очистки сточных вод от опасных загрязнителей. Успешное решение этой задачи позволит снизить негативное воздействие промышленного производства на окружающую среду и здоровье человека. Цель работы заключалась в оценке потенциальной применимости метода альдольной конденсации в присутствии суспензии оксида кальция (СаО) для удаления фенола и формальдегида из модельного водного раствора.

Экспериментальная часть

Модельный раствор сточной воды готовили следующим образом: в мерную колбу на 1 л ввели 0,5 мл формидрона, 0,2 мл этанола и 0,01 гр фенола и довели объем водопроводной водой.

Проведены две серии экспериментов:

- в первой серии варьировался объем добавляемой суспензии СаО (10%) (1,2,3,5 мл) при фиксированной температуре (60°C); объем модельной сточной воды составлял 200 мл;

- во второй серии варьировалась температура (25-80°C) при фиксированном объеме СаО (10%) (2 мл); объем модельной сточной воды составлял 200 мл.

Оценка эффективности удаления фенола и формальдегида проводили по стандартным спектрофотометрическим методикам определения их концентрации в воде.

В таблице 1 представлены результаты по 1-ой серии экспериментов.

Таблица 1. Значения концентрации фенола и формальдегида в зависимости от дозы СаО

Количество СаО, мл	Концентрации, мг/л	
	Фенола	Формальдегида
Исходный (без СаО)	22,18	1,24
1	25,31	0,97
2	25,92	0,62
3	25,94	0,84
5	26,16	1,09

Установлено, что изменение дозы СаО никак не привело к изменению концентрации фенола, но привело к снижению концентрации формальдегида при дозе 2 мл СаО (10%) на 200 мл модельной сточной воды примерно в 2 раза. Данный факт может свидетельствовать о достаточно эффективной альдольной конденсации формальдегида в определенном диапазоне концентраций СаО. Следует отметить, что при увеличении дозы коагулянта СаО наблюдалось снижение эффективности процесса очистки. Вероятно, это возможно по нескольким причинам: 1. Сложение активных частиц: избыточная доза коагулянта может привести к образованию слишком больших агломератов, которые не смогут эффективно осесть или удалиться из воды. 2. Конкуренция коагулянтов: при высоких дозах коагулянт может конкурировать с загрязняющими веществами за связывание. Это может привести к тому, что часть загрязняющих веществ останется в растворенной форме. 3. Избыток ионов: слишком высокие концентрации коагулянта могут создавать избыток ионов в растворе, что затрудняет процесс осаждения и ухудшает качество очистки. Таким образом, важно оптимизировать дозу коагулянта для достижения наилучших результатов очистки.

Вторым этапом эксперимента (табл. 2) было изучение влияния температуры на очистку от фенола и формальдегида, с использованием оксида кальция (СаО) при фиксированном объеме (2 мл СаО 10% на 200 мл пробы), так как при данном объеме раствор лучше всего очистился от формальдегида. Процесс очистки проводился 20 мин при различных температурах: 25°C, 40°C, 60°C и 80°C.

Таблица 2. Значения концентрации фенола и формальдегида в зависимости от температуры

Температура, С°	Концентрации, мг/л	
	Фенола	Формальдегида
Исходный	27,04	1,11
25	27,06	0,38
40	26,84	0,90
60	26,56	0,86
80	23,98	0,79

При всех исследованных температурах наблюдается неэффективное очищение от фенола. Это подтверждает факт низкой эффективности применения СаО в качестве коагулянта по отношению к фенолу. Необходимо учитывать возможность протекания реакций гидратации СаО с образованием Са(ОН)₂ и последующей реакции Са(ОН)₂ с фенолом с образованием фенолята кальция. Эти реакции могут влиять на концентрацию фенола в растворе. Возможно, СаО катализирует разложение фенола с образованием других окрашенных соединений, что приводит к увеличению оптической плотности.

Определено, что наибольшая очистка от формальдегида достигается при температуре 25°C. С увеличением температуры очищение от формальдегида снижается. Однако удаление формальдегида из раствора, вероятно, происходит не только за счет коагуляции, но и за счет химической реакции с Са(ОН)₂, приводящей к образованию других соединений. Возможно, удаление формальдегида с помощью альдольной конденсации в присутствии СаО является экзотермическим процессом, поэтому при понижении температуры равновесие смещается в сторону адсорбции.

Заключение

Установлено, что применение альдольной конденсации в присутствии СаО неэффективен для удаления фенола в исследуемых условиях. Максимальное удаление формальдегида достигается при концентрации СаО, соответствующей 2 мл суспензии на 200 мл модельного раствора. СаО может быть использован в качестве коагулянта для формальдегида. Несмотря на противоречивость

результатов, СаО может быть использован в качестве компонента систем очистки воды от формальдегида, при условии оптимизации условий проведения процесса.

Список литературы

1. Галимова Р. З. Очистка модельных сточных вод, содержащих фенол и формальдегид, отходами валяльно-войлочного производства в режиме динамической адсорбции / Р.З. Галимова, И.Г.Шайхиев, А.С.Гречина // Вестник Казанского технологического университета, 2017. - Т. 20, № 21. - С. 116-118.
2. Степаковских А.С. Общая экология: учебное пособие / А. С. Степаковских. - Москва: Издательство ЮНИТИ, 2000 – 510 с.
3. Орлов Д.С. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении: учебное пособие / Д. С. Орлов, Л.К. Садовникова, И.Н. Лозановская - Москва: Высшая школа, 2002. – 334 с.
4. Рацук М.Р. Очистка промышленных сточных вод от фенольных загрязнений с помощью сорбентов // М.Р. Рацук // Вестник Херсонского национального технического университета, 2016. — №1 (56) – С.61-65.
5. Быкова Е. Г. Биотехнология очистки сточных вод производства смол /Е.Г.Быкова, Р.М.Грачева, Ю.Л. Гуревич, В.П. Костромова, А.Г. Кучкин // Решетневские чтения, 2014. - №18. – С. 347-348.
6. Очистка воды от формальдегида: зачем и как это делать? [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bwt.ru/useful-info/ochistka-vody-ot-formaldegida-zachem-i-kak-ee-osushchestvlyat/> (дата посещения 18.05.2025).

УДК 577.15.08+606.61

Быкова А.А., Решетова О.В., Белов А.А.

Инактивация и стабилизация цистеина хитозаном

Быкова Александра Андреевна, студент 4-го курса факультета биотехнологии и промышленной экологии; Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

Решетова Ольга Владимировна, инженер центра коллективного пользования Российского химико-технологического университета;

Белов Алексей Алексеевич, д.т.н., профессор кафедры биотехнологии, ФГБОУ ВО

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20

*E-mail: ABelov2004@yandex.ru

Изучено действие сроков хранения, высушивания и состава на антиоксидантную активность хитозановых композитов содержащих цистеин. Было установлено, что в процессе хранения происходит твердофазное взаимодействие между компонентами смеси при комнатной температуре. Показано, что хитозан оказывает протекторное действие на цистеин.

Ключевые слова: цистеин, хитозан, антиоксидантная активность, препараты для ранозаживления.

Inactivation and stabilization of cysteine by chitosan

Bykova A.A., Reshetova O.V., Belov A.A.

D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Federation

*e-mail: abelov2004@yandex.ru

The effect of storage duration and composition antioxidant activity of cysteine -containing composites was studied. It was established that during storage, solid-phase interactions occur between the components of the mixture at room temperature. It was shown that chitosan exerts a protective effect on cysteine.

Key words: cysteine, chitosan, antioxidant activity, preparations for wound healing.

Введение

Тиоловые протеазы активно используются в фармацевтических целях, что обусловлено их широкой доступностью [1]. Наиболее широко используемыми представителями растительных цистеиновых протеаз являются бромелаин, папаин и фицин. Ферменты данной группы работают благодаря присутствию в своем активном центре трех аминокислот: цистеина, гистидина и аспарагиновой кислоты. Известно, что протеолитическая активность данных протеаз сильно зависит от тиоловой группы остатка цистеина [2].

Цистеиновые протеазы могут быть подвержены снижению активности вследствие применения определенных ингибиторов, которые препятствуют функционированию сульфгидрильных групп. К таким ингибиторам относят йодацетат, йодацетамид и ионы некоторых тяжелых металлов. Более того, на активность данных протеаз значительное влияние оказывают различные модификации тиоловой группы цистеина в их активном центре. В частности, тиольная группа боковой цепи цистеина способна подвергаться различным окислительным посттрансляционным модификациям, что приводит к её превращению в S-нитрозотиолы, сульфеновые кислоты, сульфиновые кислоты, сульфоновые кислоты, сульфенамиды, персульфиды и разнообразные дисульфиды, включая внутримолекулярные дисульфидные мостики и межмолекулярные дисульфиды [2,3].

Растительные тиоловые протеазы имеют ряд ограничений при применении в промышленности из-за нестабильной структуры, малого срока действия.

Доказано, что иммобилизация цистеиновых протеаз на хитозане позволяет создавать препараты пролонгированного действия за счет контролируемой десорбции вещества с матрицы [2,4].

Цистеин (Cys) – серосодержащая аминокислота, входящая в состав белков и пептидов, проявляет сильное антиоксидантное действие: цистеин нейтрализует повреждающее воздействие свободных радикалов на клетки и снижает окислительный стресс. Цистеин также обладает радиопротекторными свойствами. Для сульфгидрильной (тиоловой) группы характерна исключительно высокая реакционная способность. Тиоловая группа цистеина легко подвергается окислению с образованием дисульфида. Тиоловая группа цистеина легко подвергается модификации альдегидсодержащими веществами. Cys входит в состав активного центра многих ферментов и его модификация ведет к потере ферментативной активности последних. Из литературных источников [5,6] известно, что в свободном цистеине значение рКа тиоловой группы составляет 8,45, что свидетельствует о том, что лишь небольшая часть цистеинов депротонируется в физиологических условиях pH.

Экспериментальная часть

Иммобилизацию в хитозан проводили, смешивая растворы Хт заданной концентрации и необходимых компонентов.

УФ-вид измерения выполнялись с помощью регистрирующего спектрофотометра фирмы Shimadzu UV-2600 (Япония). Спектры ИК получали на ИК Фурье-спектрометре Nicolet 380 (Thermo Scientific, США) методом НПВО (нарушенного полного внутреннего

отражения) в диапазоне $550\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ на приставке, где в качестве оптического материала используется кристалл селенида цинка (ЦКП РХТУ им. Д.И. Менделеева).

Для определения антиоксидантной активности (АОА) использовали реакцию со стабильным свободным радикалом 2,2-дифенил-1-пикрилгидразилом (ДФПГ) [7].

На рис.1,2,3 представлены УФ-вид и ИК спектры Хт, Cys и их композитов. По полученным данным (рис.1), видно, что положения максимумов (с точностью до 1 нм) и значениями максимальных коэффициентов экстинкции (с точностью до 10%) свидетельствует, что отсутствуют сильные химические взаимодействия. Небольшой сдвиг в области 200 нм может являться следствием локального изменения pH, либо отражает слабые невалентные взаимодействия, либо образование олигохитов из-за деполимеризации Хт под действием Cys.

ИК спектры биополимеров очень сложны и их зачастую трудно интерпретировать. Для хитозановых композиций характерно изменение пиков в области $1200\text{--}1000\text{ см}^{-1}$, отражающие собственные колебания экзоскелета в его пиранозной структуре [9]. Кроме того, характеристическими пиками хитозановых композитов являются пики амида 1 (1650 см^{-1}), амида 2 (1580 см^{-1}) и амида 3 (1300 см^{-1}). Данные колебания также вносят значительную помеху в определения пиков перехода цистеина в форму цистина [8].

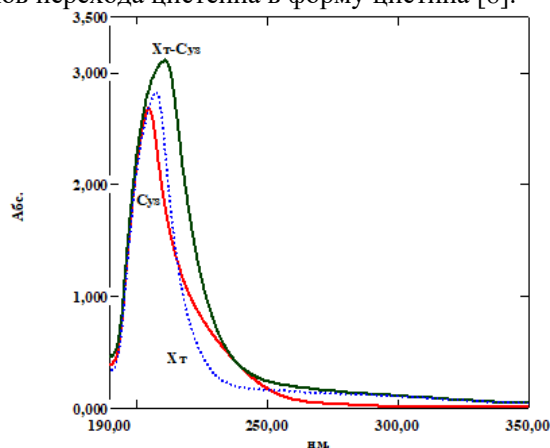


Рис. 1. УФ-вид спектры p-ров Хт, Cys, Хт-Cys

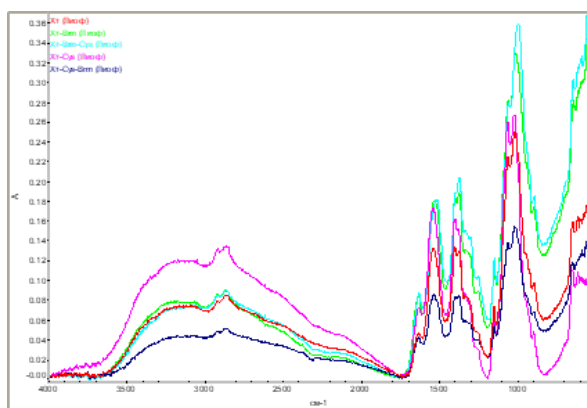
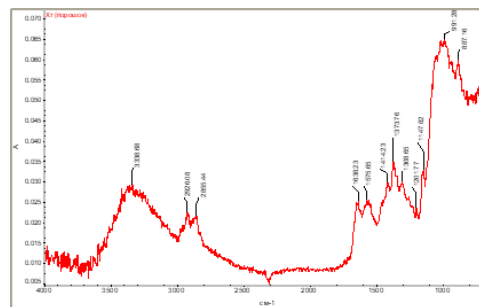
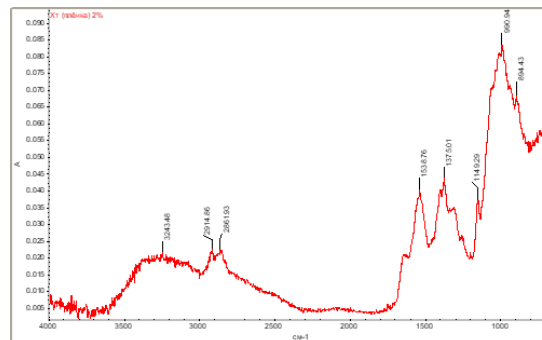


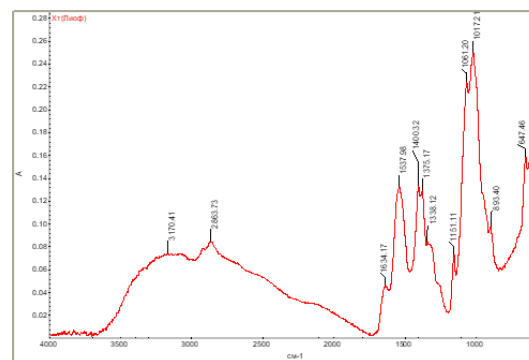
Рис. 2. ИК спектры Хт, Cys, Хт-Cys



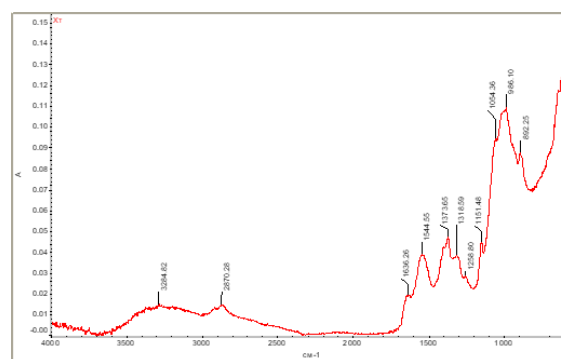
А – Хт порошок



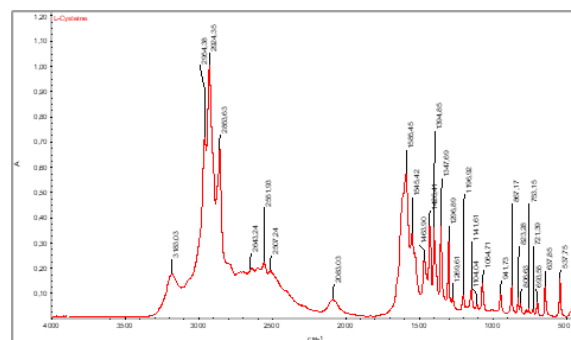
Б – Хт пленка



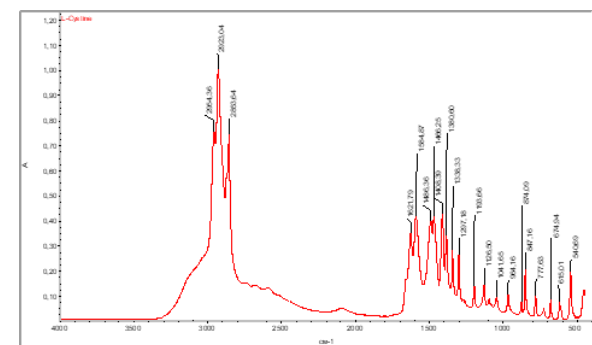
В – Хт губка



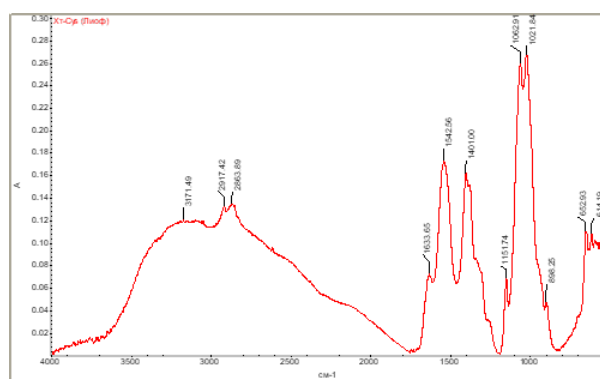
Г – Хт раствор



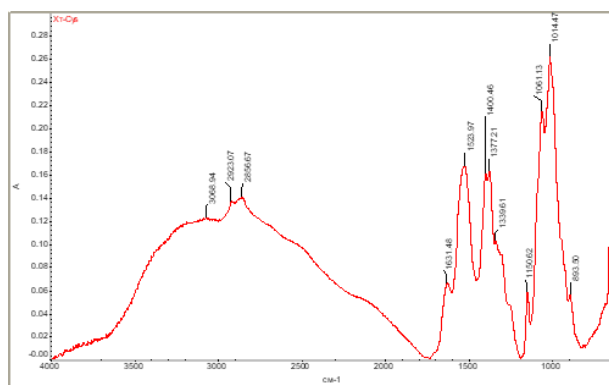
Д – цистеин порошок



E – цистин



Ж – Хт- Cys губка



З – Хт- Cys пленка

Рис.3. ИК спектры Хт, Cys и их композитов

В спектрах образцов есть широкая полоса 3700 – 3000 cm^{-1} с двумя максимумами, принадлежащая валентным колебаниям -ОН и NH связей. Также в обоих образцах наблюдается полоса 3000-2300 с двумя максимумами, отражающая валентные колебания СН-связей. В области 1800-1200 cm^{-1} есть четыре максимума, принадлежащие деформационным колебаниям amino- и CH_2 , CH_3 групп. В области 1200-800 идет широкая полоса, на которой выделяются 3 пика, отображающие валентные колебания C-O, C-N, C-S связей. Для диапазона 800 - 400 cm^{-1} 1 максимум, принадлежащий валентным колебаниям C-S связей. Сильная полоса при 3650 cm^{-1} возникает у вторичных спиртовых групп не связанных водородной связью. Связывание водородными связями значительно сдвигает этот пик

в сторону меньших частот. Но в области 3500-5100 cm^{-1} полоса поглощения аминогрупп. Пиранозное кольцо характеризуется ассиметричными колебаниями 914 cm^{-1} и симметричными колебаниями при 770 cm^{-1} . Характеристика 3450–3225 cm^{-1} обусловлена растяжением связи N–H вторичного N-замещенного амида 3600–3100 Обусловлена колебаниями N–H, O–H связей 2981 cm^{-1} . Обусловлена растяжением связи C–H 3100–2800 Вызвана растяжением C–H связей 1650 Вызвана C=O-растяжением карбоксильной группы 1635–1630 Вызвана колебаниями C–N, N–H связей 1600–1500 Обусловлена наличием C–C-связей 1558–1550 Обусловлена колебаниями C–N, N–H связей 1429 и 1321 Вызваны деформацией C–H в алкильных радикалах аминокислотных остатков 1409–1406 и 1379–1316 Вызваны деформационными колебаниями O–H и C–H в пиранозном кольце 868 и 850 Связаны с процессами деформации ароматического кольца остатков триптофана и тирозина 1200–1000 Обусловлена растяжением C–O- C связей 1150–1050 и 705–570 Обусловлены наличием C–S связей [9].

Было изучено падение АОА Cys и иммобилизованного в хитозановый гель Cys (Хт-Cys) в 1/15М фосфатном буферном растворе (ФБ) pH 6,2 при 25°C и 37°C. Для этого образцы помещались в раствор ФБ 6,2 и через определенные промежутки времени в них определялась АОА. Полученные данные по эффективным константам скорости термоинактивации (по второму порядку) и коэффициенту стабилизации (Θ) приведены в табл.1. Необходимо учитывать, собственную АОА активности олигохитов. Неопределенность в интерпретацию вносит и pH инактивации. pH геля Хт-Cys 4,5 -5,0.

Так же была изучена АОА пленок Хт-Cys и губок Хт-Cys (лиофильно высушенные образцы геля Хт-Cys). Было изучено влияние высушивания на сохранение АОА Хт-Cys.

Трудно, а скорее невозможно разделить АОА препарата Хт-Cys, на индивидуальные составляющие. В процессе гидролитической деструкции образца Cys будет инактивироваться не только за счет температуры и времени, но и за счет олигохитов (связывание активных групп Cys с аминогруппами олигохитов недоступных у высокомолекулярного Хт).

Как видно из полученных данных, хитозан стабилизирует Cys в 1/15М ФБ 6,2 особенно при низких концентрациях и длительных выдержках. Можно выделить две части препарата (k_1 и k_2). Расчет проводили по второму порядку. Следует обратить внимание на значительное увеличение k_2 , что по-видимому связано с уменьшением концентрации Cys. Что подтверждают данные таблицы 1. Данное явление подробно обсуждалось нами в [10].

Таблица 1. Величины эффективных констант скорости инактивации (k_d) полученных препаратов в процессе высушивания (k_1 и k_2) при 25 °C, в темноте

Образец	k_d	k_1 л*г ⁻¹ *час ⁻¹	k_2 л*г ⁻¹ *час ⁻¹	$\Theta = k_{Cys\ 0,1}/k_{in\ prep}$
Cys раствор в ФБ 6,2 $C_{Cys} = 0,1$ мг/мл	—	3,9 (25 °C) 2,4 (37 °C)	24,6(25 °C) 64,5 (37 °C)	1,0
Cys раствор в ФБ 6,2 $C_{Cys} = 0,5$ мг/мл	—	0,24(25 °C)	13,75(25 °C)	2,5
Cys раствор в ФБ 6,2 $C_{Cys} = 1,0$ мг/мл	—	0,04(25 °C) 0,05 (37 °C)	0,09(25 °C) 0,82 (37 °C)	263
p-p Хт-Cys (20:1) в ФБ 6,2 $C_{Cys} = 0,1$ мг/мл	—	0,04(25 °C)	0,34(25 °C)	10
Хт-Cys (20:1) $C_{Cys} = 0,2$ мг/мл	0,17(25 °C)	0,13(25 °C)	0,03(25 °C)	47
Хт-Cys (88:1) $C_{Cys} = 0,1$ мг/мл	—	0,13(25 °C)	0,026 (25 °C)	10
Хт-Cys (40:1) $C_{Cys} = 0,1$ мг/мл	0,28(25 °C)	0,17(25 °C)	0,63 (25 °C)	12

Θ – коэффициент стабилизации. При увеличении концентрации Cys стабильность раствора возрастает. Уменьшение эффективных констант скоростей инактивации второго порядка. Хт уменьшает эффективные константы скорости инактивации.

При увеличении температуры и времени выдерживания скорость инактивации увеличивается, что может быть связано с уменьшением концентрации Cys и/или образованием дополнительно инактиваторов.

Также нами было изучено изменение АОА Cys в процессе хранения губок и пленок Хт- Cys в темноте при комнатной температуре, а также изменение АОА губок и пленок Хт- Cys при выдерживании в растворе 1/15М ФБ pH 6,2 (рис.4). За 1 принималась максимальная 1/АОА препарата.

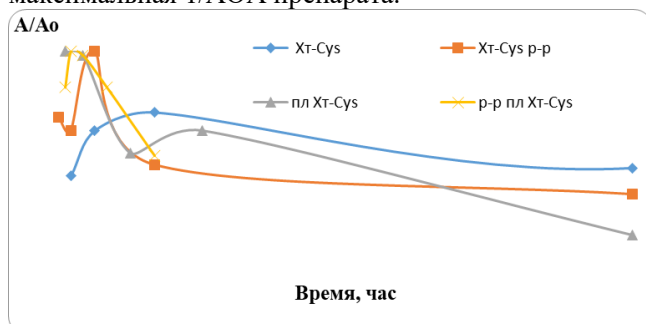


Рис. 4. Изменение АОА Хт-Сус при 25 °C в 1/15М ФБ 6,2

p-p пл Хт-Сус - пленка препарата помещалась в раствор и измерялась АОА раствора
p-p Хт-Сус - навеска губки препарата помещалась в раствор и измерялась АОА раствора
Хт-Сус губки помещались в раствор ФБ и измерялась суммарная АОА и раствора и самого препарата
пл Хт-Сус - пленки препарата помещались в раствор ФБ и измерялась суммарная АОА и раствора и самого препарата

В процессе высушивания и хранения пленок Хт-Сус Cys очень быстро теряет АОА. После высушивания на воздухе остается около 50% первоначальной АОА. Было установлено, что в процессе хранения в препаратах Хт-Сус по-видимому происходят твердофазные модификации, теряются АОА и растворимость в 1/15М ФБ 6,2.

Производные Хт теряют способность растворяться в растворе 1/15М ФБ pH 6,2 в следствии удаления уксусной кислоты (растворитель Хт), образования хитина, либо твердофазной модификации цистеина.

Заключение

При взаимодействии Cys с раствором хитозана, Cys возможно может заместить ацетат ионы у амино групп Хт, а в образовавшемся производном (аналогично уксуснокислому хитозонию) может происходить модификация остатков Cys в результате чего Хт теряет способность растворяться в воде, а Cys теряет АОА. При наличии карбонильных соединений (ДАЦ, формальдегид) процесс ускоряется (потеря Cys АОА) в результате дополнительных реакций.

Список литературы

1. Lowe G. The structure and mechanism of action of papain //Philosophical transactions of the royal society of London. Biological sciences. – 1970. – Т. 257. – №. 813. – С. 237-248.
2. Сакибаев Ф.А., Холявка М.Г., Артюхов В.Г. Особенности пространственных структур молекул растительных протеаз-бромелина, фицина и папаина // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2020. – №. 3. – С. 57-62.
3. Смолина А.М., Ванюшенкова А.А., Иванова С.Н. и др. Цистеин как индикатор инактивации тиоловых протеаз // Химия и технология биологически активных веществ для медицины и фармации. IV Школа молодых ученых: тезисы докладов. – 2024. – С. 91.

4. Ibrahim M.A., Gawad A.E.D.A. Spectroscopic analyses of chitosan interactions with amino acids // Journal of computational and theoretical nanoscience. – 2012. – Т. 9. – №. 8. – С. 1120-1124.
5. Ulrich K., Jakob U. The role of thiols in antioxidant systems // Free Radical Biology and Medicine. 2019. V. 140. P. 14-27.
6. Clement G. E., Hartz T. P. Determination of the microscopic ionization constants // Journal of chemical education. 1971. V. 48. №. 6. P. 395.
7. Molyneux P. The Use of the Stable Free Radical Diphenylpicryl-hydrazyl (DPPH) for Estimating Antioxidant Activity // Songklanakarin J. Sci. Technol. – 2004. - Vol. 26. – Iss.2. – P.211-219.
8. Берестова Т. В. и др. Окисление L-цистеина в присутствии солей переходных металлов // Вестник Башкирского университета. – 2020. – Т. 25., №2. – С. 297-301.
9. Elviri, L., Asadzadeh, M., Cucinelli, R., Bianchera, A., & Bettini, R. Macroporous chitosan hydrogels: Effects of sulfur on the loading and release behaviour of amino acid-based compounds//. Carbohydrate Polymers, (2015). 132, 50–58. doi:10.1016/j.carbpol.2015.06.048
10. Белов А.А. Разработка промышленных технологий получения новых медицинских материалов на основе модифицированных волокнообразующих полимеров, содержащих биологически активные белковые вещества. Дисс. на соис. уч. степ. докт. техн. наук М., РХТУ. 2009. 385 с.

УДК 542.06+577.1

Васильев И.П., Красноштанова А.А.

Получение липосом в качестве носителей нуклеозидов для пероральной доставки

Васильев Илья Павлович – студент 3 курса бакалавриата кафедры биотехнологии; email: ilyaposta@gmail.com

Красноштанова Алла Альбертовна – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры биотехнологии; email: aak28@yandex.ru.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», Москва, Россия; 125480, ул. Героев Панфиловцев, дом 20.

В статье рассмотрены способы получения липосом на основе подсолнечного и яичного лецитина. В качестве объекта включения был выбран аденозин. Определена емкость двух видов липосом по аденозину. Исследовано высвобождение аденозина из липосом двух видов в модельных средах, соответствующих различным отделам ЖКТ. Установлено, что большая часть аденозина высвобождается в тонком кишечнике.

Ключевые слова: аденозин, нуклеозид, липосомы, везикулы, ЖКТ, пероральная доставка.

Liposomes as protein carriers for oral delivery

Vasiliev I.P.¹, Krasnoshtanova A.A.¹,

¹ D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article discusses the methods of obtaining liposomes based on sunflower and egg lecithin. The nucleoside adenosine was used as the inclusion object. The capacity of two types of liposomes was determined by the inclusion of adenosine. The release of adenosine from two types of liposomes in model media corresponding to different parts of the gastrointestinal tract was studied. It has been established that most of the adenosine is released in the small intestine.

Key words: adenosine, nucleoside, liposomes, vesicles, gastrointestinal tract, oral delivery.

Введение

В современной медицинской биотехнологии значительная часть исследований, направленных на создание наночастиц для направленной доставки биологически активных веществ (БАВ), изучает липосомальные формы лекарств. Липосомы являются искусственными нановезикулами, основным компонентом которых являются фосфолипиды, и представляют собой полые капсулы. Преимуществами липосом как средств транспортировки БАВ являются: безопасность самих везикул для организма, а также снижение токсичности и аллергенности инкапсулированных веществ; защита содержимого липосомы от действия разрушающих ферментов и агрессивных сред организма (например, желудочного сока); возможность доставки лекарственных средств напрямую в клетку [1]. Экономическая составляющая создания липосомальных форм лекарств также является преимуществом, поскольку формирование липосом происходит самопроизвольно из фосфолипид-содержащих суспензий, компоненты для которых, в свою очередь, относительно дешево получают из сырья растительного или животного происхождения.

Для получения липосом чаще всего используют лецитины – жироподобные вещества, представляющие собой смесь фосфолипидов с триглицеридами и небольшим количеством других веществ. Например, подсолнечный лецитин, используемый в этой работе, содержит фосфатидилхолин (ФХ), фосфатидилэтанолламин (ФЭ), фосфатидилинозитол (ФИ), жирные кислоты, триглицериды и углеводы. Яичный лецитин схож с ним по составу, но содержит больше насыщенных

жирных кислот, а также другие жирные кислоты и фосфолипиды, такие как, сфингомиелин.

Включаемые компоненты – нуклеозиды имеют множество функций: они являются предшественниками энергетической валюты организма, структурными элементами нуклеиновых кислот и могут выполнять регуляторные функции. Включение нуклеозидных лекарственных препаратов в липосомы позволяет безопасно и точно доставлять их пероральным способом. Эти препараты зачастую являются противовирусными средствами, хотя могут иметь и другие эффекты. Например, препарат «Ацикловир» – синтетический аналог гуанозина, применяется для лечения герпеса и ветряной оспы [2]. В данной работе используется аденозин, который обладает антиаритмичным и вазодилататорным действием [3].

Целью работы является получение липосом, нагруженных аденозином и исследование высвобождения их содержимого в условиях симуляции желудочно-кишечного тракта.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования использовали аденозин компании «Merck», подсолнечный лецитин с содержанием фосфолипидов 97%, производства компании «Лецитин наш», и яичный лецитин с содержанием фосфолипидов от 70% до 80%, производства компании «NaturesPlus».

Липосомы получали инъекционным методом [4]. Дзета-потенциал полученных липосом и их размер определяли методом динамического светорассеяния [5]. Концентрацию аденозина определяли спектрофотометрически, измеряя оптическую плотность при длине волны 259 нм. Моделирование отделов ЖКТ проводили согласно Международному стандартизированному протоколу [6].

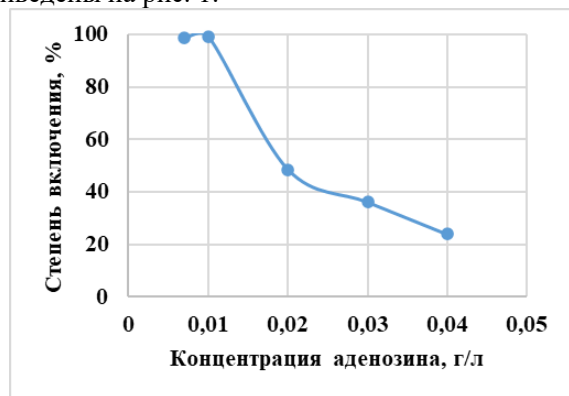
На первом этапе работы определяли концентрацию яичного и подсолнечного лецитина, при которой образуются липосомы с оптимальным размером (3-5 мкм) и со значением абсолютной величины дзета-потенциала более 30 мВ. Липосомы с такими параметрами можно легко получить инъекционным методом, при этом их размер оптимален для внутриклеточного проникновения с помощью пиноцитоза.[7] Полученные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1. Размеры и дзета потенциал липосом полученных инъекционным методом.

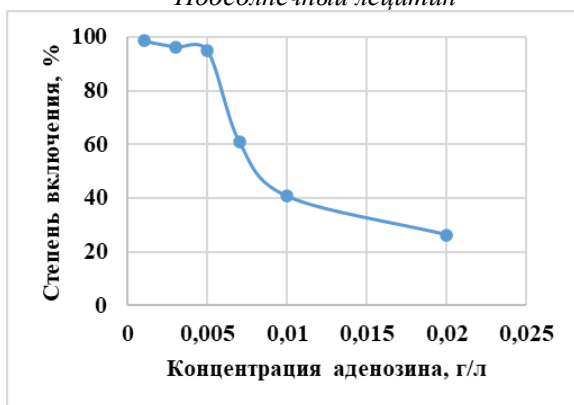
Подсолнечный лецитин		Яичный лецитин	
$ \zeta\text{-потенциал} $, мВ	Размер, мкм	$ \zeta\text{-потенциал} $, мВ	Размер, мкм
36 $\pm$ 3	5,3 $\pm$ 0,4	36 $\pm$ 2	5,1 $\pm$ 0,3
32 $\pm$ 2	5,7 $\pm$ 0,4	45 $\pm$ 2	5,2 $\pm$ 0,3
40 $\pm$ 2	6,1 $\pm$ 0,3	40 $\pm$ 2	6,1 $\pm$ 0,3
32 $\pm$ 2	5,3 $\pm$ 0,3	42 $\pm$ 2	5,3 $\pm$ 0,3
36 $\pm$ 2	6,1 $\pm$ 0,3	36$\pm$2	5,4$\pm$0,3
33$\pm$2	5,4$\pm$0,3	38 $\pm$ 2	5,8 $\pm$ 0,3

По полученным данным были выбраны липосомы на основе подсолнечного и яичного лецитина с ζ -потенциалом 33 $\pm$ 2, размером 5,4 $\pm$ 0,3 и 36 $\pm$ 2 и 5,4 $\pm$ 0,3 соответственно.

На следующем этапе работы определяли оптимальную концентрацию аденозина для полного включения в липосомы. Полученные данные приведены на рис. 1.



Подсолнечный лецитин



Яичный лецитин

Рис. 1. Зависимость степени включения аденозина в липосомы от начальной концентрации аденозина в растворе

Исходя из графика, оптимальной концентрацией аденозина для включения в липосомы является 0,01 г/мл для подсолнечного, а для яичного - 0,005 г/мл. При указанных концентрациях аденозина степень его включения составляет 99% и 98,5% соответственно.

На следующем этапе работы изучали динамику высвобождения аденозина из липосом на основе яичного

и подсолнечного лецитина в условиях симуляции ЖКТ. Полученные данные приведены на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что из липосом на основе подсолнечного лецитина в условиях ротовой полости высвобождается 6% аденозина, 15% высвобождается в среде желудка, в условиях среды кишечника – 19%. Суммарная степень высвобождения составила 31%. Из липосом на основе яичного лецитина в условиях ротовой полости высвобождается 33% нуклеозида, желудка - 19%, кишечника - 35%. Суммарная степень высвобождения составила - 92%.

Для обоих типов липосом наибольшая степень высвобождения наблюдается в среде тонкого кишечника, однако, для подсолнечного лецитина, в среде желудка высвобождается сопоставимое количество аденозина, а для яичного – в среде ротовой полости.

Загрузка нуклеозидов в липосомы с последующим высвобождением преимущественно в кишечнике важна, в первую очередь, для защиты от разрушения в желудке. Желудочный сок имеет высокую кислотность (рН ~1,5–3) и содержит пищеварительные ферменты, которые разрушают сложные вещества. В области экстремальных рН нуклеозиды распадаются на азотистые основания и моносахариды. Скорость такого разложения у пуринов выше, чем у пиримидинов на два порядка. Липосомы, состоящие из фосфолипидных мембран, сохраняют кислотность среды внутри себя, защищая нуклеозид от высокой кислотности желудочного сока. Также стоит отметить, что поглощение биологически активных веществ, проходящих через ЖКТ, преимущественно происходит в кишечнике. Молекулы и мелкие частицы поглощаются энтероцитами – клетками кишечного эпителия, из них липофильные вещества и частицы попадают в лимфатическую систему, а остальные проходят через печень. Последнего стоит избегать, чтобы снизить токсичность лекарств и повысить их усвояемость, что также достигается заключением вещества в липосомы.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение путей стабилизации липосом, нагруженных нуклеозидами.

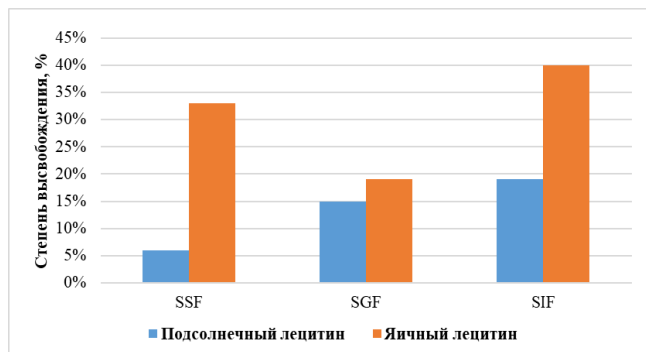


Рис. 2. Степень высвобождения аденозина в модели ЖКТ. SSF (*Simulated Salivary Fluid*) – модельная слюнная жидкость, среда: ротовая полость. SGF (*Simulated Gastric Fluid*) – модельная желудочная жидкость, среда: желудок. SIF (*Simulated Intestinal Fluid*) – модельная кишечная жидкость, среда: тонкий кишечник

Заключение

Определены концентрации аденозина для оптимального включения в липосомы на основе яичного и подсолнечного лецитина.

Исследовано высвобождение аденозина из липосом в условиях симуляции ЖКТ: 51% для подсолнечного лецитина и 92% для яичного. Определены степени высвобожденного нуклеозида для каждого отдела ЖКТ.

Установлено, что максимум высвобождения аденозина из обоих типов липосом приходится на среду тонкого кишечника. Однако в случае использования подсолнечного лецитина наблюдается высокая степень высвобождения аденозина в желудке, а в случае яичного – в ротовой полости. Это требует дальнейших исследований, направленных на стабилизацию липосом.

Список литературы:

1. Шанская А. И., Пучкова С. М., Яковлева Т. Е. Липосомы-перспективная форма лекарственных препаратов // Медицина экстремальных ситуаций. – 2011. – №. 3 (37). – С. 100-104.
2. Закирова Н.Ф. и др. Фосфорамидаты ацикловира - потенциальные анти-ВИЧ-препараты // Известия Академии наук. Серия химическая. – 2014. – № 5. – С. 1192-1198;
3. Чаулин А. М. Аденозин и его роль в физиологии и патологии сердечно-сосудистой системы // Кардиология: Новости. Мнения. Обучение. – 2019. – №. 3 (22). – С. 37-45.
4. Адзерихо И. Э. и др. Оценка физико-химических свойств систем доставки лекарственных средств на основе липосом // Новое в хирургии: наука, практика, обучение. – 2021. – С. 21-23.
5. Зеликина, Дарья Викторовна. Физико-химический анализ роли структуры биологически активных липидов и биополимеров в формировании и функциональности их комплексов : диссертация ... кандидата химических наук : 02.00.04 / Зеликина Дарья Викторовна; [Место защиты: Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук]. — Москва, 2019. - 156 с.
6. Xavier M. et al. From mouth to gut: microfluidic in vitro simulation of human gastro-intestinal digestion and intestinal permeability // Analyst. – 2023. – Т. 148. – №. 14. – С. 3193-3203.
7. Леонова М. В., Белоусов Ю. Б. Современные лекарственные формы и системы доставки лекарственных средств (часть 2) // Клиническая фармакология и терапия. – 2009. – Т. 18. – №. 2. – С. 62-69.

УДК 502.174.3

Вашурин А.В., Ермоленко Б.В.

Оценка потенциалов развития солнечной и ветровой энергетики и применение гис-системы на территории Красноярского края

Вашурин Артем Вячеславович – студент 1 курса магистратуры группы МЭ-11 факультета биотехнологии и промышленной экологии; vashurin.artiom2011@yandex.ru

Ермоленко Борис Викторович – к.т.н., доцент кафедры биотехнологии и промышленной экологии ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»; bermol@mail.ru
Россия, Москва, 125480, ул. Героев Панфиловцев, дом 20.

В статье рассмотрены возможности использования геоинформационных технологий для ресурсных оценок и оценены потенциалы возобновляемых источников энергии на территории Красноярского края Сибири. Разбирается информационная основа ГИС-продукта.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, ветроэнергетика, картографирование, геоинформационная система, электроэнергетический потенциал, топливный потенциал, теплоэлектрический потенциал.

Assessment of solar and wind energy development potentials and application of gis technology in Krasnoyarsk territory

Vashurin A.V., Ermolenko B.V.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Russian Federation

The article considers the possibilities of using geoinformation technologies for resource assessments and evaluates the potentials of renewable energy sources on the territory of Krasnoyarsk region of Siberia. The information basis of GIS-product is analyzed.

Keywords: renewable energy, wind energy, mapping, geoinformation system, electric power potential, fuel potential, thermoelectric potential.

Основная часть

Из-за того, что альтернативный источник энергии является возобновляемым ресурсом, он занимает место в ряду традиционных источников энергии для энергии, которые работают на нефти, природном газе и угле, а их сгорание выделяет углекислый газ в атмосферу, что может привести к глобальному потеплению и загрязнению окружающей среды. [1]

Основная причина, по которой люди ищут альтернативные источники энергии, заключается в возможности получения энергии из возобновляемых или практически неисчерпаемых природных ресурсов и явлений, а также их экологичности и экономичности. На данный момент использование альтернативных источников энергии стало широко распространенным способом решения проблемы энергоснабжения, как в промышленных масштабах, так и для личных нужд.

Популярность альтернативной энергетики в мире обусловлена, прежде всего, истощением природных ресурсов. И хотя в Российской Федерации нет дефицита традиционных энергоносителей — наша страна на долгие годы вперед обеспечена ископаемым топливом, но в силу возрастающей потребности в децентрализованном электроснабжении районов с низкой плотностью заселения, стремлении к повышению доступности энергоресурсов и достижению энергобезопасности страны в целом, все больше внимания уделяется альтернативным источникам энергии. На сегодняшний день доля России в мировом производстве альтернативных источников энергии составляет 0,9%, что говорит о том, что рынок альтернативной энергетики только начинает свое развитие. [2]

Как считают эксперты, рынок альтернативной энергетики в России является одним из немногих

секторов экономики страны, который будет стремительно развиваться в ближайшие годы. Благодаря сочетанию богатых российских ресурсов возобновляемой энергии и новейших технологий, применяемых в области возобновляемой энергетики в России, можно ожидать получения выгодных экономических результатов при инвестициях на развитие возобновляемой экономики в будущем. Его привлекательность также способствует тому, что в нем присутствует большое количество проектов, которые имеют относительно небольшой размер вложений, что является благоприятной почвой для получения инвестиций от компаний малого и среднего бизнеса. Большинство крупных российских госкомпаний, в свою очередь, не проявляют интереса к данному сектору, что означает, что он остается в рыночной среде. Власти проявили интерес к развитию рынка, что привело к более благоприятному отношению к его участникам — иностранным инвесторам и производителям оборудования. [3]

Ситуация на рынке альтернативных источников энергии в Сибири складывается не самым благоприятным образом. В настоящее время, на рынке можно встретить небольшое количество компаний, которые не специализируются исключительно на использовании определенного вида источника альтернативной энергии, а занимаются установкой оборудования, которое может использовать различные виды альтернативной энергетики. Данное обстоятельство обусловлено не географическими, а, скорее всего, отсутствием рынка альтернативных источников в стране в целом. Рынки ветряных и солнечных батарей являются наиболее перспективными в Сибири.

Экспериментальная часть

Для расчета ветрового и солнечного потенциалов на территории Красноярского края района использовались исходные данные из программы NASA POWER. Полученные после скачивания Excel-таблицы имеют следующее наполнение (таблица 1, 2). В них приведены средние скорости и направление ветра каждого часа каждого суток каждого месяца для 10 лет, начиная с 2013 года, заканчивая 2023 на

высоте 50 метров от земли и средняя суммарная инсоляция на 1 м² горизонтально расположенной поверхности в любой выбранной точке территории за каждый час времени с 2013 по 2023 год. Данные располагаются по месяцам на разных листах. Все расчеты и исходные данные в статье приведены для точек с координатами 73.2265 с.ш. 90.52697 в.д. и 74.20905 с.ш. 105.63746 в.д.

Таблица 1. Исходные данные для ветра

73.23, 90.53	Январь	Часы суток месяца									
Год	Дни месяца	0	1	2	3	...	19	20	21	22	23
2013	1	5,6	5,52	5,75	6,05	...	3,32	3,1	2,85	2,64	2,68
2013	2	2,89	3,13	3,26	3,24	...	3,51	3,18	2,88	2,73	2,75
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2023	31	4,65	5,21	5,75	5,99	...	6,79	6,9	7,21	7,49	7,53

Таблица 2. Исходные данные для солнца

73.23, 90.53	Сентябрь	Часы суток месяца									
Год	Дни месяца	0	1	2	3	...	19	20	21	22	23
2013	1	0	0	0	0	...	13,11	0	0	0	0
2013	2	0	0	0	0	...	12,1	0	0	0	0

Обработка этих данных позволила определить энергетические потенциалы, а также потенциалы ресурсосбережения. Потенциалы для ветроустановок были рассчитаны для высоты: 120; 140; 41,5 и 30 м.

Электроэнергетический потенциал - количество электрической энергии в кВт·ч, получаемой при использовании кинетической энергии ветра еже часно, таблицы 3, 4.

Таблица 3. Почасовой электроэнергетический потенциал для точки с координатами 73.2265 с.ш. 90.52697 в.д., 120 м (ветер)

73.23, 90.53	Месяц	Часы суток месяца									
		0	1	2	...	...	...	21	22	23	
W _{ээ} , кВт	январь	2827	3097	3035	...	...	...	3053	3068	3091	
W _{ээ} , кВт	февраль	2982	2979	2947	...	...	...	2967	3024	3039	
W _{ээ} , кВт	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
W _{ээ} , кВт	декабрь	2833	2815	2822	...	...	...	2824	2815	2836	

Таблица 4. Почасовой электроэнергетический потенциал для точки с координатами 74.20905 с.ш. 105.63746 в.д., солнце

	W(мес)	W(сут)	0	1	2	3	...	19	20	21	22	23
			0	0	0	0	...	1,81927 3	0	0	0	0
на м ²	7994,60 3	266,486 8	0	0	0	0	...	0,36913	0	0	0	0
на панель	17930,2 9	597,676 5	0	0	0	0	...	0,82788 6	0	0	0	0

Суточный электроэнергетический потенциал представляет собой электроэнергетический потенциал, рассчитанный для такого временного интервала, как сутки.

$$W_{qm}^{сут.ветр.эл.эн.пот.} = \sum W_{qmc}^{час.ветр.эл.эн.пот.} \quad (2)$$

W_{qm}^{ветр.сут.эл.эн.пот.} – суточный электроэнергетический потенциал в точке q в месяце m, кВт·ч/сут; W_{qmc}^{час.ветр.эл.эн.пот.} – часовой электроэнергетический потенциал, кВт.

Месячный электроэнергетический потенциал является расчетным электроэнергетическим потенциалом, определенным за количество дней каждого месяца года. Для февраля было взято 28 дней.

$$W_{qm}^{мес.ветр.эл.эн.пот.} = W_{qm}^{сут.ветр.эл.эн.пот.} \cdot m$$

W_{qm}^{мес.ветр.эл.эн.пот.} – месячный электроэнергетический потенциал в точке q, в месяце m, кВт·ч/мес; W_{qm}^{сут.ветр.эл.эн.пот.} – суточный электроэнергетический потенциал, кВт·ч/сут; m – количество дней в месяце.

Годовой электроэнергетический потенциал. Электроэнергетический потенциал для временного интервала, равного году (таблица 5, 6).

$$W_q^{\text{год.ветр.эл.эн.пот.}} = \sum W_{qt}^{\text{мес.ветр.эл.эн.пот.}}$$

$W_q^{\text{год.ветр.эл.эн.пот.}}$ - годовой электроэнергетический потенциал в точке q, кВт*ч/г
 $W_{qt}^{\text{мес.ветр.эл.эн.пот.}}$ - месячный электроэнергетический потенциал в точке q, в месяце m, кВт*ч/мес

Таблица 5. Годовой электроэнергетический потенциал для точки с координатами 73.2265 с.ш. 90.52697 в.д. (ветер)

Высота ветряка, м	120	140	41,5	30
$W_q^{\text{год.эл.эн.пот.}}$ МВт*ч/г	48591	55211	11621	18239

Таблица 6. Годовой электроэнергетический потенциал для точки с координатами 73.2265 с.ш. 90.52697 в.д. (солнце)

Координаты	73.22 с.ш. 90.52 в.д.
$\tilde{W}_{q(m^2)}^{\text{год.солн.эл.эн.пот.}}$, кВт*ч/г	246

Топливный потенциал является обобщенным показателем расхода энергии. Измеряется в тоннах условного топлива. Перевод из электроэнергетического потенциала в топливный осуществляется с помощью переводного коэффициента.

$$M_q^{\text{ветр.топл.пот}} = W_q^{\text{год.ветр.эл.эн.пот.}} \cdot 0,3445 \frac{\text{т. усл. т}}{\text{тыс. кВт} \cdot \text{ч}}$$

$M_q^{\text{ветр.топл.пот}}$ – топливный потенциал в точке q, т у.т.; $W_q^{\text{год.ветр.эл.эн.пот.}}$ – электроэнергетический потенциал, МВт*ч/г.

На одну установку электроэнергетический потенциал рассчитывается путем умножения полученного потенциала на м² на площадь одной солнечной батареи. Размеры солнечной батареи модели HVL-455/HJT – 2134x1051x35 мм. Площадь данной солнечной панели составляет: 2,134 * 1,051 = 2,243 м².

Был произведен пересчет полученных электроэнергетических потенциалов для суточных, месячных, годовых показателей.

Теплоэнергетический потенциал показывает количество тепловой энергии в Гкал, которое можно произвести путем преобразования ветровой энергии в тепло. Также позволяет оценить экономию тепловой энергии, получаемой при сжигании органических топлив. Рассчитывается, исходя из данных о топливном потенциале. Из соответствующего его топливного потенциала получают суточный, месячный, годовой теплоэнергетические потенциалы, в статье приведены данные для годового электроэнергетического потенциала (таблица 6, 7).

$$Q_q^{\text{ветр.тепл.пот.}} = \frac{1}{0,1486} * M_q^{\text{ветр.топл.пот}}$$

$Q_q^{\text{ветр.тепл.пот.}}$ – теплоэнергетический потенциал в точке q, Гкал; $M_q^{\text{ветр.топл.пот}}$ – топливный потенциал, т у. т.

Расчет ресурсосберегающего потенциала проводится из данных о топливном потенциале. В нашем случае проводились вычисления для годовых потенциалов ресурсосбережения. Для каждого из видов топлива коэффициент пересчета свой. Все потенциалы получают делением годового топливного потенциала на соответствующий коэффициент.

$$M_q^{\text{ветр.пот.сб.}} = \frac{1}{k_{\text{густ}}} * M_q^{\text{ветр.топл.пот}} \quad (4.1.29),$$

$M_q^{\text{ветр.пот.сб.}}$ – потенциал ресурсосбережения в точке т, т/тыс.м³; $M_q^{\text{ветр.топл.пот}}$ – топливный потенциал, т у.т.

Таблица 6. Электроэнергетический потенциал, тепловой и теплоэнергетический годовые потенциалы (ветер)

73.23, 90.53	120	140	41,5	30
$M_q^{\text{ветр.топл.пот}}$, т у.т./уст.	82,81041374	93,84035002	1,991764	1,281566
$Q_q^{\text{ветр.тепл.пот.}}$, Гкал/уст.	161762,1531	183308,0693	3890,720	2506,415
$W_q^{\text{год.ветр.эл.эн.пот.}}$, кВт*ч/г	24037,85595	27239,5791	578,1609	372,0075
73.23, 105.64	120	140	41,5	30
$M_q^{\text{ветр.топл.пот}}$, т у.т./уст.	83,1504415	94,42070797	1,942055	1,2332779
$Q_q^{\text{ветр.тепл.пот.}}$, Гкал/уст.	162426,3645	184441,7426	3793,616	2408,115
$W_q^{\text{год.ветр.эл.эн.пот.}}$, кВт*ч/г	24136,55777	27408,04295	563,7314	357,8459
73.23, 90.53 (солнце)				
$\tilde{W}_{q(m^2)}^{\text{год.солн.эл.эн.пот.}}$, кВт*ч/м ²	13,45	$W_q^{\text{год.солн.эл.эн.пот.}}$, МВт*ч/установка	386,16	
$Q_q^{\text{год.солн.тепл.пот.}}$, Гкал/уст.	570672	$M_q^{\text{год.солн.топл.пот}}$, т у.т./уст.	84801	

В настоящее время происходит активное вовлечение ГИС-технологий в область возобновляемой энергетики.

Поскольку солнечная энергия и энергия ветра становятся все более привлекательной в использовании, то прогнозирование, которое интегрировано в системы управления энергией, становится все более ценным для операторов энергосистем, что в дальнейшем приводит к необходимости использования ГИС-продуктов для решения поставленных задач комплексного использования возобновляемых ресурсов энергии.

Географическая информационная система (ГИС) – это система, которая представляет собой комплекс компонентов, состоящих из компьютерных средств, программного обеспечения, географических данных и пользователей, а также выполняет функции ввода, интегрирования, хранения, обработки, анализа, моделирования и визуализации географической информации.

В данной работе для хранения, анализа и обработки данных использовалась свободная кроссплатформенная геоинформационная система, которая состоит из настольной (QGIS Desktop) и серверной частей (QGIS Server и QGIS Web Client).

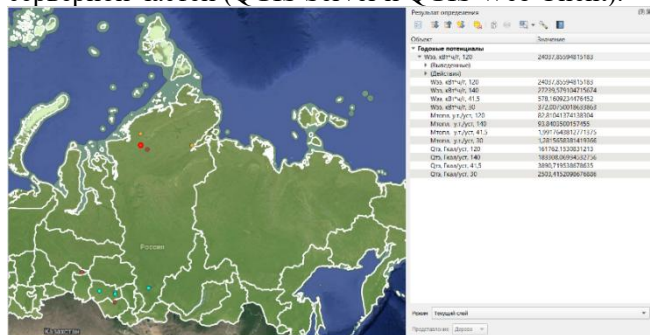


Рисунок 1. Информация о годовых
электроэнергетических, топливных и
теплоэнергетических потенциалах для точки с
координатами 73.2265 с.ш. 90.52697 в.д.

Набор используемых данных состоит из базы с 2013 по 2023 год включительно. На рисунке 1 показан общий вид созданной карты, при нажатии на точку,

справа появляется информационная панель с данными о годовых электроэнергетических, топливных и теплоэнергетических потенциалах.

Целью создания геоинформационной системы (ГИС) является обобщение информации по производству и потреблению тепловой и электрической энергии в Красноярском крае, а также о потенциальной возможности замены твердого и жидкого углеводородного топлива (нефть, мазут, дизель, уголь) на возобновляемые источники энергии (ветровые, солнечные станции, геотермальные источники).

Заключение

В Сибири есть возможность развития альтернативной энергетики. Территория Сибирского Федерального округа обладает большими запасами гидро-, ветро- и других возобновляемых энергоресурсов, что должно привлечь на этот рынок крупные компании, зарубежных инвесторов и локальных потребителей отдаленных районов Сибири, где нет централизованного энергоснабжения и приходится использовать дорогие дизельные электростанции.

В работе представлен опыт создания специализированной геоинформационной системы на базе программного продукта QGIS Desktop для территории Красноярского края. В результате разработаны слои карты, которые содержат информацию о ветровых энергетических потенциалах.

Список литературы

1. А. да Роза. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы./ А. да Роза; пер.с англ. Д. Лазарев, Д. Ефимов, С. Киселева, В. Синельщиков: издательство: Интеллект, МЭИ – 700 с..

2. В поисках альтернативы./Областной журнал «Самара и Губерния», номер 1#2012 (апрель). 65 с.

3. Первое крупное исследование рынка альтернативной энергетики в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2010/pervoe-kрупnoe-issledovanie-rynkaalternativnoi-energetiki-v-rossii> (дата обращения: 26.05.2025).

УДК 620.97

Вердегло Д.С., Прутских М.С., Ермоленко Б.В.

Анализ предпосылок развития ветровой и солнечной энергетики на территории Уральского федерального округа

Вердегло Дарья Сергеевна – студент группы Э-41; verdeglo03@mail.ru.

Прутских Максим Сергеевич – аспирант кафедры промышленной экологии; maxim.prutskikh@yandex.ru.

Ермоленко Борис Викторович – доцент кафедры промышленной экологии; bermol@mail.ru.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В статье рассмотрены предпосылки развития ветровой и солнечной энергетики на территории Уральского федерального округа. Проведена оценка почасовых, суточных, месячных и годовых энергетических потенциалов солнечной и ветровой энергии в узлах географической сетки с шагом 0,25 градуса по параллелям и 0,5 градуса по меридианам. Определены значения годовых ресурсосберегающих и экологических потенциалов. В качестве примера приведены графики почасовых и месячных электроэнергетических потенциалов энергии солнца и ветра для января и июля месяцев в разных точках территории УФО.

Ключевые слова: предпосылки развития, энергетика, солнечная, ветровая, потенциалы, Уральский федеральный округ

Analysis of the prerequisites for wind and solar energy development in the Ural federal district

Verdeglo D.S., Prutskikh M.S., Ermolenko B.V.

D. Mendelev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article considers the prerequisites for the development of wind and solar energy in the territory of the Ural Federal District. The hourly, daily, monthly and annual energy potentials of solar and wind energy at the nodes of the geographical grid are estimated in increments of 0.25 degrees along the parallels and 0.5 degrees along the meridians. The values of annual resource-saving and environmental potentials are determined. As an example, the graphs of hourly and monthly electric power potentials of solar and wind energy for the months of January and July in different points of the territory of the Ufa region are given.

Key words: prerequisites for development, energy, solar, wind, potentials, Ural federal district

Индустриализация территории, активное развитие мировой экономики и высокие темпы роста населения, потребности которого все увеличиваются, приводят к повышению энергопотребления. Основным источником электроэнергии в Российской Федерации являются теплоэлектростанции (ТЭС, ТЭЦ). На 1 января 2025 года доля тепловых электростанций в общей структуре установленной мощности генерирующего оборудования России составила 64,9%, а доля производства электроэнергии 63,26% [1], (рис. 1).

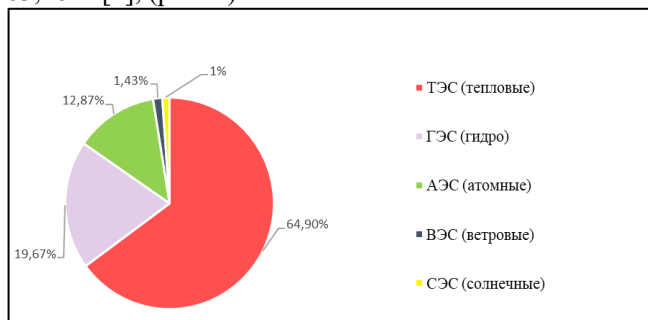


Рис 1. Структура установленной мощности электростанций России на 01.01.2025 г., (%)

Для выработки электроэнергии на ТЭЦ сжигается органическое топливо (природный газ, мазут, уголь, дизельное топливо, торф и др.), которое является исчерпаемым и невозобновляемым источником энергии. Выбросы загрязняющих веществ (ЗВ), образующиеся в результате сгорания топлива в топках котлов теплоэлектростанций, вносят наибольший вклад в локальное и глобальное

загрязнение атмосферного воздуха. Выработки энергии с использованием угля, газа, мазута и дизельного топлива делают энергетику источником наиболее сильного негативного воздействия на окружающую среду, включая химическое и тепловое загрязнение атмосферного воздуха и водоемов, а также потребление большого количества пресной воды и органического ископаемого топлива, которое может служить ценным сырьем для нефтехимической и газохимической промышленности. Учитывая размеры страны и низкую плотность населения во многих ее районах, организация централизованного энергоснабжения в этих регионах экономически нецелесообразна, что приводит к значительному увеличению стоимости доставки топлива, а, следовательно, электрической и тепловой энергии для населения и различных производственно-хозяйственных объектов. К числу таких территорий относится и часть Уральского федерального округа (УрФО). Особенности региона, экологические и экономические проблемы развития тепловой энергетики служат основными предпосылками развития возобновляемой энергетики в УрФО в качестве инструмента обеспечения более надежного энергоснабжения, решение его экологических, экономических и социально-экономических проблем.

В настоящее время во всех регионах страны реализованы или планируются к реализации проекты строительства объектов ВИЭ-генерации и в большинстве случаев создания солнечных (СЭС) и ветровых (ВЭС) электростанций. Уральский федеральный округ, в состав которого входят 4

области и 2 автономных округа, расположен в пределах Урала и Западной Сибири. В силу различия в географическом положении, климате и рельефе местности на территории УрФО наблюдается значительная разница в количестве солнечной инсоляции. На северные районы (Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа (АО)) приходится меньшее количество инсоляции, которое составляет в среднем за день от 1,5 кВт*ч/м² до 2,5 кВт*ч/м². По мере продвижения в центр округа (Свердловская область и часть Челябинской области) показатель инсоляции увеличивается и варьируется от 2,5 до 4 кВт*ч/м². На юго-востоке области (Курганская и Тюменская области) значение около 4 кВт*ч/м², в некоторых регионах достигает 5 кВт*ч/м². Юг и юго-восток федерального округа обладают большим потенциалом для развития альтернативных источников энергии, а именно солнечных электростанций (СЭС), что может способствовать улучшению экологических и экономических показателей региона. Что касается ветровой энергии, то скорости ветра, пригодные для достаточно эффективной эксплуатации ветровых электростанций, присущи как северным территориям Урала, так и части и южных районов округа.

Средняя плотность населения Уральского федерального округа составляет 6,74 человека на квадратный километр, однако расположенные ближе к северу автономные округа характеризуются более низкими значениями этого показателя: Ханты-Мансийский АО — 3,29 чел./км²; Ямало-Ненецкий АО — 0,67 чел./км².

Традиционные методы электроснабжения подобных районов ориентированы на подключение к Единой энергосистеме России по линиям электропередачи (ЛЭП) или создание децентрализованных зон выработки энергии, то есть стационарных и передвижных дизельных электростанций (ДЭС). Первый вариант довольно ресурсоемкий, что ставит под вопрос повсеместное использование ЛЭП для обеспечения энергией труднодоступных или малонаселенных районов. Основные проблемы, которые возникают при использовании дизельных электростанций — плохое техническое состояние самих ДЭС, большие расстояния подвоза топлива, слабое развитие транспортной инфраструктуры и, как результат, высокая стоимость топлива и энергии. Помимо этого, большинство источников существующего традиционного автономного энергоснабжения являются убыточными [2]. Следовательно, использование возобновляемых источников энергии в подобных регионах может решить проблему обеспечения населения электричеством и теплом.

Для оценки возможности использования возобновляемых источников энергии был произведен расчет ветрового и солнечного потенциала на территории Уральского федерального округа. Использовались исходные статистические данные из базы NASA POWER, из которой скачана повседневная почасовая статистическая информация

за годы начиная с 2012-го по 2023-й в узлах географической сетки территории УрФО с шагом 0,5° по параллелям и 0,25° по меридианам. Такой шаг был выбран, поскольку для рассматриваемого региона характерны существенные изменения условий формирования потоков ветровой и солнечной энергии от территории к территории из-за непостоянства рельефа местности, территориальных и сезонных различий характера подстилающих поверхностей в точках оценки потенциалов с разной широтой местности. Во всех узлах сетки оценены электроэнергетические потенциалы солнца и ветра с дифференциацией по часам и месяцам, а также годовые электроэнергетические, теплоэнергетические, топливные, ресурсосберегающие, экологические и экономические потенциалы для 1-го вида фотоэлектрических панелей (ФЭП) и 4-х видов ветроэнергетических установок (ВЭУ). С учетом специфики региона рассматривались ресурсосбережение и предотвращение загрязнения атмосферы при замещении ТЭЦ, работающих на природном газе, мазуте и углях 4-х марок, солнечными и ветровыми электростанциями. Это позволяет не только оценивать возможности использования конкретного генерирующего оборудования для удовлетворения графиков нагрузки потребителей в любой рассматриваемой точке территории УрФО, но и проводить эколого-экономическое обоснование проектируемых систем энергоснабжения.

Для иллюстрации результатов исследования на графиках (рис. 2-7) и в таблицах 1 и 2 в качестве примера представлены значения всех перечисленных выше потенциалов солнечной и ветровой энергии в пяти разных точках территории УрФО: Северная (69.25 с.ш.; 65.3 в.д.), Западная (64.25 с.ш.; 60.5 в.д.), Южная (52.5 с.ш.; 59 в.д.), Восточная (64.14 с.ш.; 82.45 в.д.), Центральная (63.75 с.ш.; 66.5 в.д.). Оценка произведена для СЭС из 1000 ФЭП HVL-455/HJT и одной ВЭУ Gamesa G128-5.0MW высотой 120 м.

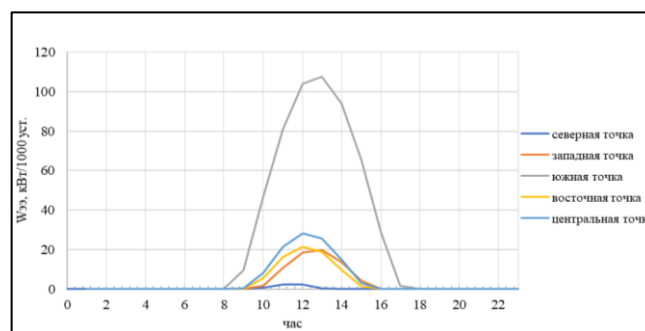


Рис. 2. Графики почасовых электроэнергетических потенциалов солнца в январе на территории УрФО.

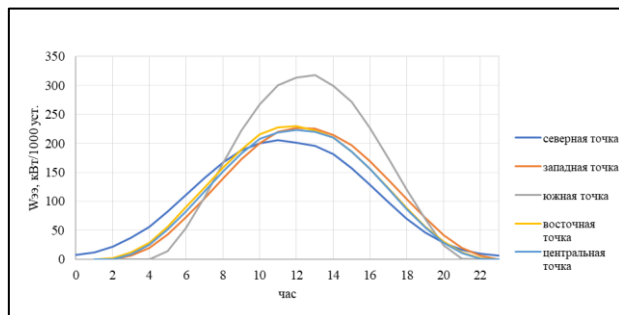


Рис. 3. Графики почасовых электроэнергетических потенциалов солнца в июле на территории УрФО.

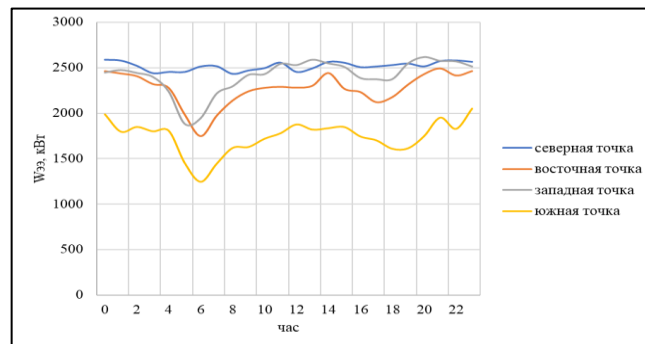


Рис. 6. Графики почасовых электроэнергетических потенциалов ветра в июле на территории УрФО.

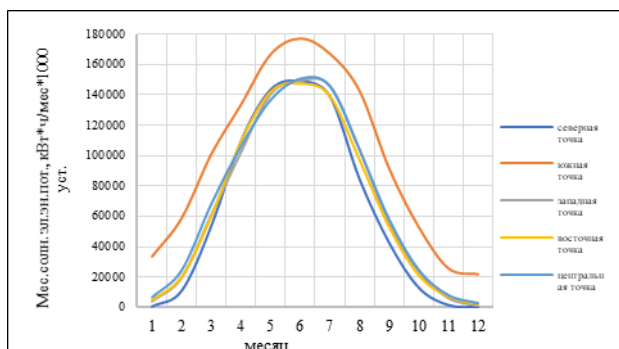


Рис. 4. Графики месячных электроэнергетических потенциалов солнца на территории УрФО.

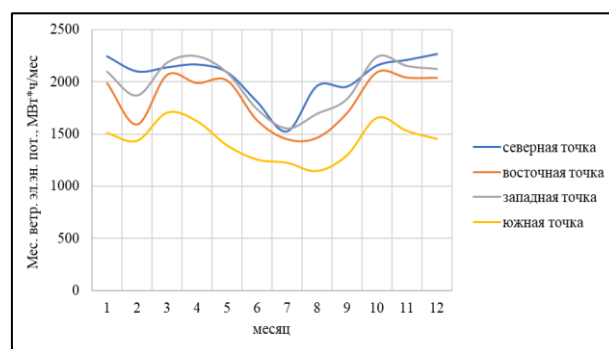


Рис. 7. Графики кривых месячных электроэнергетических потенциалов ветра на территории УрФО в разных точках.

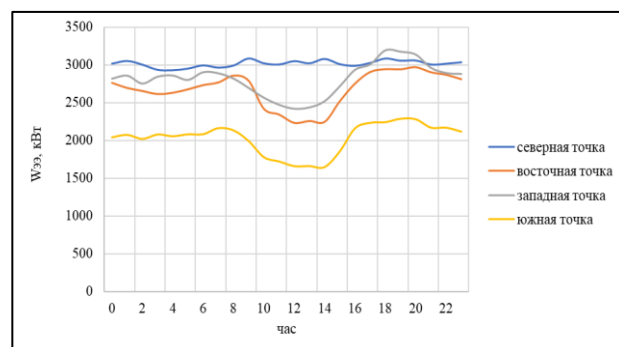


Рис. 5. Графики почасовых электроэнергетических потенциалов ветра в январе на территории УрФО.

Месячные электроэнергетические потенциалы суммируются с получением годового потенциала, которые легко пересчитывается в топливный (т у.т./год). На его основе оцениваются ресурсосберегающие потенциалы замещения ТЭС, использующих природный газ, мазут, угли экибастузского, борлинского, карагандинского, челябинского и свердловского месторождений, фотоэлектрическими панелями и ветровыми установками (табл.1 и 2).

Таблица 1. Годовые значения электроэнергетических, ресурсосберегающих и экологических потенциалов солнечной энергии в УрФО

Потенциал	точка	Газ, 10000 м ³	Мазут, т	Уголь экибастуз ский, т	Уголь борлинск ий, т	Уголь караганди нский, т	Уголь челябин- ский, т	Уголь свердлов ский, т
Электроэнергетический тыс.кВт*ч./ (год· 1000 уст.)	Ю	1169728						
	С	738701						
	В	800636						
	З	810103						
Ресурсосберегающий, ед./ (год· 1000 уст.)	Ю	349	294	642	733	642	729	1219
	С	221	186	405	463	405	460	770
	В	239	201	439	502	439	499	835
	З	242	204	444	507	444	505	844
Экологический, т СО ₂ -экв./ (год·1000уст.)	Ю	51	1004	8874	2322	5460	6561	13449
	С	32	634	5604	1466	3448	4143	8494
	В	35	687	6074	1589	3737	4491	9206
	З	35	695	6146	1608	3781	4544	9315
Экологический, т СО ₂ -экв./ (год·1000 уст.)	Ю	698	882	1668	1905	1668	2027	3365
	С	441	557	1054	1203	1054	1280	2125
	В	478	604	1142	1304	1142	1387	2304
	З	484	611	1155	1319	1155	1403	2331

Таблица 2. Годовые значения электроэнергетических, ресурсосберегающих и экологических потенциалов ветровой энергии в УрФО

Потенциал	точка	Газ, 10000 м ³	Мазут, т	Уголь экибасту зский, т	Уголь борлин ский, т	Уголь карагандин ский, т	Уголь челябин- ский, т	Уголь свердлов ский, т
Электроэнергетический тыс.кВт·ч./ (год· 1 уст.)	Ю	17223852						
	С	24638004						
	В	22109626						
	З	23813898						
Ресурсосберегающий, ед./ (год· 1 уст.)	Ю	5142	4331	9448	10788	9448	10734	17955
	С	7355	6195	13516	15432	13516	15354	25683
	В	6600	5560	12129	13849	12129	13778	23048
	З	7109	5988	13064	14916	13064	14841	24824
Экологический, т СО-экв./ (год·1 уст.)	Ю	747	14784	130662	34192	80394	96603	198039
	С	1068	21148	186907	48910	115000	138187	283286
	В	959	18978	167727	43891	103199	124006	254215
	З	1032	20441	180655	47274	111154	133565	273811
Экологический, т СО ₂ -экв./ (год·1 уст.)	Ю	10284	12993	24566	28050	24566	29840	49555
	С	14710	18586	35141	40124	35141	42684	70886
	В	13201	16679	31534	36007	31534	38304	63611
	З	14218	17965	33965	38782	33965	41257	68515

Представленная информация о потенциалах солнечной и ветровой энергии в рассмотренных точках территории Уральского федерального округа уже может выступать в качестве предмета предварительного энергетического, ресурсного и эколого-экономического анализа влияния выбора точки размещения объекта на эффективность инвестирования средств в создание систем энергоснабжения на основе этих видов ВИЭ. Оцененные энергетические, ресурсосберегающие, экологические и экономические потенциалы применения ФЭП и ВЭС во всех узловых точках территории федерального округа, являются хорошей информационной основой для эколого-экономического обоснования и оптимизации инвестиционных проектов строительства

альтернативных систем энергоснабжения и региональной программы развития возобновляемой энергетики.

Список литературы

1. Электроэнергетические системы России: АО «Системный оператор Единой энергетической системы» [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.so-ops.ru/functioning/ups/ups2025/> (дата обращения 27.05.2025)
2. Суржикова О. А. Обеспечение электроэнергией труднодоступных, малонаселенных и удаленных регионов // Региональная экономика: теория и практика. 2010. №11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obespechenie-elektroenergiey-trudnodostupnyh-malonaselennyh-i-udalennyh-regionov> (дата обращения: 28.05.2025).

УДК 579.66 : 57.083.13

Волков В.А., Посадская О.М., Сачавский А.А., Калёнов С.В.

Исследование метилотрофных бактерий, выделенных из образцов ила озера вертлино

Волков Вадим Александрович – студент 3 курса факультета биотехнологии и промышленной экологии; e-mail; 21vrc61@gmail.com;

Посадская Ольга Михайловна – студентка 3 курса факультета биотехнологии и промышленной экологии;

Сачавский Александр Александрович – аспирант группы АС-426; sachavski97@gmail.com;

Калёнов Сергей Владимирович – д.т.н., профессор кафедры биотехнологии; wsezart@yandex.ru;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В работе из отложений и взвеси карстового озера выделены метилотрофные бактерии, обладающие высокими скоростями роста, проведено их первичное микробиологическое описание. Среди выделенных микроорганизмов Ancylobacter rudongensis и Methylophilus methylotrophus перспективны для промышленной биотехнологии как продуценты биомассы с высоким содержанием белка.

Ключевые слова: метилотрофы, культивирование, Xanthobacter flavus, Ancylobacter rudongensis, Methylophilus methylotrophus.

Study of methylotrophic bacteria isolated from lake vertlino sludge samples

Volkov V.A., Posadskaya O.M., Sachavskii A.A., Kalenov S.V.

In this study, methylotrophic bacteria with high growth rates were isolated from sediments and suspension of a karst lake, and their primary microbiological description was carried out. Among the isolated microorganisms, Ancylobacter rudongensis and Methylophilus methylotrophus are promising for industrial biotechnology as producers of biomass with a high protein content.

Keywords: methylotrophs, cultivation, Xanthobacter flavus, Ancylobacter rudongensis, Methylophilus methylotrophus.

Введение

На сегодняшний день растущий спрос на биологические ресурсы с учётом ограничений традиционных методов их эксплуатации представляет собой проблему глобального уровня, наиболее выраженную в дефиците белков в пищевой и кормовой промышленности, а также синтезе экологичных и биосовместимых материалов для различных областей производства. Актуальным становится разработка биотехнологических подходов получения биологически активных веществ с добавленной стоимостью из альтернативных источников, которыми являются одноклеточные организмы, а именно метилотрофные бактерии [1]. Использование прокариотических метилотрофов, способных расти на метаноле, непищевом сырье, в качестве единственного органического источника углерода за счёт наличия в клетках фермента метанолдегидрогеназы, позволяет вести процесс культивирования на недорогом и доступном сырье при небольших энергетических и территориальных затратах и независимостью от климатических условий [2] [3]. Более того выращивание метанолюкисляющих бактерий на минеральных ростовых средах с метанолом создаёт селективные условия, что также увеличивает контролируемость и экономическую привлекательность данного подхода, а также снижает требования к поддержанию асептических условий [4].

Установлено, что метилотрофные бактерии способны накапливать значительные количества белка, содержание которого в оптимальных условиях у ряда высокопроизводительных штаммов может достигать до 80% от массы всех веществ клетки. Характеристики белка, получаемого из таких бактерий, сопоставимы с широко применяемой в

кормовом производстве мукой соевого и рыбного происхождения. Исследования продемонстрировали положительный эффект на рост различных организмов при добавлении в их рацион протеиновых добавок из метилотрофов [5] [6]. С другой стороны, данные бактерии зарекомендовали себя как перспективный продуцент экзополисахаридов (ЭПС), выделяемых в культуральную жидкость при создании специфических условий культивирования, таких как дефицит азота или высокое осмотическое давление в среде [7]. С учётом возможности регулирования свойств получаемых ЭПС, способных изменять реологические свойства растворов и связывать тяжёлые металлы, они могут применяться в пищевой текстильной, фармацевтической, косметической промышленности, а также как компонент буровых растворов [8].

Таким образом, применение метилотрофов имеет явные перспективы в области биотехнологии, а их внедрение в промышленных масштабах зависит от поиска новых быстрорастущих метилотрофных бактерий, обладающих высокой степенью конверсии субстрата, в том числе из природных сред [9].

В озере Вертлино (Бездонное) в Московской области в торфоподобных отложениях исследователи обнаруживали достаточно интенсивное выделение болотного газа, а сама поверхностная торфяная взвесь, из-за которой вода имеет коричневый оттенок богата микроорганизмами. Озеро относят к малоизученным древним карстовым озерам, имеет несколько уровней, между которыми не происходит интенсивного перемешивания [10]. Изучение физиологической активности микроорганизмов этого озера представляет особый интерес для изучения с точки зрения микробиологии. Частью такого исследования является как раз изучение метилотрофных бактерий –

компонентов микробного сообщества озера и потенциала этих микроорганизмов для биотехнологической промышленности.

В данной работе было проведено описание и идентификация метилотрофных изолятов, имеющих потенциал применения в биотехнологии. В ходе описания ростовых характеристик изолятов был осуществлён поиск быстрорастущих культур. Результаты работы могут стать основой для разработки инновационных биопроцессов, сочетающих использование экономичного сырья, устойчивое производство биомассы и снижение зависимости от традиционных агресурсов.

Экспериментальная часть

В качестве источника природных метилотрофных изолятов были выбраны образцы ила, отобранные из различных зон (берег и центральная часть) озера Вертилно, находящегося в городском округе

Солнечногорск Московской области. Получение накопительных метилотрофных культур, а также дальнейшее выделение чистых культур проводили на модифицированной среде “П” следующего состава (г/л): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 0,5; KNO_3 – 0,5; $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,2; CaCl_2 – 0,02; Na_2HPO_4 – 0,92; KH_2PO_4 – 0,7; дрожжевой экстракт – 0,2; пируват Na – 0,2; раствор микроэлементов – 2 мл/л; метанол – 6 мл/л. Раствор микроэлементов (г/л): $\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$ – 0,1; $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – 2; $\text{ZnSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,1; $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ – 0,03; $\text{CoCl}_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$ – 0,2; Na_2EDTA – 5; $\text{MnCl}_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$ – 0,03; $\text{NiCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ – 0,02.

По результатам многократных пересевов было получено три метилотрофные монокультуры, обладающие морфологией, характерной данному типу микроорганизмов (Табл.1.), а также отрицательным результатом окрашивания по Граму.

Таблица 1. Характеристика метилотрофных изолятов

Микробная культура	Колонии					Клетки	
	Форма	Цвет	Профиль	Край колонии	Структура	Форма	Окраска по Граму
1	круглая	желтый	выпуклый	гладкий	однородная	палочки	—
2	круглая	бесцветный	выпуклый	гладкий с фестончатым краем	мелкозернистая	палочки	—
3	круглая	белый	выпуклый	гладкий	мелкозернистая	палочки	—

На основе анализа 16S рРНК анализа было установлена видовая принадлежность выделенных микроорганизмов:

1. *Xanthobacter flavus* – относится к α -протеобактериям, способен к азотфиксации.

2. *Ancylobacter rudongensis* – также относится к α -протеобактериям, активно потребляет метанол и другие одноуглеродные соединения.

3. *Methylophilus methylotrophus* – принадлежит к β -протеобактериям, строгий метилотроф, использующий метанол в качестве единственного источника углерода и энергии

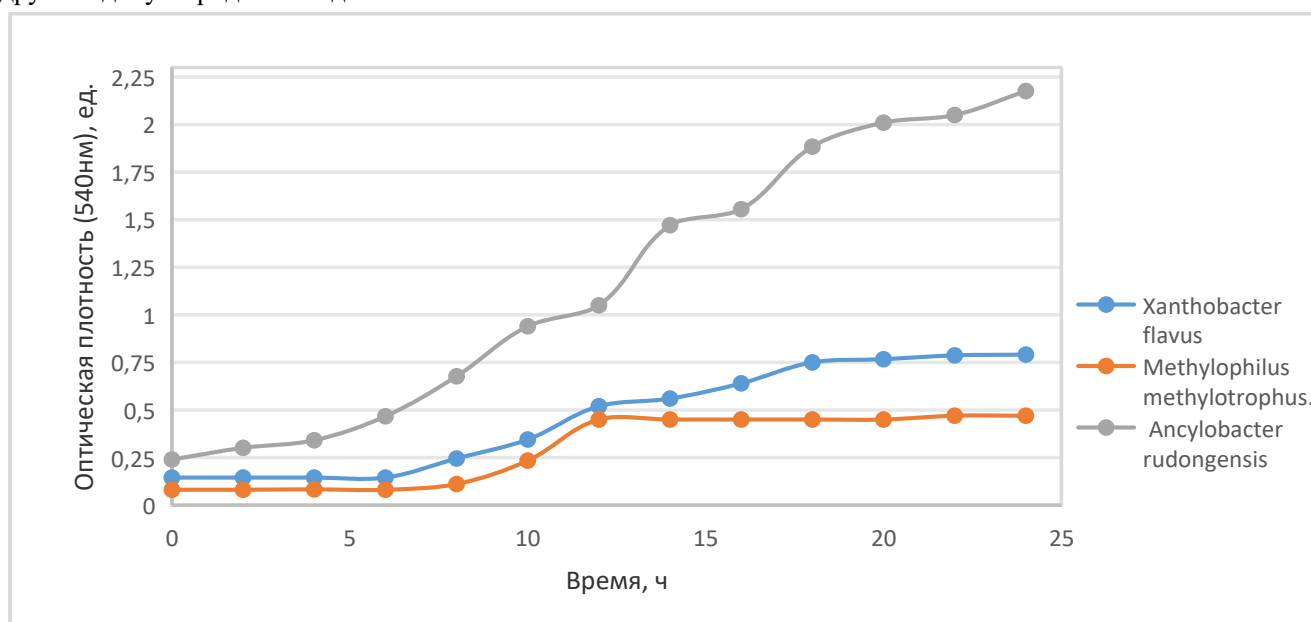


Рис. 1. Кривые роста *Xanthobacter flavus*, *Ancylobacter rudongensis*, *Methylophilus methylotrophus*

Следующим этапом исследования являлся отбор изолятов, обладающих высокой скоростью роста. С данной целью осуществляли высев единичных колоний каждой монокультуры в колбы объёмом 250 мл с жидкой модифицированной средой П с дальнейшим инкубированием в термостатируемом шейкере при перемешивании 150 об/мин и температуре 28°C, начальной pH среды - 6,7 в течение 24 часов. Каждые два часа, из колб отбирали аликвоту суспензии, в которой при помощи спектрофотометра определяли оптическую плотность при длине волны 540 нм. На основании полученных результатов были построены кривые роста всех исследуемых изолятов (Рис. 1).

Анализ построенных кривых позволил определить удельные скорости роста ($\mu_{\max}$), составившие 0,45 ч⁻¹, 0,33 ч⁻¹ и 0,33 ч⁻¹ для изолятов *A. rudongensis*, *X. flafus* и *M. methylotrophus*

соответственно. Полученные результаты характеризуют выделенные метанотрофы (в первую очередь *A. rudongensis*), как быстрорастущие микроорганизмы, что позволяет рассматривать их в качестве потенциальных продуцентов ценных биологически активных веществ в крупнотоннажных биотехнологических процессах.

Биомасса, полученная в ходе культивирования, была осаждена центрифугированием и исследована на содержание белка методом Кьельдаля и Лоури в соответствии со стандартной методикой (Табл. 2.). По результатам аналитических исследований было обнаружено, что биомасса метанотрофных культур *A. rudongensis* и *M. methylotrophus* содержит более 70% сырого белка от абсолютно сухого веса (АСВ), что является крайне высоким показателем для микроорганизмов с неоптимизированными условиями культивирования [11].

Таблица 2. Определение содержания белка в биомассе метилотрофных бактерий

Анализируемый метилотроф	Содержание белка по Лоури, % от АСВ	Содержание белка по Кьельдалю, % от АСВ
<i>A. rudongensis</i>	61	>70
<i>M. methylotrophus</i>	63	>71

Оптимизация состава ростовой среды, подбор подходящих pH и температуры для каждой изолированной культуры, а также культивирование метилотрофных сообществ способно увеличить удельный выход биомассы и содержание в ней белка и является темой дальнейших исследований в данной области.

Заключение

В ходе выделения метилотрофных микроорганизмов из природных накопительных культур было выделено три чистых метилотрофных изолята, для которых было проведено сравнительное микробиологическое описание. По итогам определения максимальной удельной скорости роста было установлено, что *A. rudongensis* ($\mu_{\max} = 0,45$ ч⁻¹), а также *X. flafus* и *M. methylotrophus* (оба $\mu_{\max} = 0,33$ ч⁻¹) являются перспективными бактериями-продуцентами белков, содержание которых в биомассе достигает 70% и выше от АСВ. Оптимизация факторов, влияющих на ростовые характеристики выделенных монокультур, является предметом дальнейших исследований в данном направлении.

Список литературы

1. Sarwar A., Lee E. Y. Methanol-based biomanufacturing of fuels and chemicals using native and synthetic methylotrophs //Synthetic and Systems Biotechnology. – 2023. – Т. 8. – №. 3. – С. 396-415.
2. Ochsner A. M. et al. Methylobacterium extorquens: methylotrophy and biotechnological applications //Applied microbiology and biotechnology. – 2015. – Т. 99. – С. 517-534.
3. Sakarika M., Ganigué R., Rabaey K. Methylotrophs: from C1 compounds to food //Current Opinion in Biotechnology. – 2022. – Т. 75. – С. 102685.

4. Pfeifenschneider J., Brautaset T., Wendisch V. F. Methanol as carbon substrate in the bio-economy: Metabolic engineering of aerobic methylotrophic bacteria for production of value-added chemicals //Biofuels, Bioproducts and Biorefining. – 2017. – Т. 11. – №. 4. – С. 719-731.

5. Hardy R. W. et al. Partial replacement of soybean meal with Methylobacterium extorquens single-cell protein in feeds for rainbow trout (Oncorhynchus mykiss Walbaum) //Aquaculture Research. – 2018. – Т. 49. – №. 6. – С. 2218-2224.

6. Ye L. et al. Single-cell protein: Overcoming technological and biological challenges towards improved industrialization //Current Opinion in Biotechnology. – 2024. – Т. 88. – С. 103171.

7. Woo S. M. et al. EPS production, PHB accumulation and abiotic stress endurance of plant growth promoting Methylobacterium strains grown in a high carbon concentration //Korean Journal of Soil Science and Fertilizer. – 2012. – Т. 45. – №. 4. – С. 572-581.

8. Bagnol R. et al. The production and application of bacterial exopolysaccharides as biomaterials for bone regeneration //Carbohydrate polymers. – 2022. – Т. 291. – С. 119550.

9. Antoniewicz M. R. Synthetic methylotrophy: Strategies to assimilate methanol for growth and chemicals production //Current opinion in biotechnology. – 2019. – Т. 59. – С. 165-174.

10. Краснова, Е. Д. Экология меромиктических озер России. 2. Континентальные водоемы //Водные ресурсы. – 2021. – Т. 48. – №. 4. – С. 451-460.

11. Koukoumaki D. I. et al. Recent advances in the production of single cell protein from renewable resources and applications //Carbon Resources Conversion. – 2024. – Т. 7. – №. 2. – С. 100195.

УДК 542.06+577.11

Гарбуз М.И., Красноштанова А.А.

Получение липосом, инкапсулированных полиненасыщенными жирными кислотами

Гарбуз Майя Ивановна – студентка 3 курса бакалавриата кафедры биотехнологии; email: mayamaya04@bk.ru.

Красноштанова Алла Альбертовна – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры биотехнологии; email: aak28@yandex.ru.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», Москва, Россия; 125480, ул. Героев Панфиловцев, дом 20.

Исследование посвящено разработке липосом на основе яичного и подсолнечного лецитина, инкапсулирующих полиненасыщенные жирные кислоты n-3 из очищенного рыбьего жира. Оптимальная концентрация лецитина для стабильных липосом составила 10 мг/мл, а полное включение ПНЖК достигнуто при 23,3 мг/мл. Изучение высвобождения ПНЖК в модельных условиях ЖКТ показало, что 50% кислот высвобождается уже в ротовой полости, а полное высвобождение происходит за 250 минут, преимущественно в кишечнике. Результаты работы демонстрируют перспективность использования липосом на основе лецитина для доставки ПНЖК, обеспечивая их защиту от окисления и контролируемое высвобождение в ЖКТ.

Production of liposomes encapsulated with polyunsaturated fatty acidsGarbuz M.I.¹, Krasnoshtanova A.A.¹,¹ D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Moscow, Russian Federation

The study focuses on the development of liposomes based on egg and sunflower lecithin encapsulating n-3 polyunsaturated fatty acids from purified fish oil. The optimal lecithin concentration for stable liposomes was found to be 10 mg/ml, with complete PUFA incorporation achieved at 23 mg/ml. Investigation of PUFA release under simulated gastrointestinal (GI) tract conditions revealed that 50% of the acids were released in the oral cavity, while complete release occurred within 250 minutes, predominantly in the intestinal phase. The results demonstrate the potential of lecithin-based liposomes for PUFA delivery, providing oxidation protection and controlled release in the GI tract.

Введение

Липосомы – это везикулы, полые микроскопические молекулы чьё внутреннее пространство ограничено одной или несколькими бислойными липидными мембранами (БЛМ). БЛМ во многом схожи с клеточными мембранами, благодаря чему липосомы используются как модельная система для научных исследований свойств последних. Из-за своих коллоидных свойств, контролируемых размеров, поверхностных характеристик, мембранотропности и биосовместимости липосомы являются перспективными системами доставки лекарственных веществ в органы и ткани [1].

Жирные кислоты, имеющие две и более двойных связей, называют полиненасыщенными жирными кислотами (ПНЖК). Подавляющее большинство животных (в том числе человек) не имеют способности к их синтезу, поэтому такие ПНЖК являются незаменимыми: линолевая кислота (18:2n-6) и альфа-линоленовая кислота (18:3n-3). К частично незаменимым длинноцепочечным ПНЖК относятся: арахидоновая (эйкозатетраеновая) кислота (20:4n-6, АРК), эйкозапентаеновая кислота (20:5n-3, ЭПК) и докозагексаеновая кислота (22:6n-3, ДГК). Последние как раз играют ключевую роль в поддержании здоровья человека несмотря на то, что организм не способен воспроизводить их в достаточном количестве. Главный источник ЭПК и ДГК для человека – рыбий жир [3]. Минимальная суточная потребность в n-6 ПНЖК составляет 1%, а в n-3 ПНЖК - 0.2% от суточной калорийности рациона. Рекомендуемое содержание ЭПК и ДГК кислот в суточном рационе составляет от 0.25 до 2.0 г.

Содержание n-3 ПНЖК в рыбьем жире и его препаратах варьируется в зависимости от химической формы (триглицериды, этиловые эфиры, свободные жирные кислоты) [2].

В медицинской статье Е.Ю. Плотниковой [4] приведены результаты исследований, которые позволяют полагать, что приём n-3 ПНЖК оказывают положительное влияние на профилактику и лечение сердечно-сосудистых заболеваний, артериальной гипертензии, сахарного диабета, ЦНС и некоторых заболеваний кожи.

Одной из основных трудностей, ограничивающих активное применение n-3 ПНЖК в фармацевтике и пищевой индустрии, является их высокая окисляемость. К тому же, эти жирные кислоты, будучи липофильными соединениями, требуют специального транспортного механизма для эффективной доставки. На сегодняшний день, перспективным решением этих проблем является заключение n-3 ПНЖК в липосомы. Получение липосомальных форм полиненасыщенных жирных кислот увеличивает биологическую активность препаратов. Повышение эффективности лекарственных средств достигается за счёт снижения токсичности и улучшения селективности действия препаратов [5,6].

Целью настоящего исследования являлась разработка способа получения липосом из липидов яичного и подсолнечного лецитина, нагруженных полиненасыщенными жирными кислотами.

В качестве объекта исследования был использован препарат «Рыбий жир очищенный», производитель «RealCaps». Содержание полиненасыщенных жирных

кислот n-3 не менее 35%, в том числе эйкозапентаеновой кислоты (20:5n-3) – не менее 18%, докозагексаеновой кислоты (22:6n-3) – не менее 12%.

Инкапсулирование липосом и определение степени включения ПНЖК

В данной работе липосомы получали на основе яичного и подсолнечного лецитина инъекционным методом [7]. Количество включённых жирных кислот контролировали по йодному числу, измеряемому по соответствующей методике [10].

На первом этапе подбирали наилучшую концентрацию лецитина, обеспечивающую получение липосом заданного размера. В ходе исследования было проведено сравнение плёнок липосом, полученных с использованием 50, 75, 100 и 150 мг яичного лецитина на 15 мл реакционной смеси. Экспериментальным путём определено, что использование концентрации лецитина 10 мг/мл среды обеспечивает наилучшее формирование липидной плёнки.

На следующем этапе работы определяли наилучшее количество n-3 ПНЖК, способное инкапсулироваться в липосомы. Для определения степени включения ПНЖК в липосомы определяли йодное число в надосадочной жидкости, полученной после отделения липосом.

В результате проведённых опытов были получены данные о степени включения ПНЖК в липосомы, синтезированные из яичного и подсолнечного лецитина (рис.1). На основе полученных данных был сделан вывод, что практически полное включение ПНЖК наблюдается при их исходной концентрации в эмульсии 23 мг/мл как для яичного лецитина, так и для подсолнечного лецитина. Использование менее оптимальной концентрации приводит к недостаточному объёму данных о степени включения. Неопределённость относительно остаточной ёмкости липосомальной мембраны не позволяет установить предел её насыщения. Введение дозы, превышающей эквивалент 23,3 мг/мл, приводит к снижению степени включения до 83-90%, что невыгодно. То есть липосомальная система достигает предельного насыщения при данной концентрации ПНЖК и реализуется не всё исходное количество активного компонента.

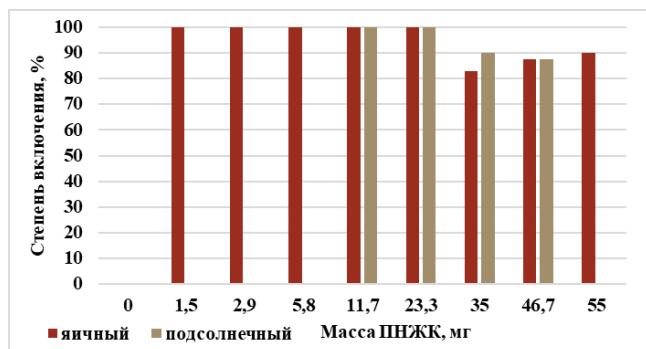


Рис. 1. Зависимость степени включения от исходной концентрации ПНЖК, включаемых в липосомы

Переваривание в ЖКТ

На данном этапе исследования была проведена детальная оценка ферментативного расщепления липосом в различных отделах желудочно-кишечного тракта. Исследовали ротовую полость, желудок и кишечник как ключевые звенья пищеварительной системы. В эксперименте воспроизводились физиологические параметры, характерные для каждого этапа переваривания. Для моделирования процессов использовались данные условия на 300 мг инкапсулированных липосом: ротовая полость – SSF, pH 7, 10 минут, фермент амилаза (0,00125 мг/мл буфера); желудок – SGF, pH = 3, 2 часа, фермент пепсин (0,005 мг/мл буфера); кишечник – SIF, pH = 7, 2 часа, фермент панкреатин (0,0005 мг/мл буфера). Температура опыта на всех этапах моделирования – 37°C [11].

Одна и та же порция липосом яичного и подсолнечного лецитина последовательно инкубировалась в среде, соответствующей определенному отделу ЖКТ. На каждом этапе последовательно отбирали пробы для измерения йодного числа. На основании этих данных вычисляли степень высвобождения ПНЖК в ротовой полости, желудке и кишечнике (рис.2). Согласно результатам эксперимента, степень высвобождения полиненасыщенных жирных кислот из липосом яичного и подсолнечного лецитина увеличивается с продолжительностью инкубации в средах. К 250 минутам наблюдается практически полное высвобождение ПНЖК из обеих липосом, что говорит о том, что ферментативный гидролиз в кишечнике является наиболее эффективным этапом разрушения липосом.

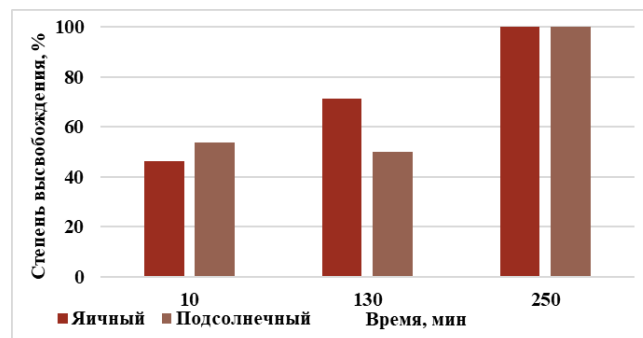


Рис. 2. Зависимость степени высвобождения ПНЖК в ЖКТ

Заключение

1. В ходе работы была подобрана наиболее эффективная концентрация лецитина для получения липосомной плёнки. Использование 10 мг вещества/мл среды позволяет стабильно получать плёнки с достаточной степенью включения.

2. Установлено, что при исходной концентрации полиненасыщенных жирных кислот в эмульсии, равной 23,3 мг/мл, достигается их полное включение в липосомы на основе как яичного, так и подсолнечного лецитина.

3. Было определено, что к 250 минутам произошло полное высвобождение ПНЖК из обеих

типов липосом. При этом на этапе ротовой полости липосомы уже претерпели значительное разрушение, высвободив примерно 50% содержимого, что указывает на интенсивное ферментативное воздействие даже на ранних этапах пищеварения.

Список литературы

1. Толчева, Е. В. Липосомы как транспортное средство для доставки биологически активных молекул / Е. В. Толчева, Н. А. Оборотова // Российский биотерапевтический журнал. – 2006. – Т. 5, № 1. – С. 54-61.
2. Мазур, Н. А. Омега-3 полиненасыщенные жирные кислоты: доказательства пользы и перспективы их применения / Н. А. Мазур // Кардиология. – 2012. – Т. 52, № 4. – С. 80-84.
3. Гладышев, М. И. Незаменимые полиненасыщенные жирные кислоты и их пищевые источники для человека / М. И. Гладышев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. – 2012. – Т. 5, № 4. – С. 352-386.
4. Плотникова, Е. Ю. Роль омега-3 ненасыщенных кислот в профилактике и лечении различных заболеваний / Е. Ю. Плотникова, М. Н. Синькова, Л. К. Исаков // Лечащий врач. – 2018. – № 7. – С. 63.
5. Ламажапова, Г. П. Нанокапсулированные природные липиды / Г. П. Ламажапова, С. Д. Жамсаранова // Вестник ВСГУТУ. – 2014. – № 5(50). – С. 99-105.
6. Аверина, Е. С. Исследование жирнокислотного состава жира байкальской нерпы *Phoca (PUSA) Sibirica Gmel* и разработка новых путей его применения : специальность 02.00.06 "Высокомолекулярные соединения", 02.00.10 "Биоорганическая химия" : автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата химических наук / Аверина Елена Сергеевна. – Москва, 2003. – 23 с.

7. Полякова, Е. Д. Изучение липосом на основе соевого лецитина как средств адресной доставки нуклеотидов / Е. Д. Полякова // Проблемы и перспективы разработки и внедрения передовых технологий : Сборник статей Международной научно-практической конференции, Оренбург, 25 июня 2023 года. – УФА: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2023. – С. 27-32.

8. Сынгеева, Э. В. Оптимизация условий получения липосомальной формы концентрата полиненасыщенных жирных кислот / Э. В. Сынгеева, Г. П. Ламажапова, С. Д. Жамсаранова // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2017. – Т. 7, № 1(20). – С. 80-88. – DOI 10.21285/2227-2925-2017-7-1-80-88.

9. Тазина, Е. В. Особенности инкапсулирования лекарственных препаратов в липосомы (обзор) / Е. В. Тазина, К. В. Костин, Н. А. Оборотова // Химико-фармацевтический журнал. – 2011. – Т. 45, № 8. – С. 30-40. – EDN TMQZZH.

10. Экспресс-метод определения йодного числа в жирах и маслах / В. И. Мартовщук, Е. В. Мартовщук, А. А. Лобанов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2019. – № 1(367). – С. 101-104. – DOI 10.26297/0579-3009.2019.1.25.

11. Изучение стабильности липосом на основе соевого и яичного лецитина в среде желудочно-кишечного тракта / Е. Д. Полякова, Д. А. Матишова, И. А. Цепелева, А. А. Красноштанова // Успехи в химии и химической технологии. – 2022. – Т. 36, № 12(261). – С. 8-11.

УДК 628.31

Голикова Е.В., Иванцова Н.А.

Очистка модельной сточной воды от ПАВ

Голикова Елизавета Владиславовна – студентка группы Э-41; Liza.golikova.90@mail.ru

Иванцова Наталья Андреевна – к.х.н., доцент кафедры промышленной экологии; ivantsova.n.a@muctr.ru

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В статье рассмотрены основные проблемы загрязнения сточных вод прачечных организаций поверхностно-активными веществами, а также предложена технологическая схема очистки вод прачечных от СПАВ. Результаты показали высокую эффективность очистки, достигающую 90% по ряду ключевых показателей.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества, сточные воды, озонирование, коагуляция

Purification of model wastewater from surfactants

Golikova E.V.¹; Ivantsova N.A.¹.

¹ D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article discusses the main problems of wastewater pollution of laundries by surface-active substances, as well as a technological scheme for cleaning laundries from waste water. The results showed high cleaning efficiency, reaching 90% in a number of key indicators.

Key words: surfactants, waste water, ozonation, koagulation

Введение

Загрязнение окружающей среды остается главной проблемой 21 века. Ухудшение состояния экосистемы происходит в результате антропогенной деятельности человека. Основное воздействие приходит на городские сточные воды, которые образуются в следствии различных технологических процессов. По статистике всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) заболевания, возникающие при использовании загрязненной воды в качестве бытовых нужд, являются самыми распространенными. Главная задача современных экологов — это разработка инновационных методов очистки от поллютантов различного вида [1].

Загрязнение сточных вод поверхностно-активными веществами (ПАВ) представляет огромную опасность экосистеме. ПАВы – это вещества органического происхождения, которые способны адсорбироваться на границе раздела фаз, снижая при этом поверхностное натяжение. Классифицировать их можно по способности диссоциировать в жидкости: неионогенные ПАВ (нПАВ); анионные ПАВ (аПАВ); катионные ПАВ (кПАВ); амфолитные ПАВ. Особенность их дифинильного строения состоит в том, что один конец цепи является гидрофобным, а другой гидрофильным. Именно по этой причине поверхностным веществам нашли активное применение в быту [2].

Наибольший вред окружающей среде наносят неионогенные СПАВ (нСПАВ). Попадая в водоем, они ухудшают органолептические свойства воды, что приводит к нарушению самоочищающей способности природных вод и возможности их повторного загрязнения. Дeterгенты (ПАВы) обладают высоким токсическим действием. Превышение допустимых значений веществ может привести к гибели природной фауны данного водоема. Накопление ПАВ в живом организме вызывает ряд болезней, от аллергических реакций до заболеваний печени, почек и легких [3].

Поверхностно-активные вещества оказываются в водоеме в результате антропогенных действий человека. Этому могут послужить аварии на производстве, неправильно подобранные схемы очистки и многие другие. В научной сфере можно найти большое количество информации о разнообразных способах очистки поверхностных вод от детергентов. В качестве примера можно привести отработанную воду крупномасштабных прачечных. В составе вод присутствуют синтетические моющие средства (СМС) – это порошки для стирки, которые в свою очередь являются ПАВами. Вдовенко О.А. в своем исследовании утверждает, что «добиться полноценного удаления загрязнителя довольно трудно, и единственный способ борьбы с детергентами – постоянный контроль и нормирование» [4]. К сожалению, на практике, не всегда удается контролировать концентрацию ПАВ. Для эффективной очистки от СМС были разработаны различные методы, среди которых большую популярность получили Advanced Oxidation Processes (окислительно-восстановительные методы). В основе этих процессов лежит использование различных окислителей, способных полностью обезвредить воду от загрязняющего вещества [5].

Целью данной научной работы является разработка технологической блок-схемы очистки модельных сточных вод промышленных прачечных от синтетических поверхностно-активных веществ.

Экспериментальная часть

В результате проведения эксперимента представлены результаты по очистке модельной сточной воды. В данном разделе показаны результаты по очистке модельной сточной воды, содержащей высокие концентрации ПАВ (300-350 мг/л). Модельный сток был разработан на основе информации о составе сточных вод прачечных. Помимо нПАВ в раствор были добавлены: хлорид натрия для образования хлорид ионов и каолин в качестве взвешенных веществ.

Очистку модельных сточных вод проводили постадийно (рис. 1) с применением коагуляции,

окисления и сорбции. После каждой стадии процесса очистки контролировали содержание взвешенных веществ (ВВ), нПАВ, рН и ХПК. Содержание ПАВ в растворе было определено по методике согласно ГОСТ.



Рисунок 1. Блок-схема очистки сточных вод

На первой стадии была проведена обработка коагулянтном полиоксихлорид алюминия (ПОХА) с концентрацией 1,25 мг/л. Коагуляцию проводили в коагуляторе, которая включает четыре лопастные мешалки с регулируемой частотой вращения и подсветку для наблюдения изучаемых процессов в прозрачных стаканах. На данной стадии были удалены взвешенные соединения.

На второй стадии был проведен процесс озонирования во времени как в присутствии пероксида водорода, так и без. Исследование проводилось на установке XR-ZJ-1GT мощностью 10 Вт (рис. 2). Производительность установки – 1000 мг/ч. Измеренная производительность по воздуху 7 л/мин и 2.5 мг O_3 на 1 л воздуха в минуту.

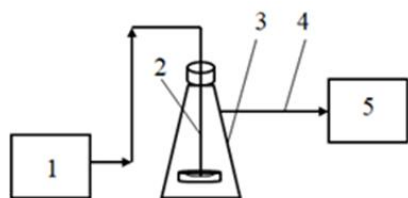


Рисунок 2. Схема лабораторной установки: 1 – генератор озона, 2 – распределитель озона, 3 – реактор, 4 – отвод остаточного озона, 5 – сосуд с гокалитом для разложения озона

Результаты реакции представлены на рисунке 3. На графике отчетливо видно, что процесс озонирования с пероксидом водорода и без протекает успешно. По истечении 10 минут эффективность окисления начинает возрастать и достигает своего максимального значения через 40 минут. Исходя из описанного, можно сделать вывод, что разницы между реакцией озонирования с H_2O_2 и без нет, так как при одном и том же времени протекания реакции достигается одинаковая степень очистки.

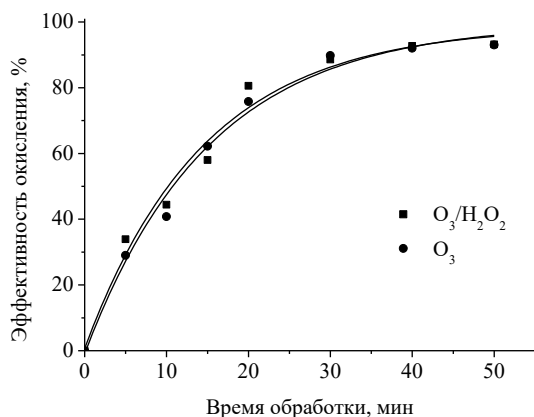


Рисунок 3. Эффективность озонирования ПАВ ($C_n(ПАВ)=300$ мг/л) от времени обработки

На третьей стадии была проведена сорбция, где был использован порошкообразный уголь марки УПК (угольно-пековая композиция) [6]. Доза УПК была 0,5 гр на 100 мл пробы. Сорбцию проводили с помощью шейкера в течение 20 мин, далее исследуемый раствор был отфильтрован с помощью фильтра «синяя лента»

Исходя из результатов вышеописанных, была проведена постадийная очистка модельных сточных вод прачечных, с оценкой основных показателей качества очищенной воды. В таблице 1 представлены лабораторные результаты по очистке модельной воды. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты аналитического контроля проб модельной сточной воды до и после рассматриваемых стадий очистки

С, мг/л	исх. данные	коагуляция	озонирование	сорбция
$C_{ПАВ}$, мг/л	322	287	10	5
ХПК мгО/л	620	600	60	32
рН	8,4	8,4	8	8
ВВ, г/л	0,1	$\leq 0,01$	$\leq 0,01$	$\leq 0,01$

Общая степень очистки по показателю ПАВ, ХПК и ВВ ($\alpha_{общ.ПАВ}$, $\alpha_{общ.ХПК}$, $\alpha_{общ.ВВ}$), рассчитанная по формуле 1, составила 94,8; 98,2; 99,5% соответственно.

$$\alpha_{общ} = (1 - (1 - \alpha_1) \cdot (1 - \alpha_2) \cdot (1 - \alpha_3)) \cdot 100\% \quad (1)$$

где, α_1 – эффективность очистки стадии № 1, $\alpha_1 = (ХПК_{исх} - ХПК_1)/ХПК_{исх}$; α_2 – эффективность очистки стадии № 2, $\alpha_2 = (ХПК_1 - ХПК_2)/ХПК_1$; α_3 – эффективность очистки стадии № 3, $\alpha_3 = (ХПК_2 - ХПК_3)/ХПК_2$.

Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Эффективность степени очистки от различных показателей.

Показатель	ХПК	$C_{ПАВ}$	ВВ
$\alpha_{общ}$, %	94,8	98,2	99,9

Заключение

Таким образом, можно предложить технологию очистки сточных вод прачечных, которая включает в себя несколько основных этапов, позволяющая эффективно удалять загрязняющие вещества и обеспечивать защиту окружающей среды. Основные этапы технологии: 1. Предварительная очистка. Удаление крупных частиц и волокнистых остатков с помощью решеток и механических фильтров, что помогает снизить нагрузку на последующие этапы обработки. 2. Сбор и насосное оборудование. Сточные воды аккумулируются в специальных резервуарах и перекачиваются на следующий этап обработки с использованием насосов. 3. Химическая коагуляция. Введение коагулянтов (например, ПОХА) для связывания мелких частиц и образования более крупных агрегатов, которые легче удаляются. 4. Окисление. Использование химических реагентов, таких как озон, для уничтожения патогенных микроорганизмов и обеспечения безопасности очищенной воды. 5. Сброс или повторное

использование. Очищенные сточные воды могут быть сброшены в водоемы или повторно использованы, например, для технических нужд. Эта технология способствует снижению негативного воздействия сточных вод на экосистему и поддерживает устойчивое использование водных ресурсов [6].

Список литературы

1. Гусева, К. С. Влияние ПАВ на экологию / К. С. Гусева // Эколого-инновационное развитие российского общества: Всероссийской научно-практической конференции (12 ноября 2015 г.) / под научной редакцией О. Д. Агапова, И.Х. Мезиковой. — Казань: изд-во «Познание» Института экономики, управления и права, 2015. — С. 56-57.
2. Мансураева Л. М., Юсупова И. И., Булаев С. А. Поверхностно-активные вещества: свойства и применение // Вестник магистратуры. — 2022. — №. 2-1 (125). — С. 30-35.
3. Шачнева, Е. Ю. Методы очистки сточных вод от неионогенных поверхностно-активных веществ / Е. Ю. Шачнева // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. — 2015. — № 8(92). — С. 38-44. — EDN UIKNFD.
4. Вдовенко, О. А. Методы очистки сточных вод от поверхностно-активных веществ / О. А. Вдовенко // Образование. Наука. Производство : XIII Международный молодежный форум, Белгород, 08–09 октября 2021 года. — Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. — С. 1335-1339. — EDN ARSSWK.
5. Karci A., Arslan-Alaton I., Bekbolet M. Advanced oxidation of a commercially important nonionic surfactant: Investigation of degradation products and toxicity // Journal of hazardous materials. — 2013. — Т. 263. — С. 275-282.
6. Мухин В.М., Курилкин А.А., Воропаева Н.Л., Лексюкова К.В., Учанов П.В. Место активных углей в экологии и экономике, новые технологии их производства // Сорбционные и хроматографические процессы. — 2016. — Т. 16. — № 3. — С. 346–353
7. Crini G. et al. Characterization and treatment of industrial laundry wastewaters: a review // Environmental Chemistry Letters. — 2024. — Т. 22. — №. 5. — С. 2257-2292.

УДК 542.943-92

Гуина Е.М., Иванцова Н.А.

Исследование кинетики и эффективности фото-Фентон окисления нитрофуранов и нитроимидазола в водных растворах

Гуина Елизавета Максимовна – студентка 4 курса бакалавриата группы Э-41 факультета биотехнологии и промышленной экологии.

Иванцова Наталья Андреевна – кандидат химических наук, доцент кафедры промышленной экологии; ivantsova.n.a.@muctr.ru

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В этой работе были изучены кинетика и эффективность процесса фото-Фентон окисления для разложения нитрофура, фуразолидона и метронидазола — трёх широко используемых антибактериальных препаратов — в водных растворах. Результаты показали, что данный метод окисления эффективно разлагает эти соединения: нитрофура – 99%, фуразолидон – 94 и метронидазол – 79%. Кинетическое моделирование показало, что процесс разложения подчиняется первому порядку. Полученные результаты указывают на потенциал применения фото-Фентон окисления как перспективного процесса глубокого окисления для удаления фармацевтических загрязнителей из водных ресурсов.

Ключевые слова: нитрофура, фуразолидон, метронидазол, фото-Фентон, фармацевтические загрязнители.

Investigation of kinetics and efficiency of Photo-Fenton oxidation of nitrofurans and nitroimidazole in aqueous solutions

Guina E. M., Ivantsova N.A.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
Russian Federation

In this study, the kinetics and efficiency of the Photo-Fenton oxidation process were investigated for the degradation of nitrofur, furazolidone, and metronidazole – three widely used antibacterial drugs – in aqueous solutions. The results showed that this oxidation method effectively decomposes these compounds: nitrofur – 99%, furazolidone – 94% and metronidazole – 79%. Kinetic modeling has shown that the decomposition process obeys the first order. The results obtained indicate the potential of using Photo-Fenton oxidation as a promising deep oxidation process for the removal of pharmaceutical pollutants from water resources.

Keywords: nitrofur, furazolidone, metronidazole, Photo-Fenton, pharmaceutical pollutants.

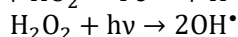
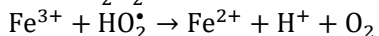
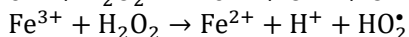
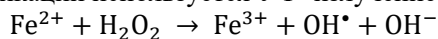
Введение

Фармацевтическое загрязнение окружающей среды становится все более острой глобальной проблемой, вызывая серьезную обеспокоенность ученых, политиков и общественности. Фармацевтические препараты, попадая в окружающую среду через различные источники, такие как сточные воды фармацевтического производства и хозяйственно-бытовые; научно-исследовательские и учебные организации, связанные с разработкой лекарственных препаратов; лечебно-профилактические учреждения; социальные учреждения; аптеки; сельское хозяйство и неправильная утилизация лекарств, загрязняют водные и наземные экосистемы. Даже низкие концентрации этих соединений могут оказывать негативное воздействие на живые организмы, здоровье человека и устойчивость экосистем. Примерами таких соединений могут являться производные 5-нитрофурана и нитроимидазола, такие как нитрофура, фуразолидон и метронидазол. Препараты с активными веществами данных соединений относятся к синтетическим лекарственным средствам, которые обладают антибактериальным и противопротозойным фармакологическим действием. Спектр действия: анаэробные грамположительные и грамотрицательные бактерии и простейшие. Нитрофура, фуразолидон и метронидазол содержат

нитрогруппу, которая в организме микроорганизмов восстанавливается до аминогруппы. Благодаря такому восстановлению они действуют как акцепторы ионов водорода, нарушая метаболические процессы в микробной клетке, снижая выработку токсинов и снижая риск интоксикации. Кроме того, они ингибируют определенные ферменты, снижают устойчивость к фагоцитозу и препятствуют синтезу нуклеиновых кислот в микроорганизмах. Опасность этих соединений заключается в их способности легко метаболизироваться в организме, накапливаясь в нем, что может вызывать мутагенное и канцерогенное действие [1-4].

Учитывая возрастающее потребление лекарственных средств и ограниченную эффективность существующих методов очистки сточных вод, необходимо разрабатывать и внедрять новые, более эффективные технологии для удаления фармацевтических загрязнителей и минимизации их воздействия на окружающую среду и здоровье населения. На данный момент, самыми эффективными методами для очистки воды от органических загрязнителей в виде активных лекарственных субстанций являются усовершенствованные окислительные процессы (Advanced oxidation process, AOPs). В данной работе рассматривается один из таких процессов – фото-Фентон, при котором образование $\text{OH}^\bullet$ - радикалов, которые вступают в реакции с органическими

загрязнителями, разрушая их, происходит при взаимодействии H_2O_2 с солями железа в строго кислой среде (рН 2–3). Такая высокая чувствительность к рН является одним из основных недостатков данного процесса. При отклонении от оптимального значения рН трехвалентное железо может выпадать в осадок в виде гидроксида, что замедляет реакцию и требует дополнительной очистки. Кроме того, Fe(III) может образовывать устойчивые комплексы с органическими веществами сточной воды, блокируя свою регенерацию. Также в процессе окисления скорость реакции восстановления двухвалентного железа значительно меньше скорости его использования, поэтому для интенсификации используется УФ-излучение [5].



Экспериментальная часть

В работе использовали водные растворы трех соединений – нитрофурала, фуразолидона и метронидазола – объемом 100 мл с концентрацией 10 мг/л и реактив Фентона на основе соли $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Для приготовления раствора таблетку соответствующего фармацевтического препарата – фурацилина, фуразолидона и метронидазола тщательно растирали в агатовой ступке и растворяли для получения раствора с концентрацией 10 мг/л. Для этого исходные растворы помещали в ультразвуковую ванну до полного растворения определяемого компонента. После этого добавляли реактив Фентона с концентрацией Fe^{2+} в получившемся растворе 0,32 г/л и доводили рН раствора до значений 2–3. Затем ставили раствор под источник УФ-излучения: импульсную ксеноновую лампу (ИКЛ) фотореактора производителя ООО «Научно-Производственное Предприятие «Мелитта» (Россия)».

Время обработки растворов во всех опытах – 30 минут. Каждые 5 минут производили отбор проб для снятия показаний оптической плотности на фотометре КФК-3-01 при длинах волн, которые соответствуют значениям основного пика для каждого вещества: нитрофурал – 375; фуразолидон – 370; метронидазол – 322 нм. Эффективность процесса оценивали снижением оптической плотности.

Результаты проделанных опытов представлены на табл. 1.

Таблица 1. Эффективность процесса окисления водных растворов нитрофурала, фуразолидона и метронидазола

Время обработки, мин	Эффективность, %		
	Нитрофурал	Фуразолидон	Метронидазол
5	27	40,8	67
10	54	59,6	69,9
15	61,9	75,6	71,5
20	90,7	90,5	73,4
25	95,3	92,3	77,5
30	99,8	93,5	79,1

По данным табл. 1 следует, что

1. Первоначальная скорость разложения всех трех соединений выше. На начальных стадиях процесса эффективность увеличивается в большей степени по сравнению с более поздними стадиями. Это говорит о том, что в первую очередь удаляется легкоразлагаемая фракция соединений.

2. Окисление с применением реактива Фентона эффективно при разложении всех трех соединений. Эффективность процесса возрастает с увеличением времени обработки каждого вещества.

3. Нитрофурал демонстрирует самую высокую скорость разложения. Уже через 20 минут разложение нитрофурала достигает более 90%, по окончании опыта достигается почти полное разложение (99,8%). Фуразолидон также обладает высокой эффективностью разложения – эффективность разложения более чем на 90% через 20 минут. Степень разложения составляет 93,5% через 30 минут. Метронидазол обладает самой низкой эффективностью разложения среди трех соединений. Даже через 30 минут степень разложения достигает 79,1%.

Нитрофурал, фуразолидон и метронидазол являются нитроорганическими соединениями, однако их химические свойства и их конструктивные особенности обуславливают различия в реакционной способности, включая окисление. Нитрофурал содержит нитрогруппу, которая делает его более реакционноспособным. Нитрогруппа ($-\text{NO}_2$) обладает сильной электроотрицательностью, что повышает его реакционную способность и делает его более уязвимым к процессам окисления [6]. Фуразолидон обладает более стабильной структурой, что приводит к снижению реакционной способности благодаря наличию дополнительных функциональных групп. Эти группы стабилизируют молекулу, снижая ее склонность к окислению или отдаче электронов [7]. В метронидазоле имидазольное кольцо стабилизирует молекулу за счет делокализации электронов, что делает его менее реакционноспособным по сравнению с нитрофуралом и фуразолидоном. В то время как в нитрофурале и фуразолидоне нитрогруппы более уязвимы, в метронидазоле они окружены другими группами, снижающими общую окисляемость. Эта разница обусловлена более эффективным распределением электронной плотности в молекуле метронидазола, что препятствует протеканию окислительных процессов [8].

Кинетическое моделирование (табл. 2) показало, что разложение нитрофурала, фуразолидона и метронидазола при фото-Фентон окислении протекает по кинетике первого порядка. Были определены константа скорости (k) и период полураспада ($t_{1/2}$) для реакций окислительной деструкции каждого соединения. Для константы скорости использовали графический метод, для периода полураспада использовали формулу:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$$

Таблица 2. Значения константы скоростей и период полураспада процесса окисления водных растворов нитрофураля, фуразолидона и метронидазола

Соединение	$k \cdot 10^{-2}$, мин ⁻¹	$t_{1/2}$, мин
Нитрофураля	20,1±1,1	3,45
Фуразолидон	19,4±0,9	3,56
Метронидазол	3,9±0,2	17,64

На основании данных, представленных в табл. 2, можно сделать следующие выводы:

1. Нитрофураля и фуразолидон разлагаются значительно быстрее, чем метронидазол, так как их константы скоростей значительно выше, чем у метронидазола.

2. На высокую скорость разложения соединений указывают и значения времени полураспада. Более короткий период полураспада наблюдается у нитрофураля (3,45 мин) и фуразолидона (3,56 мин) по сравнению с метронидазолом (17,64 мин), что также подтверждает их большую восприимчивость к процессу фото-Фентон окисления.

3. Метронидазол более устойчив к фото-Фентон окислению. Значительно длительный период полураспада метронидазола указывает на необходимость либо увеличения времени обработки, либо оптимизации параметров процесса окисления (например, концентрации H_2O_2 , загрузки реактива Фентона, интенсивности УФ-излучения) для достижения сопоставимого уровня разложения с нитрофуралом и фуразолидоном. что позволяет предположить, что концентрация антибиотиков является основным фактором, влияющим на скорость реакции.

Таким образом, фото-Фентон окисление является перспективным методом удаления этих фармацевтических препаратов из воды, но может потребоваться оптимизация для улучшения разложения метронидазола и потенциального сокращения необходимого времени обработки.

Список литературы

1. Баренбойм Г.М. Особенности загрязнения поверхностных водных объектов компонентами

лекарственных средств / Г.М. Баренбойм, М.А. Чиганова, И.В. Березовская // Водное хозяйство России. – 2014. – № 3. – С. 131-141.

2. Bhattacharjee M.K. Antibiotics That Inhibit Nucleic Acid Synthesis. Chemistry of Antibiotics and Related Drugs, 2016, P. 109–128.

3. Закревский В. В., Лелеко С. Н. Загрязненность мясного сырья нитрофуранами один из индикаторов небезопасности пищевой продукции для потребителей // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2013. – №1. – С. 381-389.

4. Юшков А. Г. К возможности выявления побочных явлений препарата «Метронидазол» (раствор для инфузий 0,5% 100 мл) в условиях эксперимента / А.Г. Юшков, Н.А. Шульгина, А.А. Гущина, Г.Г. Юшков, М.М. Расулов, В.В. Бенеманский, М.М. Бун // Acta Biomedica Scientifica. – 2012. – № 4-2 (86). – С. 216-219.

5. Sina Matavos-Aramyan, Mohsen Moussavi. Advances in Fenton and Fenton Based Oxidation Processes for Industrial Effluent Contaminants Control-A Review // International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources, 2017, Vol. 2 (4), P. 115-131.

6. Беляцкая А.В. Нитрофураны для наружного применения (обзор) / А.В. Беляцкая, И.М. Кашликова, А.О. Елагина, И.И. Краснюк (мл.), И.И. Краснюк, О.И. Степанова // Разработка и регистрация лекарственных средств. – 2019. – Т.8. – № 2. – С. 38-47.

7. Елагина А.О. Изучение антимикробной активности твердых быстрорастворимых лекарственных форм фуразолидона в опытах in vitro / А.О. Елагина, А.В. Беляцкая, И.И. Краснюк (мл.), И.И. Краснюк, О.И. Степанова, Т.В. Фатеева, О.Н. Плахотная, О.В. Растопчина // Вестник ВГУ: Химия. Биология. Фармация. – 2022. – № 1. – С. 70-77.

8. Leitsch D. A review on metronidazole: an old warhorse in antimicrobial chemotherapy. Parasitology. 2019, 146(9), P. 1167-1178.

УДК 628.316.12

Золотов С.С., Блинова А.А., Костылева Е.В.

Оценка возможности извлечения ионов железа (III) из водных сред, содержащих оксиэтилендифосфоновую кислоту, синтетическими ионитами

Золотов Святослав Сергеевич – магистрант 2-го года обучения кафедры промышленной экологии; svszolotov@yandex.ru

Блинова Анна Алексеевна – магистрант 2-го года обучения кафедры промышленной экологии;

Костылева Елена Валерьевна – кандидат химических наук, доцент кафедры промышленной экологии; ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20.

В статье исследована возможность извлечения ионов железа (III) из комплексов с оксиэтилендифосфоновой кислотой в статических условиях сильнокислотным катионитом КУ-2-8 и слабокислотным катионитом DOWEX MAC-3 в H^+ - и Na^+ -формах. Изучена сорбция комплекса железа с оксиэтилендифосфоновой кислотой на сильноосновном анионите АВ-17-8 в OH^- - и Cl^- -формах при различных значениях pH.

Ключевые слова: ионный обмен, очистка сточных вод, комплексы железа с ОЭДФ, комплексонаты

Evaluation of the possibility for extraction of iron (III) ions from aqueous solutions containing 1-hydroxyethylidene-1,1-diphosphonic acid using ion-exchange resins

Blinova A.A., Zolotov S.S., Kostyleva E.V.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Faculty of Biotechnology and Industrial Ecology, Russia, Moscow

The article studied the possibility of extraction of iron (III) ions from the complexes with 1-hydroxyethylidene-1,1-diphosphonic acid in static conditions using both strong and weak acidic cation exchangers KU-2-8 and DOWEX MAC-3 in H^+ - and Na^+ -forms. Sorption of iron complex with 1-hydroxyethylidene-1,1-diphosphonic acid using the strong basic anionite AB-17-8 in OH^- - and Cl^- -forms at various pH values was also studied.

Key words: ion exchange, wastewater treatment, iron complex with HEDP, complexonates

Введение

Комплексоны, основным свойством которых является образование устойчивых комплексонатов с ионами большинства металлов, применяют для растворения и удаления накипи из системы в теплоэнергетике при отмывке теплообменного оборудования и стабилизационной обработке замкнутых водооборотных систем охлаждения [1], нефтедобыче [2]. Они способны удалять даже старые плотные отложения из соединений кальция и магния. Комплексонаты биометаллов используются в сельском хозяйстве для модификации минеральных удобрений и добавок для животных [3,4], в фармации и медицине [5].

Коррозионные повреждения приводят к уменьшению потока в трубах, снижению эффективности теплообмена, необходимости повышения расхода топлива для поддержания заданной температуры и сокращению срока службы оборудования, что в конечном итоге увеличивает риск аварий на производстве. В результате коррозии металлов в воде появляются оксиды и гидроксиды железа. Применение комплексонов, в том числе и оксиэтилендифосфоновой кислоты (ОЭДФ), значительно ускоряет растворение оксидов железа, что позволяет уменьшить концентрацию минеральных кислот при одновременном снижении коррозии металлов. Кроме того, использование комплексонов является экологически чистым способом удаления железооксидных отложений [6].

Оксиэтилендифосфоновая кислота находит широкое применение в гидрометаллургии, в частности при выщелачивании железа из оксидно-

рудного техногенного сырья, удалении окалин с углеродистой стали, используется для промывок теплоэнергетического оборудования (паровых котлов и систем коммуникации).

Ионы железа (III) способны к образованию устойчивых комплексов с ОЭДФ [7]. Логарифмы констант устойчивости комплексов ОЭДФ с трехвалентным железом для структур ML ; MHL ; M_2L ; ML_2 равны 21,6; 16,2; 29,1; 25,2 соответственно [8]. В зависимости от условий ионы железа (III) могут образовать с ОЭДФ как положительно заряженные, так и нейтральные и отрицательно заряженные комплексы [9].

Целью данной работы являлось исследование возможности ионообменного извлечения ионов железа (III) и его комплексов из водных растворов, содержащих оксиэтилендифосфоновую кислоту, с использованием различных ионитов.

Условия экспериментов и методики анализа

Исследования проводили в статических условиях. Навески воздушно-сухого ионита массой $0,5 \pm 0,0005$ г помещали в конические колбы, заливали 100 мл исследуемого раствора и выдерживали в закрытой колбе до 7 суток.

Концентрации ионов железа, как и ОЭДФ (по содержанию фосфора) определяли методом оптико-эмиссионной спектроскопии индуктивно-связанной плазмы в Центре коллективного пользования РХТУ им. Д. И. Менделеева. Фотометрический метод с сульфосалициловой кислотой [10] не позволяет определить содержание железа (III) в растворе из-за образования его устойчивого комплекса с ОЭДФ.

Исследование возможности извлечения ионов железа (III) из комплекса с ОЭДФ на катионитах

Для сорбции были выбраны следующие катиониты в H^+ - и Na^+ -формах: сильнокислотный КУ-2-8 на основе сополимера стирола и дивинилбензола, содержащий функциональные сульфо-группы, и слабокислотный DOWEX MAC-3 на основе полиакрил-дивинилбензольной матрицы с карбоксильными функциональными группами.

Начальная концентрация ионов железа (III) в исходном растворе составляла $41,69 \pm 0,32$ мг/л, ОЭДФ – $538,7$ мг/л, или $162,1 \pm 1,3$ мг/л по фосфору. Результаты представлены в табл. 1-2.

Таблица 1. Содержание ОЭДФ (по фосфору) в растворах после сорбции на катионитах

Сорбент	Ск (P), мг/л		
	pH 2,5	pH 7	pH 10
КУ-2-8 H^+	$162,71 \pm 0,31$	$163,48 \pm 0,74$	$162,9 \pm 1,1$
DOWEX MAC-3 H^+	-*	$161,8 \pm 1,2$	$159,91 \pm 0,91$
КУ-2-8 Na^+	$164,36 \pm 0,76$	$165,19 \pm 0,39$	$162,62 \pm 0,72$
DOWEX MAC-3 Na^+	$163,3 \pm 0,1$	$162,44 \pm 0,77$	$161,79 \pm 0,78$

* катионит DOWEX MAC-3 в H^+ -форме не ионизируется в кислой среде

Таблица 2. Содержание ионов железа (III) в растворах после сорбции на катионитах

Сорбент	Ск (Fe^{3+}), мг/л		
	pH 2,5	pH 7	pH 10
КУ-2-8 H^+	$41,71 \pm 0,006$	$43,02 \pm 0,1$	$43,07 \pm 0,28$
DOWEX MAC-3 H^+	-*	$41,13 \pm 0,29$	$41,55 \pm 0,25$
КУ-2-8 Na^+	$40,34 \pm 0,24$	$42,68 \pm 0,19$	$41,14 \pm 0,19$
DOWEX MAC-3 Na^+	$41,51 \pm 0,085$	$42,26 \pm 0,19$	$41,66 \pm 0,21$

* катионит DOWEX MAC-3 в H^+ -форме не ионизируется в кислой среде

Приведенные результаты показывают, что содержание ионов железа (III) и ОЭДФ (по фосфору) в растворе после сорбции не изменяется по

сравнению с исходными значениями в пределах погрешности измерений. Это свидетельствует о том, что в условиях эксперимента ионы железа (III) не образуют с ОЭДФ положительно заряженные комплексы, способные сорбироваться катионитами.

Кроме того, в отличие от ионов меди [11], ионы железа (III) не извлекаются катионитами из комплекса с ОЭДФ, что обусловлено высокой устойчивостью образуемых комплексов.

Извлечение ОЭДФ и ее комплекса с железом (III) на анионите

Исследования проводили с использованием OH^- - и Cl^- -форм сильноосновного анионита АВ-17-8 на основе сополимера стирола и дивинилбензола с функциональными четвертичными триметиламмониевыми группами.

Концентрация ионов железа (III) в исходном растворе составляла $40,56 \pm 0,29$ мг/л ($0,724$ ммоль/л), ОЭДФ – $527,8$ мг/л ($2,562$ ммоль/л), или $158,83 \pm 0,78$ мг/л по фосфору.

Сорбционную ёмкость определяли по формуле:

$$C_R = (C_H - C_K) \cdot V/g, (1)$$

где C_R – ёмкость сорбента, мг/г; C_H – исходная концентрация (до сорбции) компонента в растворе, мг/л; C_K – конечная концентрация (после сорбции) компонента в растворе, мг/л; V – объём раствора, л; g – навеска сорбента, г.

Эффективность сорбции (%) определяли по формуле:

$$\Xi = ((C_H - C_K) / C_H) \cdot 100 (2)$$

Результаты проведенных исследований (таблицы 3-4) показывают, что анионит АВ-17-8 в OH^- - и Cl^- -формах практически полностью сорбирует комплекс $Fe(III)$ -ОЭДФ из раствора во всем исследованном диапазоне pH. Эффективность сорбции высока и мало зависит от кислотности (щелочности) раствора. Извлечение же оксиэтилендифосфоновой кислоты несколько снижается при переходе от кислой среды к щелочной.

Таблица 3. Содержание ионов железа (III) в растворах после сорбции на АВ-17-8

Сорбент	pH	$C_K (Fe^{3+})$, мг/л/	$C_K (Fe^{3+})$, ммоль/л	Сорбционная ёмкость, мг/г/ ммоль/л	Степень извлечения, %
АВ-17-8 OH^-	2,5	0,08	0,0014	8,11/0,144	99,80
АВ-17-8 Cl^-		0,74	0,0132	7,96/0,142	98,18
АВ-17-8 OH^-	7	1,11	0,019	7,89/0,141	97,26
АВ-17-8 Cl^-		0,08	0,0014	8,11/0,144	99,80
АВ-17-8 OH^-	10	0,81	0,014	7,95/0,142	98,00
АВ-17-8 Cl^-		0,52	0,0093	8,00/0,143	98,71

Таблица 4. Содержание ОЭДФ (по фосфору) в растворах после сорбции на АВ-17-8

Сорбент	pH	C _к (P), мг/л	C _к (ОЭДФ), мг/л*	C _к (ОЭДФ), ммоль/л*	Степень извлечения, %
АВ-17-8 OH ⁻	2,5	14,81	49,17	0,239	90,68
АВ-17-8 Cl ⁻		20,99	69,69	0,339	86,80
АВ-17-8 OH ⁻	7	26,23	87,08	0,423	83,49
АВ-17-8 Cl ⁻		25,13	83,42	0,405	84,18
АВ-17-8 OH ⁻	10	35,70	118,52	0,576	77,52
АВ-17-8 Cl ⁻		31,10	103,3	0,502	80,39

* - содержание в растворе как свободной ОЭДФ, так и в не сорбированном комплексе железа

Согласно [8], в диапазоне концентраций железа 0,56-56,0 мг/л образуются различные комплексы с ОЭДФ, однако все они имеют соотношение М:Л, равное 1:1. Исходя из этого и предположения о том, что в избытке ОЭДФ практически все ионы железа находятся в комплексе, о чем свидетельствуют данные таблицы 3, были рассчитаны как начальная в исходном растворе (1,838 ммоль/л), так и конечные концентрации после сорбции свободной ОЭДФ по формуле:

$$C(\text{ОЭДФ}_{\text{св}}) = C(\text{ОЭДФ}) - C(\text{Fe}^{3+}), (3)$$

где C (ОЭДФ_{св}) – концентрация свободной ОЭДФ, ммоль/л;
C (ОЭДФ) – концентрация как свободной ОЭДФ, так и в не сорбированном комплексе железа, ммоль/л;
C (Fe³⁺) – концентрация железа (III), ммоль/л.
Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5. Содержание свободной ОЭДФ в растворах после сорбции на АВ-17-8 для соотношения М:Л = 1:1

Сорбент	pH	C _к (ОЭДФ _{св}), ммоль/л	Сорбционная емкость, ммоль/г	Сорбционная емкость, мг/л	Степень извлечения, %
АВ-17-8 OH ⁻	2,5	0,238	0,320	65,92	87,05
АВ-17-8 Cl ⁻		0,326	0,302	62,21	82,26
АВ-17-8 OH ⁻	7	0,404	0,287	59,12	78,02
АВ-17-8 Cl ⁻		0,403	0,287	59,12	78,07
АВ-17-8 OH ⁻	10	0,562	0,255	52,53	69,42
АВ-17-8 Cl ⁻		0,493	0,269	55,41	73,18

Как видно, степень извлечения свободной ОЭДФ ниже, чем ее комплекса с железом, при большей сорбционной емкости, что скорее всего обусловлено, в том числе, и ее более высокой концентрацией в растворе.

Также были рассчитаны концентрации свободной ОЭДФ для соотношения М:Л = 1:2 и соотношения М:Л = 2:1 по формулам 4 и 5, соответственно:

$$C(\text{ОЭДФ}_{\text{св}}) = C(\text{ОЭДФ}) - 2C(\text{Fe}^{3+}) (4)$$

$$C(\text{ОЭДФ}_{\text{св}}) = C(\text{ОЭДФ}) - 0,5C(\text{Fe}^{3+}) (5)$$

Следует отметить, что, если соотношение М:Л в образовавшемся комплексе равно 1:2, то несколько снижается, по сравнению с комплексом с М:Л = 1:1, как сорбционная емкость, так и степень извлечения свободной ОЭДФ. При соотношении М:Л = 2:1 сорбционная емкость, и степень извлечения будут выше, чем для соотношения М:Л = 1:1.

Так, при сорбции комплекса с соотношением М:Л = 1:2 анионитом АВ-17-8 в OH⁻ - форме исходная концентрация свободной ОЭДФ составляет 1,114

ммоль/л, конечная концентрация – 0,236 ммоль/л, сорбционная емкость – 0,176 ммоль/г, степень извлечения – 78,81%. При сорбции комплекса с соотношением М:Л = 2:1 исходная концентрация свободной ОЭДФ равна 2,200 ммоль/л, конечная концентрация – 0,238 ммоль/л, сорбционная емкость – 0,392 ммоль/г, степень извлечения – 89,18%.

Закключение

На основании проведенных исследований показано, что в условиях эксперимента ионы железа (III) не образуют с ОЭДФ положительно заряженные комплексы, способные сорбироваться на катионитах. В отличие от комплекса Cu-ОЭДФ ни сильнокислотный катионит КУ-2-8, ни слабокислотный DOWEX MAC-3 в H⁺- и Na⁺- формах не разрушают комплекс ОЭДФ с железом (III) и не извлекают из него ион железа.

Анионит АВ-17-8 сорбирует из раствора как отрицательно заряженный комплекс железа (III) с ОЭДФ, так и анион оксиэтилендифосфоновой кислоты с высокой степенью извлечения.

Список литературы

1. Цуканова Т.В. Использование комплексных соединений при подготовке добавочной воды для оптимизации водно-химического режима водогрейных котлов и систем теплоснабжения. Автореф. дис. на соискание научной степени канд. техн. наук. Москва, 2007. – 20 с.
2. Волошин А.И., Гусаков В.Н., Фахреева А.В., Докичев В.А. Ингибиторы для предотвращения солеотложения в нефтедобыче // Нефтепромысловое дело. – 2018. – №11. – С. 60-72.
3. Аристархов А.Н., Волков А.В., Яковлева Т.А. Эффективность применения цинковых микроудобрений под яровую пшеницу на дерново-подзолистых почвах Центрального Нечерноземья // Плодородие. – 2014. – №2. – С. 9-12.
4. Щипцова Н.В. Динамика биохимических показателей сыворотки животных при применении комплекса // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – №6 (152). – С. 129-133.
5. Гиесова Х.И. Применение комплексных соединений в фармации и медицине // Экономика и социум. – 2022. – №3 (94). – С. 237-240.
6. Артамонова И.В., Горичев И.Г., Забенькина Е.О., Леснова Л.А. Использование комплексонов для экологически чистых процессов растворения железнооксидных отложений // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2010. – №1(9). – с.175-181.
7. Ризен Ю.О. Комплексообразование в системе железо (III) – оксиэтилендифосфоновая кислота в присутствии этилендиаминтетрауксусной кислоты / Ю. О. Ризен, Д. А. Меркулов // Проблемы теоретической и экспериментальной химии : тезисы докладов XXVI Российской молодежной научной конференции, посвященной 120-летию со дня рождения академика Н. Н. Семенова (Екатеринбург, 27-29 апреля 2016 г.). – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2016. – с. 284-285.
8. Кабачник М.И., Медведь Т.Я., Дятлова Н.М., Рудомино М.В. Фосфорорганические комплексоны // Успехи химии. – 1974. – Т. XLIII, Вып. 9. – с. 1567.
9. Кропачева Т.Н., Пагин А.Н., Корнев В.И. Комплексообразование железа (III) с оксиэтилендифосфоновой кислотой в водных растворах // Вестник удмуртского университета. – 2012. – №4. – С. 63-68.
10. ПНД Ф 14.1:2:4.50-96 «Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации общего железа в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с сульфосалициловой кислотой». – М: ИПК Издательство стандартов, 1996 (издание 2011 г.). – с. 22.
11. Блинова А.А., Золотов С.С., Костылева Е.В. Извлечение ионов меди из водных сред, содержащих оксиэтилендифосфоновую кислоту // Успехи в химии и химической технологии. – 2023. В. 37, №17(279). С. 25-28.

УДК 628.349.087.3

Иванов А.А., Иванцова Н.А.

Электрохимическое окисление фенола и гидрохинона

Иванов Антон Александрович – бакалавр 4-го года обучения кафедры промышленной экологии; anton.blackwolfneo@gmail.com

Иванцова Наталья Андреевна – к.х.н., доц., доцент кафедры; ivantsova.n.a@muctr.ru
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,
Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В данной работе исследован процесс электрохимической очистки модельных растворов, содержащих фенол (5,0 мг/дм³) и гидрохинон (5,2 мг/дм³), с использованием усовершенствованных электрохимических окислительных процессов ЕАОР (Electrochemical Advanced Oxidation Processes). Показано, что добавление хлорида натрия в качестве электролита способствует не только повышению проводимости раствора, но и инициирует образование активных форм хлора, что повышает степень очистки. Установлено, что использование прямого электрохимического окисления позволяет удалить 95,8% фенола и 99,9% гидрохинона, что говорит о перспективности ЕАОР подходов для эффективной очистки сточных вод от устойчивых органических загрязняющих веществ.

Ключевые слова: электролиз, Electrochemical Advanced Oxidation Processes, электрохимическое окисление, фенол, гидрохинон.

Electrochemical oxidation of phenol and hydroquinone

Ivanov A.A., Ivantsova N. A.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

In this study, the process of electrochemical treatment of model solutions containing phenol (5.0 mg/L) and hydroquinone (5.2 mg/L) was investigated using enhanced Electrochemical Advanced Oxidation Processes (EAOPs). It was shown that the addition of sodium chloride as an electrolyte not only improves the solution conductivity but also initiates the formation of active chlorine species, thereby increasing the degree of purification. It was found that the use of direct electrochemical oxidation enables the removal of 95.8% of phenol and 99.9% of hydroquinone, highlighting the potential of EAOP approaches for the efficient treatment of wastewater containing persistent organic pollutants.

Key words: electrolysis, Electrochemical Advanced Oxidation Processes (EAOPs), electrochemical oxidation, phenol, hydroquinone.

Введение

Интенсивное развитие промышленности привело к значительному росту потребления чистой воды и усилению негативного антропогенного воздействия на природные водные ресурсы. Одними из наиболее опасных экотоксикантов, широко распространённых в сточных водах промышленных предприятий, являются фенол и его производные (например, гидрохинон) [1]. Производство фенолформальдегидных смол, синтетических волокон, клеев, лаков, красителей, пестицидов, поверхностно-активных веществ и ароматических соединений — лишь небольшая часть сфер, в которых находит применение фенол [2].

Согласно СанПиН 1.2.3685-21, предельно допустимая концентрация фенола в воде составляет 0,001 мг/дм³, гидрохинона — 0,2 мг/дм³. Превышение этих норм ухудшает санитарное состояние водоемов за счет токсичности и снижения уровня растворенного кислорода, а наличие сопутствующих загрязняющих веществ (цианидов, сероводорода, хлоридов, аммиака) повышает опасность фенольных сточных вод, что делает необходимой их эффективную очистку для предотвращения экологических последствий [3].

К традиционным методам очистки сточных вод от фенола относят физико-химические процессы (адсорбция, мембранные процессы, экстракция), биологические методы и химические методы (озон, пероксид водорода, гипохлорит и др.). Однако данные

методы имеют ряд недостатков и не всегда позволяют достичь необходимой эффективности очистки: адсорбционные методы требуют проведения регенерации адсорбентов; химические методы связаны со значительными затратами реагентов и вызывают вторичное загрязнение сточных вод полупродуктами окисления; применение биологических методов характеризуется повышенными эксплуатационными расходами и чувствительностью процесса к условиям среды и т.д. [4].

Несовершенства традиционных методов привели к активному развитию методов АОР (Advanced Oxidation Processes), которые способны с высокой эффективностью удалять сложные органические соединения, поскольку они основаны на образовании реакционноспособных свободных радикалов [5]. Помимо этого, АОР нередко позволяют достичь полной минерализации поллютантов без образования вторичных полупродуктов [6].

Среди методов АОР особый интерес представляют электрохимические процессы (ЕАОР), генерирующие свободные радикалы с помощью процессов электролиза. К числу ключевых преимуществ ЕАОР относятся: высокая эффективность и доступность реагентов, например, добавление хлорида натрия способствует образованию активных форм хлора, что повышает эффективность очистки [7].

Целью данного исследования является изучение электрохимического окисления фенола и гидрохинона в присутствии электролита хлорида натрия.

Экспериментальная часть

Окисление проводили с использованием модельных растворов загрязняющих веществ. В качестве модельных поллютантов были выбраны фенол и гидрохинон. Исходные концентрации веществ составили 5 мг/дм³ для фенола и 5,2 мг/дм³ для гидрохинона. Электрохимическое окисление осуществлялось на электродах Ti/Pt в гальваностатическом режиме с применением источника постоянного тока DAZHENG PS-305D (Китай). Сила тока, подаваемого на электролитическую ячейку, составила 0,2 А, что соответствует плотности тока 0,05 А/см². Продолжительность электрохимического окисления варьировалась от 5 до 30 минут. Схема лабораторной установки представлена на рисунке 1.

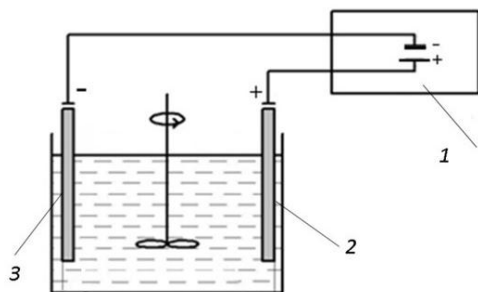
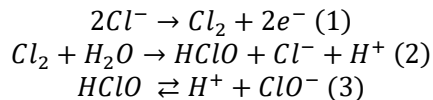


Рис.1. Электрохимический реактор: 1 — источник постоянного тока; 2 — анод; 3 — катод.

Количественное определение содержания фенола и гидрохинона проводилось на основании их реакции с 4-аминоантипирином в присутствии гексацианоферрата(III) калия при pH 10 ± 0,2 согласно РД 52.24.480-2022. Для оценки полноты минерализации фенола и гидрохинона в ходе электрохимического окисления проводили измерение концентраций формальдегида и суммарного содержания одноосновных карбоновых кислот. Формальдегид определяли по реакции с фенилгидразином и гексацианоферратом калия, вследствие которой образовывался фенилгидразон, а промежуточный продукт этого окисления конденсировался с формальдегидом, образуя вещество, окрашенное в оранжево-красный цвет. Сумма одноосновных карбоновых кислот выявлялась по их цветной реакции с м-ванадатом аммония [8].

Для увеличения эффективности электрохимического окисления часто используют добавки электролитов, наиболее распространенным и доступным из которых является NaCl. Концентрация электролита в опыте составила 1,1 г/л. Увеличение эффективности электрохимической очистки при внесении хлоридов объясняется образованием в электрохимической ячейке молекулярного хлора, который затем диффундирует в жидкую фазу и подвергается диспропорционированию с образованием гипохлорита и хлорноватистой кислоты (уравнения 1-3).



Полученная смесь (хлор, гипохлорит и хлорноватистая кислота) активно реагирует со многими органическими соединениями и способствует их минерализации.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе эксперимента было проведено электрохимическое окисление фенола и гидрохинона в присутствии хлорида натрия. Кинетические кривые процесса представлены на рисунке 2.

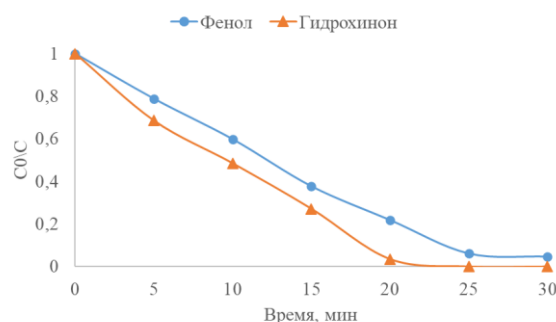


Рис.2. Кинетические кривые электрохимического окисления фенола и гидрохинона.

Из представленных на рисунке 2 данных видно, что электрохимическое окисление фенола и гидрохинона описывается линейной зависимостью, что соответствует реакции с нулевым порядком. Это явление объясняется протеканием окисления на границе раздела фаз (электрод-раствор), чем обусловлены две лимитирующие фазы процесса: поступление в зону реакции исходных веществ и энергии (электрический ток). Константы скорости для окисления фенола и гидрохинона составили 1,8 (ммоль/л)/мин и 2,2 (ммоль/л)/мин соответственно. Максимальная эффективность очистки составила 95,2% для фенола и 99,9% для гидрохинона. Большая скорость и эффективность окисления гидрохинона вероятно связана с его меньшей стабильностью и большей реакционной способностью [9].

На втором этапе эксперимента было принято решение о необходимости проанализировать наличие остаточного количества формальдегида и суммы одноосновных карбоновых кислот. Результаты представлены на рисунке 3.

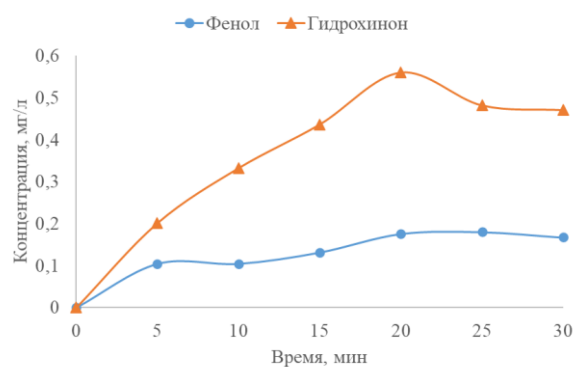


Рис.3. Кинетика образования продуктов (формальдегид) электрохимического окисления фенола и гидрохинона.

Из данных рисунка 3 видно, что в ходе электрохимического окисления фенола и гидрохинона происходит образование формальдегида, что свидетельствует о неполной минерализации, протекающей с разрывом бензольного кольца. С увеличением времени окисления (свыше 20 минут) наблюдается снижение концентрации формальдегида, что обусловлено его электрохимическим окислением. Анализ проб модельной воды показал отсутствие одноосновных карбоновых кислот, что вероятнее всего обусловлено механизмом реакции, не включающим их образования.

Заключение

Был изучен процесс электрохимического окисления фенола и гидрохинона в присутствии хлорида натрия. Достигнутые высокие степени очистки модельных растворов (95,2% для фенола и 99,9% для гидрохинона) позволяют сделать вывод о перспективности метода для очистки сточных вод от устойчивых органических загрязняющих веществ. Механизм электрохимического окисления модельных поллютантов включает в себя разрыв бензольного кольца и разложение углеводородной цепи с образованием формальдегида. Оптимизация условий проведения процесса (плотность тока, время, доза и тип вносимого электролита, материал электродов) могут позволить достичь полной минерализации загрязняющих веществ, что может стать дальнейшим развитием тематики.

Список литературы

1. Mohd A. Presence of phenol in wastewater effluent and its removal: an overview //International Journal of Environmental Analytical Chemistry. – 2022. – V. 102. – N 6. – P. 1362-1384.
2. Горячева В. Н. и др. Обеспечение экологической безопасности при использовании

фенолов в различных отраслях промышленности //Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2018. – V. 8. – N 2. – P. 129-137.

3. Шинкарук Н. А., Ницкая С. Г. Очистка сточных вод от фенола: технологии и перспективы //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. – 2024. – Т. 16. – №. 3. – С. 182-189.

4. Янгулова Г. А., Будник В. А., Муратшин Р. Р. Современные методы очистки фенолсодержащих сточных вод //Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2011. – №. 8. – С. 53.

5. Investigation of the Process of Oxidative Degradation of Phenol by Sodium Ferrate Solutions / A. A. Sarantseva, N. A. Ivantsova, E. N. Kuzin // Russian Journal of General Chemistry. – 2023. – V. 93, N 13. – P. 1–6.

6. Kuznetsov V.V., Ivantsova N.A., Kuzin E.N., Pirogov A.V., Mezhev Y.O., Filatova E.A., Averina Y.M. Study of the Process of Electrochemical Oxidation of Active Pharmaceutical Substances on the Example of Nitrofurazone ((2E)-2-[(5-Nitro-2-furyl)methylene]hydrazine Carboxamide). Water 2023, 15, 3370.

7. Fajardo A. S. et al. Electrochemical oxidation of phenolic wastewaters using a batch-stirred reactor with NaCl electrolyte and Ti/RuO₂ anodes //Journal of Electroanalytical Chemistry. – 2017. – V. 785. – P. 180-189.

8. Лурье Ю. Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. – М.: Химия, 1984. – 448 с.

9. Реутов О. А. Органическая химия. Часть 3. Учебник / О. А. Реутов, А. Л. Курц, К. П. Бутин. – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 555 с.

УДК 628.316.6

Кениг Л.Л., Саранцева А.А.

Обеззараживание хозяйственно-бытовых сточных вод ферратом натрия

Кениг Лидия Леоновна – бакалавр 4-го года обучения факультета биотехнологии и промышленной экологии; kenig.lida@yandex.ru

Саранцева Анастасия Алексеевна – магистр 1-го года обучения факультета биотехнологии и промышленной экологии;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125480, ул. Героев Панфиловцев, дом 20.

В статье рассмотрено применение феррата натрия в качестве обеззараживающего реагента в отношении грамотрицательных и грамположительных культур. Было доказано эффективное воздействие реагента на рост микроорганизмов. Подобрана наиболее оптимальная концентрация, при которой наблюдается полное ингибирование роста бактерий.

Ключевые слова: обеззараживание, сточные воды, грамотрицательные бактерии, грамположительные бактерии, феррат натрия.

Disinfection of household wastewater with sodium ferrate

Kenig L.L., Sarantseva A.A.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article discusses the use of sodium ferrate as a disinfectant for gram-negative and gram-positive cultures. The reagent has been shown to be effective in inhibiting the growth of microorganisms. The most optimal concentration has been selected, which results in complete inhibition of bacterial growth.

Key words: disinfection, wastewater, gram-negative bacteria, gram-positive bacteria, sodium ferrate.

Введение

Вода – это наиболее востребованный и ценный ресурс для человека. Рост численности населения, развитие городов и промышленных производств ведет к увеличению потребления пресной воды, что, в свою очередь, вызывает увеличение объема сточных вод [1]. В связи с этим возникает необходимость поиска и реализации эффективных методов в процессах водоочистки.

Классическая схема очистки промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод представляет из себя ряд методов, направленных на удаление неорганических и органических веществ. Неорганические компоненты сточных вод характеризуются высоким содержанием биогенных элементов, таких как азот и фосфор, органические соединения представлены сложными молекулами, например, белками, жирами, углеводами и другими классами соединений [2]. Данный аспект не позволяет осуществлять прямой сброс сточной воды в гидросферу без предварительной обработки, включающей стадию глубокой биологической очистки. Применение активного ила в ходе водоочистки позволяет достичь эффективного удаления органических структур, соединений азота и фосфора из сточных вод. Однако использование активного ила создает биологическую опасность из-за накопления патогенных форм микроорганизмов, гельминтов и вирусов в процессе очистки. В связи с этим одним из важнейших этапов в ходе водоочистки является последующее обеззараживание сточных вод. Этот процесс способствует предотвращению распространения патогенных микроорганизмов и снижению риска эпидемических вспышек, что значительно улучшает качество жизни населения [3].

В настоящее время разработано множество технологий обеззараживания, применяемых в ходе водоочистки и водоподготовки. Данные процессы подразделяются на химические (реагентные) и физические методы (обработка УФ-излучением, кипячение и др.). Использование химических веществ имеет ряд преимуществ в сравнении с физическими способами обеззараживания. В ходе обработки сточных вод реагентными методами (хлорпроизводными веществами, озоном, пероксидом водорода и др.) наблюдается эффективная инаktivация микроорганизмов, тогда как УФ-облучение может быть менее действенно против некоторых вирусов, споровых форм бактерий и грибов [4]. Множество химических дезинфектантов обладают пролонгированным эффектом, обеспечивая длительную защиту от повторного заражения, тогда как физические методы не сохраняют активность в обработанной среде, что может привести к повторному микробиологическому заражению сточных вод. Кроме того, в промышленных масштабах применение химического обеззараживания часто дешевле (в сравнении с физическими методами) и дает возможность регулировать количество подаваемых реагентов в зависимости от степени загрязнения. Применение химических методов обеззараживания предпочтительнее при необходимости остаточного действия, обработки больших объемов и борьбы с устойчивыми патогенами.

Однако большинство распространенных реагентных способов обладает рядом недостатков. Так, хлорирование наряду с высокой эффективностью ингибирования микроорганизмов способен привести к образованию вторичных токсичных хлороорганических соединений. Помимо этого,

сложности транспортировки и хранения хлора, а также его взрывоопасность и токсичность, усложняют использование этой технологии в промышленности [5]. Проведение обеззараживания посредством озонирования не позволяет достичь пролонгированного эффекта, а также требует высоких затрат на оборудование для синтеза газа на месте [6].

Исходя из вышеперечисленного можно сделать вывод, что на сегодняшний день промышленность не имеет универсального обеззараживающего реагента, поэтому поиск и разработка новой методики остается весьма актуальной проблемой.

Одной из наиболее перспективных технологий проведения процесса обеззараживания является применение феррата натрия в качестве реагента-дезинфектанта. Применение данной технологии характеризуется наибольшей экономической выгодой, так как его производство на месте потребления обходится дешевле по сравнению с производством гипохлорита, ультрафиолетовой обработкой и озонированием. Основным положительный аспект внедрения данного метода в технологическую линию очистки сточных вод – повышение экологичности процесса, так как феррат натрия образует нетоксичный гидроксид железа при окислении, предотвращает образование токсичных хлорсодержащих соединений и позволяет осуществлять сброс очищенной вод в поверхностные источники [7].

Целью данного исследования являлось определение возможности применения феррата натрия как реагента-дезинфектанта для проведения процесса обеззараживания хозяйственно-бытовых сточных вод (после стадии биологической очистки).

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования обеззараживающей способности феррата натрия была выбрана осветленная вода после вторичных отстойников городских сооружений глубокой очистки. Основное внимание исследования было сосредоточено на следующих культурах микроорганизмов: обобщенные колиформные бактерии (ОКБ), бактерии рода *Salmonella*, *Pseudomonas*, *Clostridium*, *Staphylococcaceae* и *Enterococcaceae*.

ОКБ и клостридии способны вызывать ряд инфекционных заболеваний желудочно-кишечного тракта человека [8],[9]. Бактерии рода *Salmonella* является возбудителем таких инфекционных заболеваний, как брюшной тиф, пищевое отравление, сальмонеллез, гастроэнтерит, другие заболевания [10]. Представитель рода *Pseudomonas* бактерия *Pseudomonas aeruginosa* (синегнойная палочка) способна вызывать разнообразные гнойно-воспалительные процессы вплоть до генерализованных форм [11]. Патогенные виды рода *Staphylococcaceae* такие, как *Staphylococcus aureus* (золотистый стафилококк) представляют для человека опасность, так как способны вызывать различные серьезные заболевания: поражения кожи

(различные дерматиты, фолликулиты, фурункулы), пневмонию и токсический шок [12]. Бактерии рода *Enterococcaceae* представляют опасность для человека при значительном снижении резистентности организма, вызывая различные заболевания кожи и мягких тканей, мочеполовой системы, инфекции дыхательных путей и прочие болезни [13].

Данный спектр микроорганизмов был выбран в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21, где указано, что данные микроорганизмы в водоёмах и питьевых водах должны отсутствовать, так как они могут быть причиной возникновения различных заболеваний, что создает эпидемиологическую опасность.

Для проведения исследования феррат натрия готовили в соответствии с электрохимическим методом: проводили анодное растворение железных пластин (отход листового проката стали Ст3) в растворе щелочи с исходной концентрацией 400 мг/л. В ходе электролиза происходит окисление железа (0) до феррата (+6) под действием электрического тока. Концентрация полученного феррата натрия составила 1,73 мг/л.

Для проведения процесса обеззараживания готовили модельные растворы исследуемой воды и стерильной водопроводной воды в соотношении 1:1. В полученные пробы, объемом 100 мл, вносили раствор феррата натрия с различным процентным содержанием: 2; 3,5; 5 и 7%. Полученные пробы выдерживали при комнатной температуре на электромагнитной мешалке КЭ-12-250Т при 120 об/мин в течение 60 минут.

После перемешивания проводили высев проб проводили с помощью мембранных фильтров Владипор (Российская Федерация) типа МФАС - ОС - 2, со средним диаметром пор 0,45 мкм, на твердые селективные среды: ксилозолизиндезоксисолатный агар (XLD-агар) для группы ОКБ; висмут-сульфит-ГРМ агар (BCGPM) для рода *Salmonella*; среда Вильсона-Блера (ВБ) для рода *Clostridium*; маннит-солевой агар (МС) для рода *Staphylococcaceae*; среда №9-ГРМ для рода *Pseudomonas*; среда энтерококк-агар для рода *Enterococcaceae*.

Посевы проб на чашках Петри после проведения эксперимента инкубировали в термостате при температуре (37±1) °С в течение 24-48 часов для всех культур, кроме клостридий – ее инкубировали при (44 ± 0,5) °С в течение 16—18 ч. Данная температура является оптимальной для роста исследуемых микроорганизмов. После процесса инкубации проводился учет и идентификация колоний с целью определения остаточного содержания микроорганизмов, выросших на мембранных фильтрах. Результаты представлены как КОЕ/100 мл. Оценкой эффективности обработки являлось снижение КОЕ бактерий.

Результаты и их обсуждение

Первым этапом работы являлось определение исходного содержания контролируемых культур микроорганизмов в пробе, исследуемой осветленной сточной воде, с целью выявления роста или отсутствия колоний ОКБ и бактерий рода *Salmonella*,

Pseudomonas, *Staphylococcaceae*, *Clostridium* и *Enterococcaceae*. Для этого проводился высев 10 мл исследуемой модельной воды в соответствии с методикой, описанной выше. Результаты данного анализа представлены на рисунке 1.

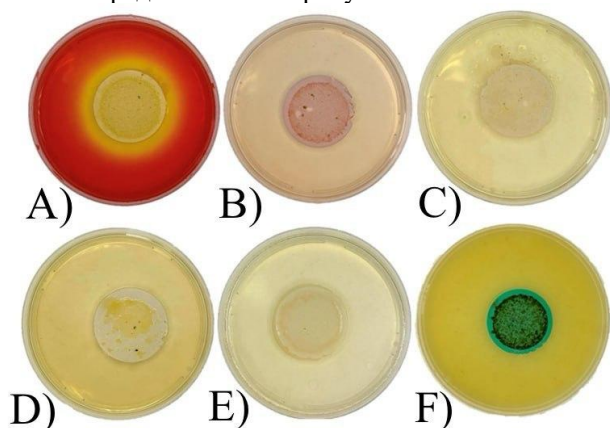


Рисунок 1. Определение содержания микроорганизмов в сточной воде

- A) обобщенных колиформных бактерий (ОКБ);
B) бактерии рода *Enterococcaceae*;
C) бактерии рода *Staphylococcaceae*.
D) бактерии рода *Clostridium*
E) бактерии рода *Pseudomonas*
F) бактерий рода *Salmonella*;

Согласно результатам, представленным на рисунке 1, в пробах наблюдается активный сплошной рост микроорганизмов A) группы обобщенных колиформных бактерий (ОКБ) в виде желтых колоний, а также B) бактерий рода *Enterococcaceae* – розовые колонии; C) бактерий рода *Staphylococcaceae* – желтые колонии; F) бактерий рода *Salmonella* – колонии черного цвета, что подтверждает высокое патогенное загрязнение исследуемых проб осветленной сточной воды. Рост D) бактерий рода *Clostridium* и E) бактерий рода *Pseudomonas* не обнаружен.

Следующим этапом исследования стало изучение обеззараживающей способности феррата натрия и подбор оптимальной концентрации для обработки проб модельной воды. Условия эксперимента были аналогичны предыдущему. Результаты микробиологического анализа данных проб представлены в таблице 1.

Таблица 1. Определение остаточного содержания микроорганизмов после обработки 2; 3,5; 5; 7 объёмн. % феррата натрия, КОЕ/100 мл

Культура микроорганизмов	Остаточное содержание микроорганизмов, КОЕ/100 мл			
	2	3,5	5	7
Доза феррата натрия, объёмн. %				
ОКБ	Сплошной рост	Сплошной рост	>100	30
<i>Enterococcaceae</i>	>50	20	0	0
<i>Salmonella</i>	0	0	0	0
<i>Staphylococcaceae</i>	Сплошной рост	>500	>180	80
<i>Clostridium</i>	0	0	0	0
<i>Pseudomonas</i>	0	0	0	0

По данным из таблицы 1 можно сделать вывод о том, что при добавлении 2 % раствора феррата натрия начинает наблюдаться ингибирование роста как грамположительных, так и грамотрицательных бактерий в сточной воде. Однако при увеличении дозировки феррата натрия происходит более эффективное подавление роста микроорганизмов. Остаточное содержание ОКБ и бактерий рода *Staphylococcaceae* говорит о недостаточной дозе внесения реагента в ходе обеззараживания, что требует интенсификации данного процесса. При этом в ходе эксперимента наблюдается полное подавление роста культур *Enterococcaceae*, *Salmonella*, *Clostridium* и *Pseudomonas*.

Стоит отметить, что добавление любой объемной концентрации феррата натрия практически сразу ингибирует рост бактерий рода *Salmonella*, что может быть полезно при задаче быстро обеззаразить воду. Стоит отметить возрастание эффективности обработки проб модельной воды с увеличением концентрации добавки.

Выводы

Исходя из результатов, полученных в ходе проделанных экспериментов, можно сделать вывод, что феррат натрия обладает высокой обеззараживающей способностью в отношении как грамотрицательных, так и грамположительных микроорганизмов, а именно: обобщенных колиформных бактерий, бактерий рода *Salmonella*, *Staphylococcaceae*, и *Enterococcaceae*. Важно отметить высокую эффективность феррата натрия в отношении патогенных бактерий рода *Salmonella*.

Полученные в ходе работы данные позволяют сделать вывод, что применение феррата натрия в качестве обеззараживающего реагента в отношении грамположительных *Enterococcaceae* имеет высокий потенциал, так как при обработке проб наблюдалось значительное снижение роста культуры.

Однако в ходе эксперимента не удалось достичь полного обеззараживания ОКБ и бактерий рода *Staphylococcaceae*. ОКБ представлены грамотрицательными микроорганизмами, обладающими более сложной клеточной стенкой, что препятствует проведению процесса обеззараживания.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение феррата натрия в качестве реагента-дезинфектанта сточных вод является крайне перспективным, однако требует более детального изучения и проведения процесса интенсификации, например, с применением гидродинамических устройств.

Авторы выражают благодарность научному руководителю, к.т.н., доценту кафедры промышленной экологии РХТУ им. Д. И. Менделеева – Курбатову Андрею Юрьевичу.

Список литературы

1. Wang J.L., Xu L.J. Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Formation of Hydroxyl Radical and Application // Critical Reviews in

Environmental Science and Technology. 2012. V. 42. № 3. P. 251–325. DOI: 10.1080/10643389.2010.507698.

2. Николаева Л. А., Исакова Р. Я. Н63 Николаева, Лариса Андреевна Биологическая очистка сточных вод предприятий нефтехимического комплекса и энергетики: учебное пособие. – 2021.

3. Хохрякова Е.А. Современные методы обеззараживания воды / Е.А. Хохрякова – М.: Издательский центр «Аква-Терм», - 2014. – 55 с.

4. Костюченко С. В., Ткачев А. А., Фроликова Т. Н. УФ-технологии для обеззараживания воды, воздуха и поверхностей: принципы и возможности //Эпидемиология и вакцинопрофилактика. – 2020. – Т. 19. – №. 5. – С. 112-119.

5. Sharma V. K. Potassium ferrate (VI): an environmentally friendly oxidant //Advances in Environmental Research. – 2002. – Т. 6. – №. 2. – С. 143-156

6. Лазарева, Т. П. Методы обеззараживания воды. Достоинства и недостатки / Т. П. Лазарева, Г. В. Макаrchук // Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2020. – № 7(8). – С. 471-476.

7. Аракчеев ЕН, Брунман ВЕ, Брунман МВ, Коняшин АВ, Дьяченко ВА, Петкова АП, Некрасов РЭ. Экспериментальное обоснование

целесообразности обеззараживания и очистки воды и стоков ферратом натрия // Гигиена и санитария. – 2017. – Т. 96. – №3. – С. 216-222.

8. Шлегель Г. Общая микробиология: пер. с нем. / под. ред. Е.Н. Кондратьевой. – М.: Мир, 1987. – 567 с.

9. Литусов Н. В. Возбудители клостридиальной анаэробной инфекции. Иллюстрированное учебное пособие. Екатеринбург: УГМУ, 2017. – 19 с.

10. Литусов Н. В., Козлов А. П. Сальмонеллы. Иллюстрированное учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГМА, 2012. – 51 с.

11. Эльхедми А. Э. и др. Электронно-микроскопический и рестрикционный анализ бактериофагов, специфичных к бактериям рода *Pseudomonas* //Труды БГУ. Микробиология. – 2016. – Т. 11. – №. 2. – С. 211-219.

12. Литусов Н.В. Грамположительные аэробные кокки. Иллюстрированное учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во УГМУ, 2016. – 89 с.

13. Габриэлян Н. И., Горская Е. М., Цирульников О. М. Факторы риска и нозокомиальные инфекции, вызываемые энтерококками //Вестник трансплантологии и искусственных органов. – 2015. – Т. 17. – №. 2. – С. 64-69.

УДК 665.61 : 628.16 : 503.36

Коваленок Р.Р., Нистратов А.В., Грошева С.В.

Испытания активных углей при очистке сточных вод от нефтепродуктов

Коваленок Регина Ренатовна – студент группы Э-41;

Нистратов Алексей Викторович – к.т.н., доцент кафедры промышленной экологии; nistratov.a.v@muctr.ru
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,
Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9

Грошева Светлана Валерьевна – заместитель руководителя Департамента экономики замкнутого цикла

ППК «РЭО»

*В данной статье рассматривается возможность применения адсорбционного метода с использованием различных марок активных углей для удаления нефтепродуктов из сточных вод промышленного предприятия.**Ключевые слова: сорбционный метод, активированные угли, очистка сточных вод***Testing of activated carbons during wastewater treatment from petroleum products**Kovalenok R.R.¹, Nistratov A.V.¹, Grosheva S.V.²¹D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation²PPK «REO»*This article discusses the possibility of using an adsorption method using various grades of activated carbons to remove petroleum products from industrial wastewater.**Key words: sorption method, activated carbons, wastewater treatment***Введение**

Проблемой мирового значения является загрязнение гидросферы нефтепродуктами, в России данная проблема весьма актуальна, так как наша страна является одной из ведущих мировых держав по добыче и экспорту нефти [1]. По некоторым данным, объемы утечки нефти в России составляют от 18 до 23 млн. т. год [2]. Существующие технологические системы очистки нефтесодержащих сточных вод основаны на механических, физико-химических, биохимических и электрохимических методах [2]. Сорбционный метод очистки является одним из наиболее эффективных для удаления нефтепродуктов из сточных вод, позволяя снизить остаточное их содержание до 0,05 мг/дм³. В качестве нефтяных адсорбентов используют самые разные природные и искусственно созданные пористые материалы: золу, коксовую пыль, торф, активные глины, активированный уголь, различные виды глин, окись магния, углистую глину, активированный оксид алюминия, а также специальные ионообменные смолы [3,4,5]. Этот метод рекомендуется для вод с низким уровнем загрязнения нефтяными углеводородами. Сорбционные технологии демонстрируют высокую эффективность при извлечении из сточных вод как мелкодисперсных, так и растворенных углеводородов, которые затем могут быть утилизированы. Кроме того, очищенные сточные воды могут быть использованы в системе оборотного водоснабжения на промышленных предприятиях [6].

Экспериментальная часть

В работе исследовали сточную воду (СВ) предприятия АО "Таиф-НК" (г. Нижнекамск). Вид данной сточной воды - ливневая и промышленная. Источник ее образования - гидроочистка сернистых дистиллятов, установка АВТ (атмосферная вакуумная трубчатка), КГПТО (комплекс глубокой переработки твердых остатков). СВ имеет вид смеси воды с

нефтепродуктами с объемной долей около 35 %. Среднегодовой расход сточной воды 4,38 млн. м³. Требование к очищенной воде: остаточная концентрация нефтепродуктов (н.п.) <0,5 мг/л, чтобы использовать как оборотную.

Согласно схеме очистных сооружений предприятия образовавшаяся СВ подвергается 1) механическому отстаиванию; 2) напорной флотации; 3) биологической очистке; 4) электродиализу.

В лаборатории исходную воду обрабатывали следующим образом (моделируя стадии 1 и 2): 1) отбирали нижний водный слой и отделяли его от пленки нефтепродуктов процеживанием через мелкую сетку; 2) разбавляли дистиллированной водой в 10 раз, что соответствует осветлению с эффективностью 90 %; 3) подвергали напорной флотации с добавкой сатурированной воздухом при 7 атм. воды в объеме 10 % от СВ в течение 10 мин.

Первым шагом изучили кинетику осаждения эмульгированных нефтепродуктов. Разбавили нефтяной слой исходной СВ дистиллированной водой в объемном соотношении 1/100. Концентрацию эмульсии во времени оценивали по оптической плотности непосредственно в кювете фотоколориметра КФК-2МП (толщина кюветы 5 см, длина волны $\lambda=750$ нм) (рис. 1).

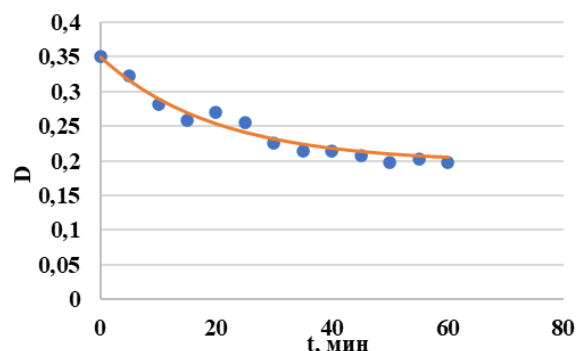


Рис. 1. Определение кинетики всплывания нефтепродуктов в сточной воде

Степень осветления эмульсии за 60 мин составляет лишь 43 %. Следовательно, разделение эмульсии протекает неполностью; по закону Стокса скорость всплывания пропорциональна квадрату диаметра капель, значит, в СВ преобладают частицы с малым диаметром.

Сорбционную очистку осветлённой отстаиванием и флотацией сточной воды осуществляли с использованием часто используемых промышленных

активных углей АГ-3, БАУ и «СО+ПЭ» - экспериментального угля на основе древесных и полимерных отходов [7]. Воду приводили в контакт с адсорбентами в дозе 0,1-1 г/л и выдерживали в течение 7 суток при комнатной температуре, после чего анализировали на остаточное содержание нефтепродуктов экстракционно-фотометрическим методом на концентратометре КН-2 («Сибэкоприбор») (табл. 1).

Таблица 1. Результаты анализов очищенной активными углями СВ на нефтепродукты (н.п.)

Активный уголь	Доза, г/л	Концентрация н.п. в экстракте, мг/л	Концентрация н.п. в очищенной воде, мг/л	Степень очистки от н.п.,%	
АГ-3	1	9,15	3,9	81,2	
БАУ		4,87	1,24	94,0	
СО+ПЭ		3,17	0,22	98,9	
		0,5	4,2	0,84	95,9
		0,25	5,56	1,68	91,9
		0,1	16,1	13,3	35,7

Сравнение степени очистки сточной воды от нефтепродуктов с использованием углей АГ-3, БАУ и СО+ПЭ приведено на рис. 2. Зависимость степени очистки сточной воды экспериментальным активным углём на основе древесных и полимерных отходов при различных дозировках приведена на рис. 3.



Рис. 2. Эффективность очистки сточной воды от нефтепродуктов активными углями при дозе 1 г/л

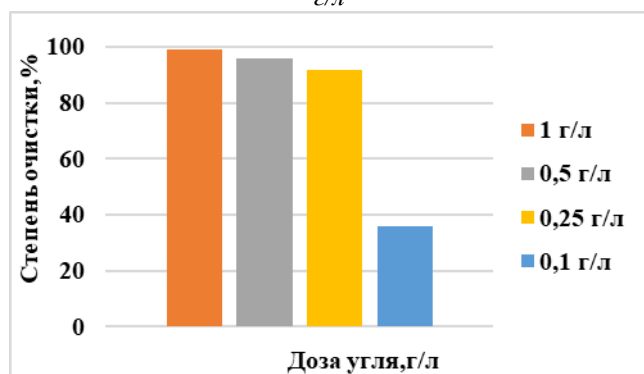


Рис. 3. Определение оптимальной дозы активного угля СО+ПЭ

По рис. 2 можно сделать вывод, что активный уголь СО+ПЭ в дозе 1 г/л превосходит промышленные марки, обеспечивая глубокую очистку СВ от нефтепродуктов и соответствие её требованиям к оборотной воде на предприятии. Из рис. 3 следует, что активный уголь СО+ПЭ в дозе 1 г/л

обеспечивает наиболее полную очистку сточной воды.

Для изучения кинетики адсорбции провели опыт с перемешиванием СВ объёмом 500 мл с 0,5 г СО+ПЭ в течение 60 минут, каждые 15 минут отбирая пробу воды 25 мл (рис. 4).

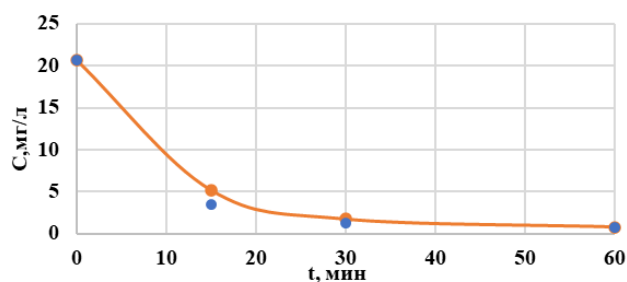


Рис. 4. Кинетическая кривая адсорбции нефтепродуктов активным углём марки СО+ПЭ

На основании рис. 4. можно заключить, что быстрая адсорбция загрязнений протекает на начальном этапе: в течение первых 20 минут происходит очень интенсивное снижение концентрации загрязнителя (с 20 мг/л до примерно 1 мг/л). Это говорит о высокой скорости адсорбции, когда на поверхности активного угля много свободных активных центров. По мере заполнения поверхности пор процесс резко замедляется, и к 60 минутам концентрация адсорбата практически не меняется (остается на уровне около 0,5 мг/л).

Таким образом, для глубокой очистки рассмотренной сточной воды и использования её в качестве оборотной можно рекомендовать активный уголь из отходов СО+ПЭ в дозе 1 г/л как наиболее экономичный, а способ обработки им сточной воды с учётом высоких энергозатрат – интенсивное перемешивание в течение 30 мин с последующим разделением.

Заключение

Проведённые эксперименты по очистке сточных вод с использованием различных марок активированных углей позволили выбрать наиболее эффективный адсорбент. Испытуемые образцы

включали традиционные марки АГ-3, БАУ-А и экспериментальный композиционный материал СО+ПЭ, представляющий собой продукт переработки смеси отходов: сосновых опилок с полиэтиленовой тарой.

Результаты настаивания сточной воды с адсорбентами в течение 7 суток однозначно показали, что именно СО+ПЭ оказался наиболее эффективным, обеспечивая санитарную очистку (степень очистки от нефтепродуктов 98,9 %). Для достижения этого результата необходима доза адсорбента 1 г/л. Изучение кинетики адсорбции выявило, что время перемешивания, требуемое для наиболее полной очистки воды, составляет 60 мин.

Список литературы

1. Фатнева Е.А. Экологические проблемы рекреационных территорий и пути их решения // Современные исследования социальных проблем. – 2011. – Т. 8 – № 4. – С. 69–73.
2. Страхование и управление рисками. Проблемы и перспективы. Монография. Под ред. С.А. Белозерова, Н.П. Кузнецовой. – ООО «Прспект», 2016 г. – 521 с.
2. Трусова В.В. Очистка оборотных и сточных вод предприятий от нефтепродуктов сорбентом на основе бурых углей: диссертация на соискание ученой

степени кандидата технических наук. — Иркутск, 2014. — 132 с.

3. Кормош Е.В., Алябьева Т.М. Разработка эффективных сорбционно-активных материалов для очистки сточных вод от нефтепродуктов / Журнал Белгородского университета кооперации. Серия: Химия. — 2016. — № 3. — С. 20–24.

4. Стахов Е.А. Очистка нефтесодержащих сточных вод предприятий хранения и транспорта нефтепродуктов / Е.А. Стахов.- Л.: Недра, 1983. 263 с.

5. Покровский В.Г. Очистка сточных вод тепловых электростанций / В.Г. Покровский, Е.П. Аракчеев. – Москва: Энергия, 1980. – 256 с.

6. Николаева Л.А., Голубчиков М.А. Очистка производственных сточных вод от нефтепродуктов модифицированными сорбционными материалами на основе карбонатного шлама // Водоснабжение и санитарная техника. — 2016. — № 7. — С. 51–58.

7. Юмашева Ю.Ю., Кострова П.А., Нистратов А.В., Иванцова Н.А. Сравнительные испытания активных углей и адсорбентов из древесных и полимерных отходов при очистке воды от органических загрязнений. Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том XXXVII, № 12 (274). – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2023. С. 206-208.

УДК 577.15

Куленова Д.Р., Бочарова А.В., Грошева В.Д.

Повышение эффективности ферментативного гидролиза соевой мелассы при использовании активированного угля

Куленова Даяна Рахатовна, студентка, группы Э-36, dkulnova@mail.ru

Бочарова Ангелина Вячеславовна, студентка группы Э-36, asfas3asg5@gmail.com

Грошева Вероника Дмитриевна – к.т.н., доцент кафедры биотехнологии

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

Статья посвящена изучению возможности применения активированного угля для повышения эффективности ферментативного гидролиза соевой мелассы инвертазой. Рассматриваются ключевые параметры обработки: температура, концентрация угля, время предобработки. Подобраны оптимальные параметры ферментативного гидролиза предобработанной соевой мелассы с целью ее максимальной конверсии в кормовой микробный продукт. Результаты исследования могут быть полезны для биотехнологической промышленности при использовании соевой мелассы как субстрата для ферментации.

Ключевые слова: соевая меласса инвертаза, ферментативный гидролиз

Enhancing the Efficiency of Enzymatic Hydrolysis of Soy Molasses Using Activated Carbon

Kulnova D. R., Bocharova A. V., Grosheva V. D.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article is dedicated to studying the possibility of using activated carbon to enhance the efficiency of enzymatic hydrolysis of soy molasses with invertase. Key processing parameters are considered: temperature, carbon concentration, and pretreatment time. Optimal parameters for the enzymatic hydrolysis of pretreated soy molasses are selected to maximize its conversion into a feed microbial product. The research results may be useful for the food and biotechnology industries when using soy molasses as a substrate for fermentation or syrup production.

Keywords: soy molasses, invertase, enzymatic hydrolysis"

Введение

Соевая меласса представляет собой отход, образующийся при производстве концентратов белка сои методом спиртовой экстракции [1]. Она не находит широкого применения ни в пищевой, ни в кормовой промышленности. Это объясняется низким содержанием белка в ее составе (не более 11 %), что не позволяет в больших масштабах использовать ее в кормах, а ограничивает ее применение только в рамках небольших дозировок [2]. Применение в пищевой промышленности ограничено содержанием в ней таких углеводов как стахиоза и раффиноза, которые не метаболизируются в организме человека и приводят к метеоризму и дискомфорту. Микробиологический способ ее конверсии является оптимальным, за счет способности в частности дрожжевых клеток к росту на различных углеводах и синтезу высоких концентраций белка в своей биомассе [3].

В работах [4, 5] показана возможность применения соевой мелассы в качестве субстрата для роста дрожжей. Однако наличие в ней сахарозы и других более высокомолекулярных углеводов приводит к низким скоростям ее конверсии и к ограниченности дрожжевых штаммов, способных к ее утилизации.

Ферментативный гидролиз биополимеров как известно является одним из наиболее выгодных методов предобработки растительного сырья [6] за счет возможности проведения процесса при низких температурах в отсутствии агрессивных сред и факторов. Таким образом, целью нашего исследования было оптимизировать процесс

ферментативного гидролиза соевой мелассы. Поскольку доминирующим ее компонентом является сахароза, то обработка проводилась с использованием инвертазы. Необходимо отметить, что в мелассе помимо углеводов содержатся белковые вещества, полифенолы, тяжелые металлы и другие примеси, которые могут являться ингибиторами ферментов. Известно, что активированный уголь применяют для очистки от органических компонентов различных сред [7]. Поэтому исследование возможности повышения эффективности ферментативного гидролиза с применением активированного угля является актуальной задачей.

Экспериментальная часть

В работе использовали соевую мелассу, предоставленную группой компаний «Содружество» г. Калининграда, инвертазу с активностью 10000 ед/мл. Определение количества общих сахаров проводили модифицированным методом Бертрона-Шорля, определение редуцирующих веществ проводили методом Бертрона. Ферментативный гидролиз проводили на водяной бане при различных температурах.

На первом этапе нашего исследования провели ферментативную обработку нативной мелассы, разведенной до концентрации 30 г/л по общим углеводам. В результате эксперимента установлено, что гидролиз при различных температурах и концентрациях фермента шел с очень низкой эффективностью (рис. 1). Выход сахаров составил не более 30 %.

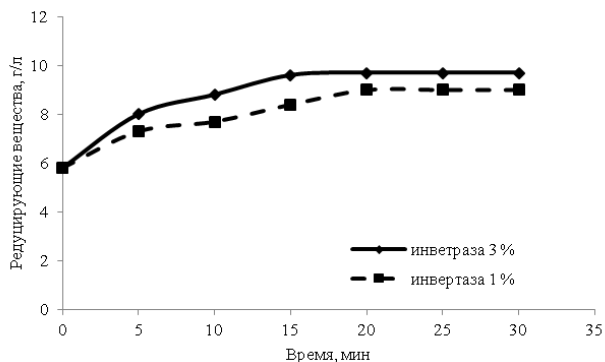


Рис. 1. Динамика накопления редуцирующих веществ при ферментативном гидролизе нативной соевой мелассы инвертазой

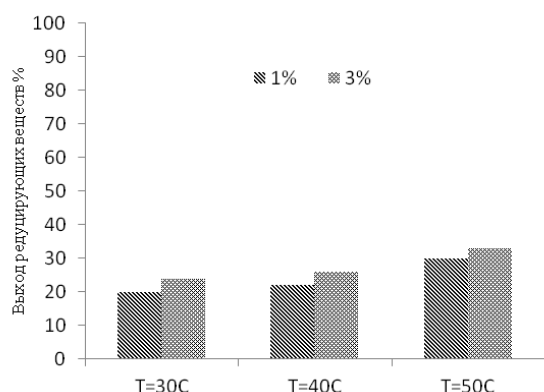


Рис. 2. Выход редуцирующих веществ в процессе ферментативного гидролиза инвертазой соевой мелассы при различной температуре

Это могло быть обусловлено наличием ингибиторов в составе соевой мелассы. Для снижения концентрации ингибиторов в растворе мы использовали обработку активированным углем. Для обработки использовали уголь с фракцией 0,1-1 мм. Обработку проводили при температуре 50°C и pH 5,0 в течение 1 часа при постоянном перемешивании. После обработки мелассы активированным углем, смесь отфильтровывали с использованием бумажного фильтра. Полученный фильтрат подвергали ферментативной обработке при различных условиях. При варьировании концентрации угля в растворе в качестве способа предобработки показано, что оптимальной концентрацией следует считать 3 % угля (рис.3.) В этом случае не смотря на то, что оптическая плотность мелассы снижается незначительно (с 1,07 до 0,8 опт. ед) эффективность последующего ферментативного гидролиза повышается (рис. 3). Так при использовании обработанной углем мелассы удалось сократить время гидролиза мелассы до 15 минут. При этом оптимальное содержание инвертазы в среде составило – 1 % (рис.4). На полученных ферментолизатах с целью проверки их на доброкачественность провели культивирование дрожжей *Endomycopsis fibuligera*. Накопление биомассы составило 9 г/л, а количество остаточных сахаров – 7 г/л.

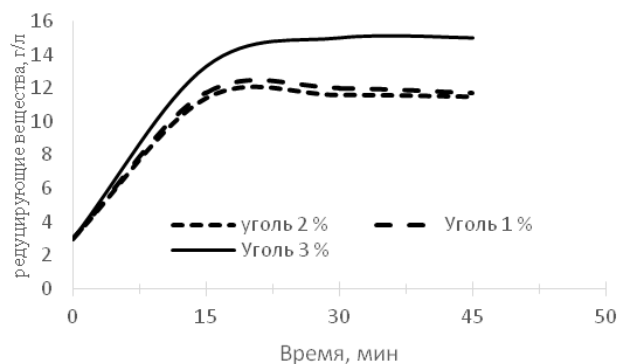


Рис. 3. Динамика накопления редуцирующих веществ в процессе ферментативного гидролиза предобработанной соевой мелассы

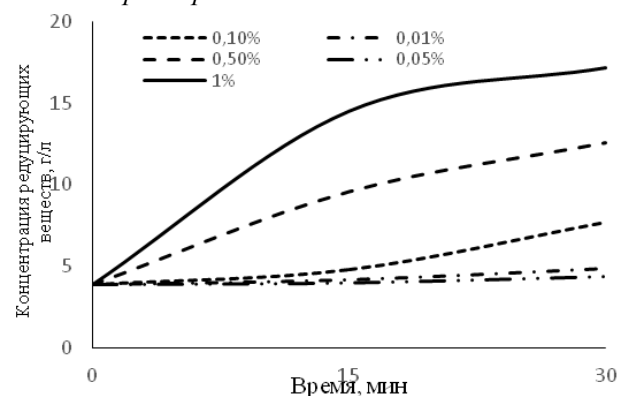


Рис. 4. Ферментативный гидролиз предобработанной соевой мелассы при различном содержании инвертазы

Таким образом, ферментативный гидролиз мелассы может быть рекомендован в качестве предварительной обработки соевой мелассы для последующего культивирования дрожжей.

Заключение

В результате исследования установлено, что применение активированного угля в количестве 3 % для предварительной обработки соевой мелассы, с целью адсорбции ингибиторов, позволило повысить эффективность ферментативного гидролиза соевой мелассы инвертазой. Общее время гидролиза составило не более 30 минут, при этом выход редуцирующих веществ составил 47 % от общих углеводов. Для конверсии остаточных сахаров необходимо оптимизировать процесс обработки соевой мелассы альфа галактозидазой, гидролизующей олигосахариды сои - раффинозу и стахиозу.

Список литературы

1. Polymalic acid fermentation by *Aureobasidium pullulans* for malic acid production from soybean hull and soy molasses: Fermentation kinetics and economic analysis / C. Cheng, Y. Zhou, M. Lin et al. *Bioresource Technology*. - 2017. - Vol. 223. - P. 166–174.
2. S. Rakita, V. Banjac, O. Djuragic, F. Cheli L. Pinotti. Soybean Molasses in Animal Nutrition// *Animals*. - 2021. Vol. 11(2), P. 514
3. Шакир И. В., Грошева В. Д. и др. Комплексная переработка возобновляемого

растительного сырья с получением высокобелковых и пробиотических кормовых продуктов // Бутлеровские сообщения. 2017. Т.50. №5. С.73-80.

4. Смирнова, В. Д. и др. Биотехнологический путь переработки отходов производства соевого белка // Экология и промышленность в России. 2010. № 5. С. 14-16.

5. Gao, Y., Li, D. & Liu, Y. Production of single cell protein from soy molasses using *Candida tropicalis*. Ann Microbiol. 62, 1165–1172 (2012).

6. Enzymatic hydrolysis of cellulosic biomass / B. Yang, Z. Dai, S.-Y. Ding [et al.] // Biofuels. - 2011. - Vol. 2, N 4. - P. 421-450.

7. J. Kaleta, M. Kida, P et al. The use of activated carbons for removing organic matter from groundwater // Archives of Environmental Protection Vol. 43 no. 3 pp. 32–41.

УДК 579.22 579.61

Кутовая М.К., Романова М.В., Викулов Д.Д., Кривошеева А.Н., Белодед А.В.

Исследование свойств агрегирующих форм молочнокислых бактерий *Lactobacillus paracasei*

Кутовая Марина Константиновна, студентка 1 курса магистратуры факультета биотехнологии и промышленной экологии;

e-mail: m.kutovaya22@bk.ru;

Романова Мария Васильевна, аспирант факультета биотехнологии и промышленной экологии;

Белодед Андрей Васильевич, к.б.н., доцент кафедры биотехнологии;

Викулов Дмитрий Дмитриевич, инженер II категории кафедры технологии изотопов и водородной энергетики;

Кривошеева Анна Николаевна, студентка 3 курса бакалавриата факультета биотехнологии и промышленной экологии

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В работе исследованы физико-химические и биологические свойства агрегирующих и неагрегирующих штаммов *Lactobacillus paracasei*, включая гидрофобность клеточной поверхности, дзета-потенциал клеток и термотолерантность культур. Методами световой микроскопии, спектрофотометрии и пропусканием света через движущиеся под действием приложенного электрического поля клетки микроорганизмов установлено, что агрегирующие штаммы молочнокислых бактерий обладают в 10 раз более высокой гидрофобностью клеток (до 26,1%) и сниженным дзета-потенциалом (–10,9 мВ против –14,3 мВ у клеток неагрегирующих штаммов), что, вероятно, обуславливает их склонность к агрегации и оседанию в ходе культивирования. Изучение температурной зависимости роста культур *Lactobacillus paracasei* показало, что оба типа штаммов демонстрируют сходный уровень термотолерантности с предельной температурой роста в 46°C. Полученные данные имеют значение для повышения эффективности биотехнологических процессов с участием молочнокислых бактерий, включая получение молочной кислоты и биомассы пробиотических штаммов, а также разработку методов естественной иммобилизации клеток в процессе ферментации.

Ключевые слова: молочнокислые бактерии, агрегация, гидрофобность, термотолерантность, дзета-потенциал.

Investigation of the properties of aggregating forms of lactic acid bacteria *Lactobacillus paracasei*

Kutovaya M.K., Romanova M.V., Vikulov D.D., Krivosheeva A.N., Beloded A.V.

Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russian Federation.

The physicochemical and biological properties of aggregating and non-aggregating *Lactobacillus paracasei* strains were studied, including cell surface hydrophobicity, cell zeta potential, and thermal tolerance of cultures. Using light microscopy, spectrophotometry, and light transmission through microbial cells moving under the action of an applied electric field, it was found that aggregating strains of lactic acid bacteria have 10 times higher cell hydrophobicity (up to 26.1%) and a reduced zeta potential (–10.9 mV versus –14.3 mV in cells of non-aggregating strains), which confirms their tendency to aggregation and subsidence during cultivation. A study of the temperature dependence of *Lactobacillus paracasei* crop growth showed that both types of strains exhibit a similar level of thermal tolerance with a maximum growth temperature of 46°C. The data obtained are important for improving the efficiency of biotechnological processes involving lactic acid bacteria, including the production of lactic acid and biomass of probiotic strains, as well as the development of methods for the natural immobilization of cells during fermentation.

Key words: lactic acid bacteria, aggregation, hydrophobicity, thermal tolerance, zeta potential.

Введение

Молочнокислые бактерии (МКБ) представляют особый интерес в биотехнологии, пищевой промышленности и медицине благодаря своей способности ферментировать пищевые продукты, улучшая их свойства, синтезировать важные биологически активные и промышленно значимые вещества. Одними из представителей этой группы бактерий являются различные штаммы *Lactobacillus paracasei* – вида, который широко применяется в производстве пробиотиков, функциональных продуктов питания и биологически активных соединений (БАВ). Одной из особенностей микроорганизмов вида *L. paracasei* является их способность к автоагрегации и коагрегации, что

позволяет им быть более устойчивыми к неблагоприятным условиям окружающей среды и конкурентоспособными по отношению к патогенным микроорганизмам. Поэтому они могут быть интересны для изготовления различных улучшенных пробиотических и фармацевтических препаратов [1]. Способность МКБ к коагрегации с патогенами, а также образование биопленок, позволяет снизить антибиотическую нагрузку на организм человека при комплексной терапии инфекционных заболеваний, но при этом достигнуть высокой эффективности в борьбе с патогенными микроорганизмами. Например, штамм *Lactobacillus plantarum* L15 продемонстрировал антагонистические свойства по

отношению к *E. coli*, за счет лучших адгезионных свойств к клеткам кишечника и конкуренции [2].

В биотехнологических процессах при производстве молочной кислоты часто используют иммобилизованные формы молочнокислых бактерий, поскольку это позволяет легко отделять клетки микроорганизмов от продуктов синтеза, а при применении мембранных технологий способствует увеличению срока службы мембран. Однако, метод иммобилизации клеток является достаточно затратным и может снижать эффективность ферментации. В настоящее время проводятся исследования агрегирующих форм молочнокислых бактерий для использования естественной иммобилизации в ферментационных процессах, мембранных биореакторах, поскольку агрегирующие формы обладают рядом преимуществ, упрощают и удешевляют технологический процесс. Во-первых, бактерии, способные к образованию крупных агрегатов, легче седиментируют и фильтруются, что снижает затраты на очистку культуральной жидкости. Во-вторых, крупные агрегаты не проходят через поры мембран, что уменьшает их засорение и продлевает срок службы. В-третьих, при использовании каскадов из мембранных реакторов с рециркуляцией среды агрегированные клетки лучше переносят гидродинамические нагрузки, по сравнению с одиночными. Эти преимущества позволяют использовать агрегирующие формы МКБ для промышленного получения молочной кислоты, бактериоцинов и пробиотиков, разработки непрерывных биотехнологических процессов экономически выгодного биосинтеза БАВ. Изучение свойств агрегирующих форм бактерий, влияния на них условий культивирования, а также проведение адаптации к нехарактерным для них условиям является перспективным направлением для оптимизации, упрощения и удешевления процесса производства молочной кислоты и БАВ, синтезируемых МКБ. Данная работа посвящена получению агрегирующих культур *L. paracasei*, а также исследованию их биологических и физико-химических свойств.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования были выбраны культуры МКБ *L. paracasei* дикого типа, неспособные к образованию агрегатов, и хорошо агрегирующие культуры, которые были получены путем длительной селекции на скорость оседания. Для анализа возможного механизма агрегации у полученных и исходных культур было проведено определение степени гидрофобности поверхности клеток микроорганизмов методом добавления неполярного углеводорода к подготовленной бактериальной суспензии, диспергирования гидрофобных клеток, стабилизации и разделении водно-гексановой фазы в течение 10 минут [3]. Дзета-потенциал клеток анализировали на приборе Litesizer 500 методом пропускания лазерного луча через подготовленную бактериальную суспензию, находящуюся под

действием электрического поля напряжением 60 В при температуре 25 °С [4].

Экспериментальная часть

Селекцию агрегирующего штамма молочнокислых бактерий *L. paracasei* осуществляли следующим образом: в пробирку, содержащую 10 мл питательной среды MRS, засевали исходную культуру бактерий и инкубировали при 37 °С в течение суток, образовавшийся на дне пробирки осадок отбирали с помощью пипетки и пересевали в пробирку с новой питательной средой, всего было проведено 135 селективных пересевов. После чего были получены чистые линии агрегирующей и неагрегирующей культур, которые использовались в последующих исследованиях. Чистые линии микроорганизмов были получены путем разведения суточных культур и посева их на агаризованную среду на чашках Петри. Из всех выросших колоний были отобраны 12 оседающих (клетки склонны к агрегации) и неоседающих (не склонны к агрегации) культур. Микроскопия агрегирующей и неагрегирующей культуры приведена на рис. 1.

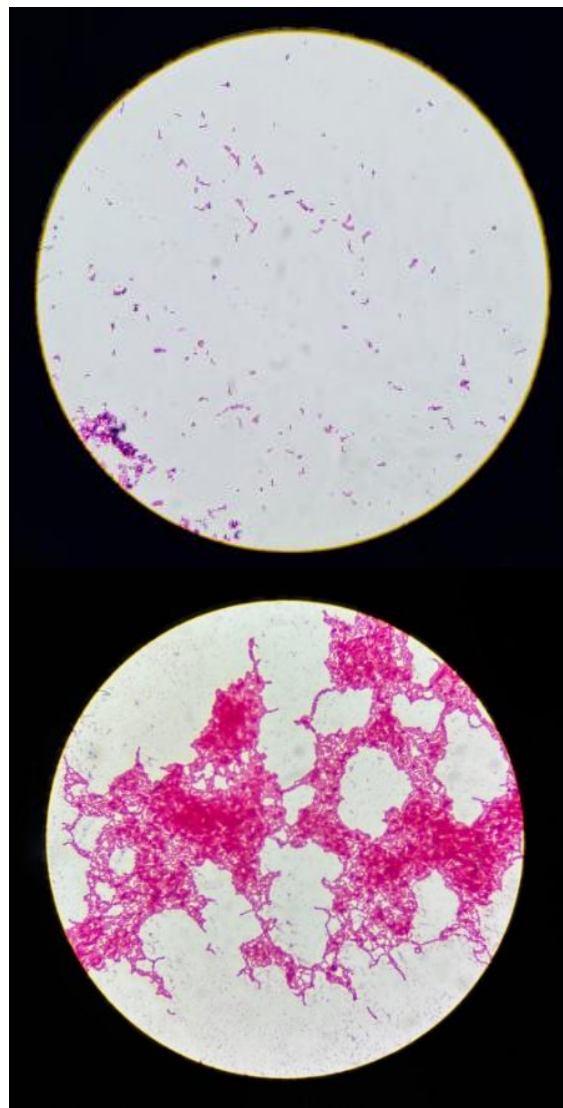


Рис. 1. Микроскопия культур *L. paracasei* 10x100, окраска фуксином. Неагрегирующая (слева) и агрегирующая (справа) культуры

Гидрофобность клеточной поверхности молочнокислых бактерий влияет на их взаимодействие с окружающей средой и соседними клетками микроорганизмов, данное свойство является основой одного из механизмов образования клеточных агрегатов и биоплёнок. Определение гидрофобности, а также возможность контролировать данное свойство необходимы для получения и изучения агрегатов клеток бактерий. Для оценки гидрофобности клеточной поверхности у полученных чистых линий был проведен следующий эксперимент: ночные культуры оседающих и неоседающих штаммов *L. paracasei* центрифугировали при 8000 об/мин в течение 10 мин, осадок трижды промывали фосфатно-солевым буфером и ресуспендировали этим же буфером до значений оптической плотности 0,55-0,60 при 600 нм (H_0), затем к 3 мл бактериальной суспензии добавляли 0,6 мл гексана и перемешивали в течение 1 мин, после стабилизации и разделения фаз (обычно 10 мин при комнатной температуре) измеряли оптическую плотность водной фазы при 600 нм (H_t). Значение гидрофобности (Н) клеток рассчитывали по формуле (1):

$$H = \frac{H_0 - H_t}{H_t} \times 100\% \quad (1)$$

Для проведения эксперимента случайным образом были выбраны две оседающие и две неоседающие линии. Результаты определения гидрофобности приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения гидрофобности для неоседающих и оседающих культур бактерий *L. paracasei*

	1 линия (неоседающая)	2 линия (неоседающая)	1 линия (оседающая)	2 линия (оседающая)
H	2,36%	2,29%	26,1%	20,9%

Как видно из результатов эксперимента, значения гидрофобности поверхности клеток оседающих штаммов бактерий превышают значения гидрофобности поверхности клеток неоседающих штаммов примерно в 10 раз, что подтверждает предположение о влиянии данного свойства на агрегацию культур МКБ.

Непосредственно с гидрофобностью и способностью к автоагрегации и адгезии связан поверхностный заряд клетки: чем ниже заряд поверхности клетки (обычно определяемый в форме дзета-потенциала), тем с большей вероятностью происходит их слипание, так как между ними наблюдается более слабое отталкивание и наоборот. Совместное исследование поверхностного заряда и гидрофобности клеток может прояснить механизм их оседания. Для определения значения дзета-потенциала поверхности клеток молочнокислых бактерий использовали суточные культуры оседающих и неоседающих бактерий, которые центрифугировали при 10000 g при температуре 4 °С

в течение 5 минут, дважды промывали 4 мл фосфатно-солевого буфера и ресуспендировали в том же объеме буфера. Полученные суспензии с помощью шприца вносили в ячейку Litesizer 500 и проводили трехкратное измерение дзета-потенциала при температуре 25 °С и напряжении 60 В. Среднее абсолютное значение дзета-потенциала неоседающих молочнокислых бактерий составило -14,3 мВ, оседающих молочнокислых бактерий – -10,9 мВ. Полученные результаты приведены на рисунках 2-3.

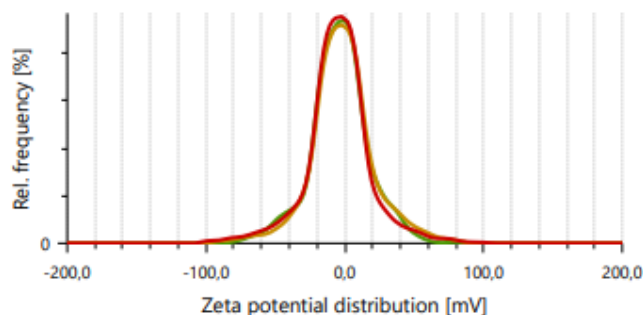


Рис. 2. Определение дзета-потенциала агрегирующей культуры *L. paracasei*

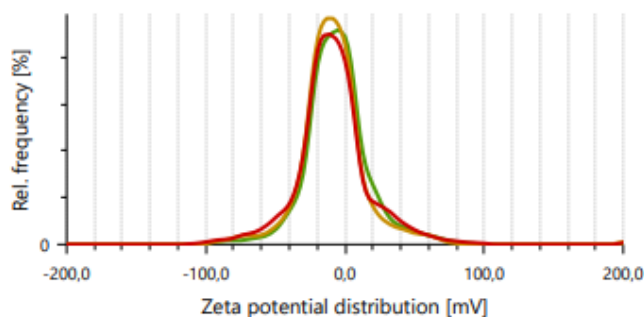


Рис. 3. Определение дзета-потенциала неагрегирующей культуры *L. paracasei*

Проанализировав результаты исследования, можно сделать вывод, что на образование агрегатов, вероятно, влияет как понижение поверхностного заряда клеток, так и усиление гидрофобности поверхности клеток.

Состав и физико-химические свойства клеточных компонентов, в первую очередь мембран и белков, разных штаммов могут влиять на их физиологические свойства, например, на чувствительность к температуре. Для определения устойчивости культур к повышенным температурам была изучена температурная зависимость роста агрегирующих и неагрегирующих культур *L. paracasei*. Для этого в 12 пробирок вносили по 10 мл питательной среды MRS без цитрата аммония и ацетата натрия. После стерилизации каждую пробирку инокулировали 1 мл агрегирующих (линии 1-6) и неагрегирующих (линии 7-12) культур. Пробирки инкубировали в течение 24 часов при температуре 37–46 °С, после чего измеряли оптическую плотность клеточной суспензии при 600 нм. Результаты эксперимента представлены в табл. 2.

Таблица 2. Зависимость оптической плотности агрегирующих (линии 1-6) и неагрегирующих (линии 7-12) культур от температуры культивирования

	37°C	38°C	39°C	40°C	41°C	42°C	43°C	44°C	45°C	46°C
ЛИНИЯ										
1	3,872	2,84	2,994	2,953	2,473	2,414	2,303	2,215	0,526	0,326
2	4,028	3,286	3,124	3,133	2,003	2,215	2,463	2,119	1,661	0,451
3	4,022	3,12	2,344	2,543	2,383	2,542	2,378	2,574	1,426	0,651
4	4,259	2,259	2,304	2,243	2,383	2,333	2,078	2,265	1,376	0,705
5	4,118	3,501	3,164	2,853	2,593	2,451	2,073	2,361	1,416	0,512
6	4,382	2,455	2,604	2,903	2,833	2,421	3,393	2,116	1,411	0,587
7	3,806	2,57	2,504	2,473	2,443	2,115	2,283	2,126	1,436	0,671
8	3,884	2,912	2,844	2,798	2,589	2,638	2,553	2,045	1,751	0,512
9	3,887	2,939	2,594	2,473	2,499	2,552	2,128	2,184	0,781	0,521
10	3,824	2,529	3,094	2,483	2,458	2,521	2,888	2,054	1,701	0,549
11	3,584	2,903	2,854	2,593	2,556	2,553	2,598	2,149	1,746	0,478
12	4,496	2,958	2,814	2,593	2,598	2,587	2,598	2,263	1,661	0,485

По результатам исследования можно сделать вывод, что оптимальной температурой культивирования, при которой достигается наибольший суточный прирост биомассы всех линий (1-12), ожидаемо является температура 37°C. Повышение температуры негативно сказывается на росте как агрегирующих, так и неагрегирующих культур. Значительного различия в чувствительности культур к повышенным температурам не наблюдалось. При температуре 46° C рост культур существенно замедлялся, выход биомассы снижался. Последующие эксперименты будут посвящены исследованию адаптации агрегирующий и неагрегирующих форм *L. paracasei* к повышенным температурам.

Заключение

В результате работы были изучены свойства микроорганизмов, предположительно влияющие на их способность образовывать агрегаты и микроколонии в жидкой питательной среде и быстро оседать. Установлено, что оседающие культуры *L. paracasei* характеризуются значительной гидрофобностью (20,9 – 26,1%) клеточной поверхности и низким дзета-потенциалом (–10,9 мВ), что объясняет их способность к агрегации и седиментации. Неоседающие штаммы, напротив, обладают низкой гидрофобностью (2,29 – 2,36%) и немного более высоким дзета-потенциалом (–14,3 мВ), что обеспечивает большую стабильность суспензии клеток. Термотолерантность обоих типов культур не зависит от их поверхностных свойств и склонности к агрегации, температура 46°C одинаково

подавляет рост всех линий. Оседающие штаммы МКБ перспективны для применения в мембранных реакторах и системах естественной иммобилизации благодаря способности к агрегации. Неоседающие формы могут быть использованы в жидких пробиотических препаратах, требующих длительной стабильности суспензии.

Список литературы

1. Tomás García-Cayuela, Ahmed M. Korany, Irene Bustos, Luz P. Gómez de Cadiñanos, Teresa Requena, Carmen Peláez, M. Carmen Martínez-Cuesta Adhesion abilities of dairy *Lactobacillus plantarum* strains showing an aggregation phenotype // Food Research International, 57. – 2014. – P. 44-50
2. Behrooz Alizadeh Behbahani, Mohammad Noshad Fereshteh Falah Inhibition of *Escherichia coli* adhesion to human intestinal Caco-2 cells by probiotic candidate *Lactobacillus plantarum* strain L15 // Microbial Pathogenesis, 136. – 2019
3. Khromova, N.Y.; Epishkina, J.M.; Karetkin, B.A.; Khabibulina, N.V.; Beloded, A.V.; Shakir, I.V.; Panfilov, V.I. The Combination of In Vitro Assessment of Stress Tolerance Ability, Autoaggregation, and Vitamin B-Producing Ability for New Probiotic Strain Introduction // Microorganisms, 2022. – 10. – 470. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10020470>
4. Moreno, C.N.; Gomez, J.N.; Taranto, M.P.; Ledesma, A.E.; Bustos, A.Y. Molecular Insight into the Response of Lactic Acid Bacteria to Bile Acids // BioTech, 2024. – 13. – 29. <https://doi.org/10.3390/biotech13030029>

УДК 547.777

Ли В.А., Колосова О.Ю., Лозинский В.И.

Полимерные матрицы для фитогормонов на основе криогелей поливинилового спирта

Ли Виктория Андреевна – студентка группы МО-16; victorial21601@gmail.com.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, д. 9.

Колосова Ольга Юрьевна – к.х.н., с.н.с.;

ИНЭОС РАН, Россия, Москва, 119334, ул. Вавилова, д. 28, стр. 1.

Лозинский Владимир Иосифович* – д.х.н., г.н.с.;

ИНЭОС РАН, Россия, Москва, 119334, ул. Вавилова, д. 28, стр. 1.

В статье рассмотрено получение физических нековалентных криогелей поливинилового спирта с добавками фитогормонов – ауксинов. Оценены физико-химические свойства полученных гелевых материалов. Показано, что криогели поливинилового спирта могут применяться в качестве носителей фитогормонов.

Ключевые слова: сельское хозяйство, криогели поливинилового спирта, ауксины, фитогормоны

Polymer matrices for phytohormones based on Poly(vinyl alcohol) cryogelsLee V.A.¹, Kolosova O.Y.², Lozinsky V.I.²¹ D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation² A. N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

The article discusses the obtention of physical non-covalent Poly(vinyl alcohol) cryogels with additives of phytohormones – auxins. Physicochemical parameters of these gel materials were estimated. It was shown that Poly(vinyl alcohol) cryogels can be used as carriers of phytohormones.

Key words: agriculture, Poly(vinyl alcohol) cryogels, auxins, phytohormones

Введение

На сегодняшний день в области химии активно развивается концепция создания полимерных носителей для контролируемой доставки биологически активных веществ. Примером носителей являются криогели поливинилового спирта (КГПВС) – физические макропористые гетерофазные студни, которые образуются в результате замораживания растворов поливинилового спирта, выдерживания его в замороженном состоянии и оттаивании (рис. 1). Данная методика получения гидрогелей характеризуется рядом преимуществ, в частности простотой осуществления и уникальными свойствами полученных носителей, например, самопроизвольное образование пористой структуры в процессе «замораживания-оттаивания». Криогели обладают высокой биосовместимостью, стабильностью, прочностью, высокой пористостью и способностью удерживать воду.



Рис. 1. Принципиальная схема криотропного гелеобразования: 1 – растворитель (вода); 2 – полимер-предшественник (ПВС); 3 – поликристаллы замёрзшего растворителя; 4 – незамёрзшая жидкая микрофаза (НЖМФ); 5 – полимерная сетка гелевой фазы гетерофазного криогеля; 6 – макропоры; 7 – растворитель (вода) [1].

В последние годы в сельском хозяйстве всё более широкое применение находят гидрогелевые материалы, особенно в контексте борьбы с эрозией почв и повышении фитопродуктивности растений [1]. Гидрогели образуют аморфную студенистую массу при гидратации, что приводит к поглощению и десорбции воды. Поэтому гидрогели действуют как источник медленно высвобождающейся воды в почве (миниатюрные резервуары для воды). Возможность применения гидрогелей снижает факторы, приводящие к ухудшению состояния почвы, позволяет улучшить рост сельскохозяйственных культур, а также повышают их урожайность и качество [2].

Довольно часто гидрогели применяются в качестве почвенного кондиционера (добавки к почвенному субстрату) для повышения качества и плодородности почвы (рис. 2). Данная область уделяет внимание именно механизму высвобождения БАВ из матрицы гидрогелей, поскольку именно в этом случае гидрогель используется для контролируемого и пролонгированного высвобождения в почву питательных веществ или удобрений [3].

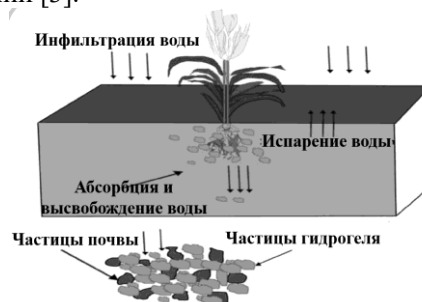


Рис. 2. Концептуальная схема, описывающая влияние гидрогеля на различные гидравлические параметры почвы [4].

Одним из классов биологически активных веществ (БАВ), часто применяющихся в сельском хозяйстве, являются фитогормоны – вещества, стимулирующие клеточное деление растений. Ауксины – группа фитогормонов (растительных гормонов), играющих ключевую роль в регуляции роста и развития растений. Соединения данного подкласса – универсальные регуляторы роста растений, влияющие на клеточное деление, растяжение, морфогенез растений, а также на образование и рост их корней. Возможность введения ауксинов в матрицу КГПВС позволила бы контролировать высвобождение БАВ, а также снизить частоту ирригаций почвы [5].

Таким образом, предпосылками использования криогелей в качестве носителей ауксинов являются: увеличение способности почвы удерживать воду; уменьшение эрозии и стока; увеличение проницаемости и инфильтрации почвы; уменьшение тенденции почвы к уплотнению; возможность использования криогелей для контролируемого и пролонгированного высвобождения БАВ в почву.

Получение КГПВС с добавками фитогормонов

В данной работе методом «замораживания-оттаивания» были получены КГПВС в присутствии ауксинов: калиевых солей индолил-3-уксусной и индолил-3-масляных кислот (рис. 3). Оценены физико-химические свойства полученных образцов, изучена динамика высвобождения ауксинов из гелевой матрицы носителя.

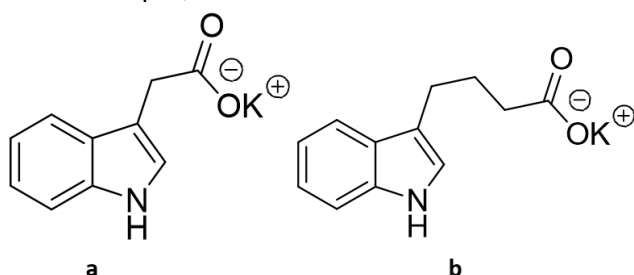


Рис. 3. Структурные формулы ауксинов: а – калиевая соль индолил-3-уксусной кислоты (ИУК); б – калиевая соль индолил-3-масляной кислоты (ИМК).

Из водного раствора с концентрацией ПВС 100 г/л были получены образцы калиевых солей ИУК и ИМК в варьируемых концентрациях от 0,05 до 0,3 моль/л, также были сформированы образцы без добавок. Образцы для оценки модулей упругости формировали в цилиндрических дюралюминиевых формах с внутренним диаметром 15 мм и высотой 10 мм, для измерения температуры плавления – в полиэтиленовых пробирках с металлическим шариком на дне. Образцы помещали в криостат, замораживали и выдерживали при -20°C в течение 12 ч, а затем оттаивали со скоростью 0,03°C/мин. Общее время процесса составляло 18 часов.

Влияние добавок ауксинов на физико-химические и теплофизические свойства КГПВС

У полученных образцов оценены модули упругости (рис. 4). Для образцов КГПВС без добавок значение модуля Юнга составляло $9,7 \pm 0,2$ кПа. В

случае образцов КГПВС с добавкой калиевой соли ИУК от 0,05 до 0,3 моль/л: с ростом концентрации ауксина значения модуля Юнга снижались от $27,2 \pm 0,3$ кПа (концентрация 0,1 моль/л) до $24 \pm 0,2$ кПа (концентрация 0,3 моль/л), значения условно-мгновенного модуля сдвига G_0 снижались от $29,2 \pm 0,2$ кПа (концентрация 0,1 моль/л) до $20,3 \pm 0,3$ кПа (концентрация 0,3 моль/л). При это внесение минимальной концентрации в 0,1 моль/л добавки приводило к довольно характерному увеличению модулей упругости.

Аналогичная тенденция наблюдалась и в отношении реологических характеристик калиевой соли ИМК: сначала наблюдалось увеличение значения модуля Юнга (Е) при введении ауксина в матрицу КГПВС (относительно контрольных образцов КГПВС без добавки), а затем Е снижается от $15,4 \pm 0,2$ кПа (концентрация 0,05 моль/л) до $3,7 \pm 0,4$ кПа (концентрация 0,3 моль/л). Значение условно-мгновенного модуля сдвига изменялись так же: при внесении добавки увеличивались до $12,0 \pm 0,4$ кПа (концентрация 0,1 моль/л), а затем снижались до $3,7 \pm 0,1$ кПа (концентрация 0,3 моль/л).

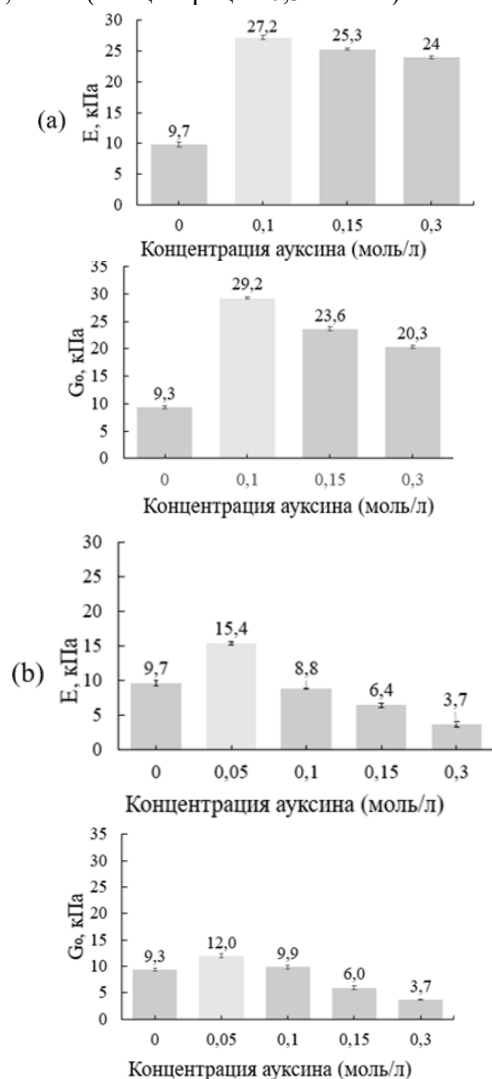


Рис. 4. Диаграммы зависимостей модуля Юнга одноосного сжатия (Е) и условно-мгновенного модуля упругости (G_0) образцов КГПВС от концентраций добавок ауксинов: а – калиевая соль ИУК, б – калиевая соль ИМК.

Стоит отметить, что в случае обеих добавок ауксинов наблюдается незначительное изменение реологических свойств образцов КГПВС.

Также была оценена температура плавления образцов ($T_{пл}$), которая также является мерой их теплостойкости (рис. 5). Значения температур плавления КГПВС монотонно уменьшались с увеличением концентраций добавок, при этом температура плавления КГПВС без добавок составляла $73 \pm 0,1^\circ\text{C}$. При увеличении концентрации калиевой соли ИУК наблюдалось постепенное снижение температуры плавления от $75 \pm 0,1^\circ\text{C}$ до $73 \pm 0,2^\circ\text{C}$ (для концентраций 0,1 моль/л и 0,3 моль/л соответственно). Температуры плавления КГПВС с добавкой калиевой соли ИМК также постепенно понижались от $72 \pm 0,2^\circ\text{C}$ (концентрация 0,05 моль/л) до $60 \pm 0,2^\circ\text{C}$ (концентрация ауксина 0,3 моль/л).

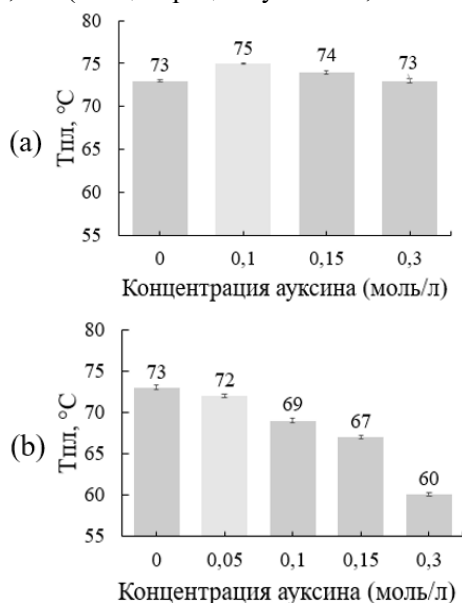


Рис. 5. Диаграммы зависимостей температур плавления ($T_{пл}$) образцов КГПВС от концентраций добавок ауксинов: а – калиевая соль ИУК, б – калиевая соль ИМК.

При увеличении концентраций внесённых добавок фитогормонов для теплостойкости образцов КГПВС наблюдалась тенденция, аналогичная реологическим свойствам.

Изучение динамики высвобождения ауксинов из гелевой матрицы КГПВС

На следующем этапе работы была изучена динамика высвобождения (релиз) ауксинов из гелевой матрицы носителя в водное окружение (рис. 6). Для получения экспериментальных данных образцы КГПВС с концентрациями добавок 0,1 моль/л помещали в водное окружение, через определённые интервалы времени отбирали аликвоты с последующим восполнением чистой водой. Далее записывали оптическое поглощение при длинах волн 220 и 222 нм для калиевой соли ИУК и ИМК соответственно. Концентрацию веществ в анализируемом растворе определяли по предварительно построенным калибровочным кривым.

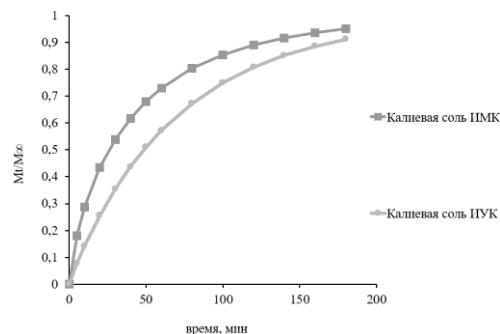


Рис. 6. Кривые высвобождения в воду ауксинов (концентрация добавки 0,1 моль/л) из образцов КГПВС в водное окружение.

Так как количество вещества, вышедшего из матрицы КГПВС близко к начальным концентрациям внесённых добавок, можно судить о характере высвобождения ауксинов в водное окружение: релиз протекает свободно и без диффузионных препятствий, равновесная концентрация в системе достигается приблизительно за 3 часа.

Заключение

Полученные КГПВС с добавками ауксинов (калиевых солей индолил-3-уксусной и индолил-3-масляной кислот) сохраняют свои упругие свойства и остаются устойчивыми к воздействию высоких температур, высвобождение ауксинов из гелевой матрицы носителя в водное окружение протекает свободно и без диффузионных затруднений приблизительно за 3 часа.

Проведённые эксперименты на биологическую активность носителей показали, что внесение ауксинов в матрицу КГПВС не приводит к изменению их биологической активности, процесс ризогенеза пшеницы активируется (образуется большее число длинный корней). Также показано, что внесение фитогормонов в полимерную матрицу КГПВС позволяет сократить количество ирригаций почвы при выращивании растений.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 075-00276-25-00 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Список литературы

1. Лозинский В.И. Криогели на основе природных и синтетических полимеров: получение, свойства и области применения // Успехи химии. – 2002. – Т. 71. – №. 6. – С. 559-585.
2. Tariq Z. et. al. Significance of biopolymer-based hydrogels and their applications in agriculture: a review in perspective of synthesis and their degree of swelling for water holding // RSC advances. – 2023. – Vol. 13. – №. 35. – P. 24731-24754.
3. Ma L. et. al. Hydrogels as the plant culture substrates: A review // Carbohydrate Polymers. – 2023. – Vol. 305. – 120544.
4. Adjuik T.A. et al. The impacts of bio-based and synthetic hydrogels on soil hydraulic properties: A review // Polymers. – 2022. – Т. 14. – №. 21. – С. 4721.
5. Baran A. et.al. Hydrophysical and Biological Properties of Sandy Substrata Enriched with Hydrogel // Polish Journal of Environmental Studies. – 2015. – Vol. 24. – №. 6. – P. 2355-2362.

УДК 57.084.1

Лоскутова Е.В., Рогозина Д.А., Каленов С.В., Гусева Е.В.

Исследование метилотрофных культур *Rhizobium pisi* и *Sinorhizobium fredii* на способность синтезировать наночастицы серебра

Лоскутова Екатерина Вячеславовна – студентка группы МК-27; katty.loskutova01@gmail.com

Рогозина Диана Александровна – студентка группы МК-27; diana.rogosina@gmail.com

Каленов Сергей Владимирович – д.т.н., профессор кафедры биотехнологии;

Гусева Елена Владимировна – к.т.н., доцент кафедры химического и фармацевтического инжиниринга;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В работе рассмотрены процессы получения наночастиц серебра на основе двух бактериальных культур. Представлены результаты аналитических исследований полученных наночастиц, которые дают наглядную характеристику их размеров и формы.

Ключевые слова: наночастицы серебра, метилотрофные культуры, биосинтез, спектроскопический анализ, СЭМ-анализ, ПЭМ-анализ, ДРС-анализ.

Investigation of methylotrophic cultures of *Rhizobium pisi* and *Sinorhizobium fredii* on the ability to synthesize silver nanoparticles

Loskutova E.V., Rogozina D.A., Kalenov S.V., Guseva E.V.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article discusses the processes of obtaining silver nanoparticles based on two bacterial cultures. The results of analytical studies of the obtained nanoparticles are presented, which give a visual description of their size and shape.

Key words: silver nanoparticles, methylotrophic cultures, biosynthesis, spectroscopic analysis, SEM analysis, TEM analysis, DLS analysis.

Введение

Наночастицы – это частицы, размеры которых не превышают 100 нм во всех трех измерениях, с заданной структурой и свойствами. Множество исследований посвящено изучению наносеребра, что обусловлено его уникальными противомикробными и оптическими свойствами.

Основными подходами к получению наночастиц серебра являются химический, физический, механический и биологический методы. Наибольший интерес в биомедицине представляют «зеленые» методы синтеза в силу своей дешевизны, низкой энергозатратности и минимального использования токсичных реагентов [1].

Экспериментальная часть

В ходе исследования анализировалась способность метилотрофных бактерий *Rhizobium pisi* и *Sinorhizobium fredii* синтезировать наночастицы серебра. С помощью метода накопительных культур происходит выделение чистой культуры. Это осуществляется за счет множественных пересевов бактерий на питательную среду. Пересевы производятся поочередно: на чашки петри и в колбы. После выделения чистой культуры идет этап наращивания биомассы. Рост биомассы происходит в питательной среде в колбе и длится от 1 до 3 суток. Полученную биомассу разливают в ячейки луночного планшета по 1,9 мл, а затем в каждую ячейку добавляется по 0,1 мл стерильного раствора AgNO_3 с концентрацией 50 мг/л. Планшет помещается на шейкер при 173 об/мин. Синтез наночастиц серебра происходит в течение 3-5 часов, первая точка, по которой визуально можно оценить появление наночастиц серебра, – приблизительно 60 минут. Перед проведением дальнейших исследований проводится визуальный анализ: оценивается изменение окраски раствора на желтый или бурый.

После предположения, на основе визуального анализа, об успешном синтезе наночастиц культурами *Rhizobium pisi* и *Sinorhizobium fredii*, был проведен ряд аналитических исследований. Перечисленные ниже методы могут дать представление о наличии, размерах и форме наночастиц.

Для проведения спектроскопического анализа каждый час отбирались пробы, затем центрифугировались с целью отделения супернатанта от биомассы. Спектроскопический анализ растворов был проведен с помощью двухлучевого спектрофотометра SHIMADZU UV-2600. Результаты проведения спектроскопических измерений анализировались при помощи программного обеспечения UVProbe: SHIMADZU (Shimadzu Corporation) версии 2.10. Измерения проводились с использованием дистиллированной воды в качестве раствора сравнения. Полученные результаты представлены на рисунках 1, 2, по которым можно проследить характерные для наночастиц серебра полосы поглощения в диапазоне длин волн 390–450 нм. Спектры подтверждают образование наночастиц.

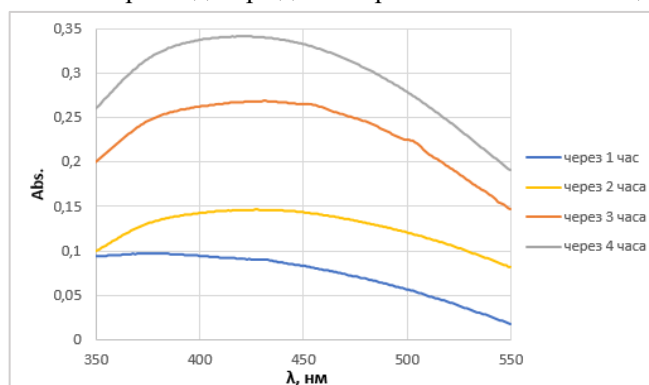


Рис. 1. Спектр поглощения НЧ на основе *Rhizobium pisi*

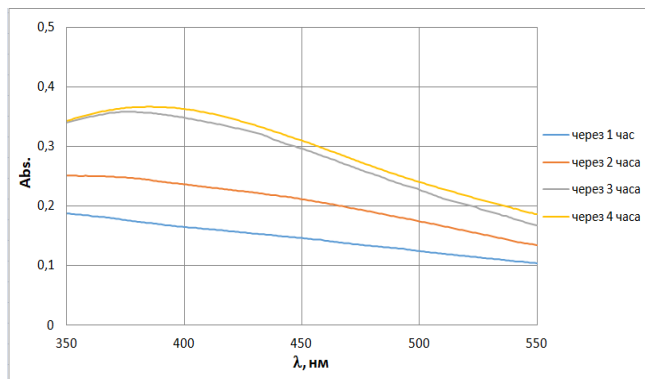


Рис. 2. Спектр поглощения НЧ на основе *Sinorhizobium fredii*

СЭМ (сканирующая электронная микроскопия) анализ был выполнен при помощи электронного микроскопа марки JSM-6510LV (Jeol, Japan) во вторичных электронах под ускоряющим напряжением 15 кВ. Измерения выполнялись на оборудовании Центра коллективного пользования им. Д.И. Менделеева.

ПЭМ (просвечивающая электронная микроскопия) анализ образцов проводили с помощью электронного микроскопа JEM-100CX 2 (JEOL, Япония) при ускоряющемся напряжении в 80 кВ с последующей обработкой и анализом изображений с помощью программного обеспечения LabVIEW 14 с IMAQ Vision (National Instruments, США).

Благодаря проведенной сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии удалось установить размеры и форму синтезированных наночастиц серебра (рис. 3, 4).

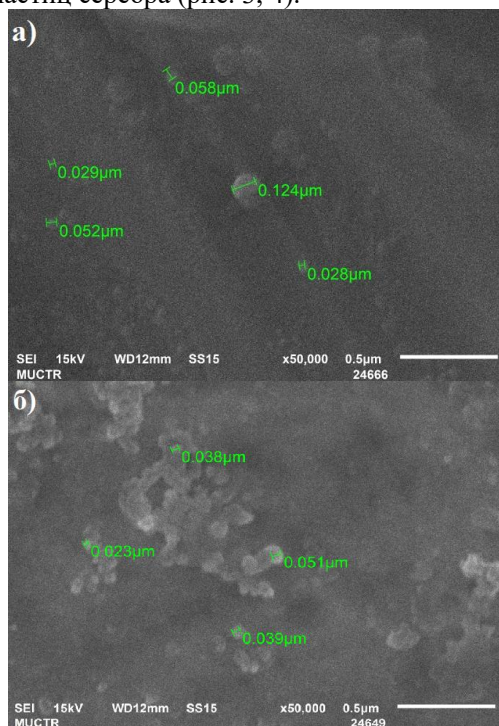


Рис. 3. СЭМ изображение наночастиц серебра на основе: а) *Rhizobium pisi*, б) *Sinorhizobium fredii*

По полученным изображениям удалось установить средние размеры синтезированных наночастиц. Результаты СЭМ: *Rhizobium pisi* – 58 нм,

Sinorhizobium fredii – 38 нм. Результаты ПЭМ: *Rhizobium pisi* – 47 нм, *Sinorhizobium fredii* – 25 нм.

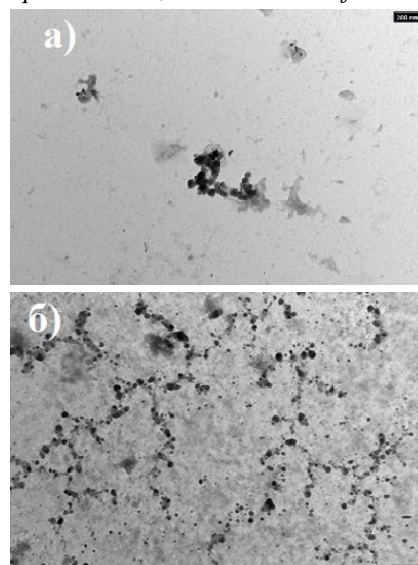


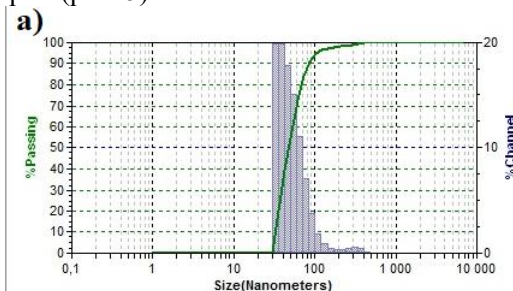
Рис. 4. ПЭМ изображение наночастиц серебра на основе: а) *Rhizobium pisi*, б) *Sinorhizobium fredii*

Кроме того, по данным микроскопии удалось проследить характерную форму наночастиц. Так, у наносеребра, синтезированного на основе *Rhizobium pisi*, наблюдается сферическая и неправильная форма, в то время как у *Sinorhizobium fredii* – форма шестигранника.

Сравнивая результаты сканирующей и просвечивающей микроскопии, можно сделать вывод о наличии у синтезированных наночастиц биологической оболочки. Это объясняется тем, что размеры частиц на СЭМ-снимках в среднем больше, чем размеры наночастиц на ПЭМ-снимках. Белковая оболочка образуется в процессе формирования ядра наночастицы. Данное явление, вероятно, происходит из-за природы металлических наночастиц, состоящих из гидрофильной и гидрофобной части. Белковые молекулы, находящиеся в клетках микроорганизмов, самопроизвольно присоединяются к зародышам частиц, образуя при этом наноструктуру ядро-оболочка.

ДРС (динамическое рассеяние света) анализ был выполнен методом лазерной дифракции с использованием лазерного анализатора Nanotrac Ultra 253 (Microtrac, США), основанного на методе динамического рассеяния света. Анализ осуществлялся в Центре коллективного пользования РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Методом ДРС были получены гистограммы и интегральные кривые распределения наночастиц по размерам (рис. 5).



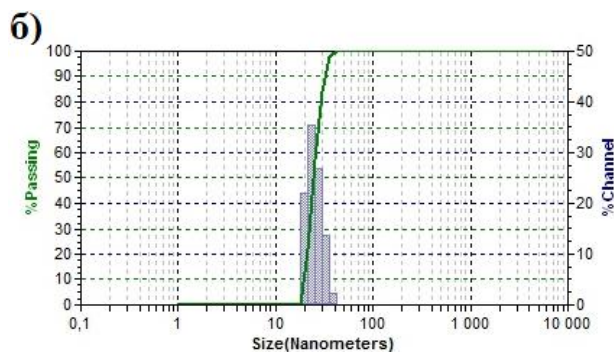


Рис. 5. Распределение наночастиц по размерам: а) полученных на основе *Rhizobium pisi*, б) полученных на основе *Sinorhizobium fredii*

Рисунок 5а демонстрирует, что размер частиц варьируется в интервале от 30 до 500 нм. Наибольшая часть частиц в образце имеет радиус от 30 до 60 нм. Из рисунка 5б следует, что разброс частиц по размерам значительно меньше – от 20 до 45 нм. Преобладают наночастицы размером 25-30 нм.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что бактерии *Rhizobium pisi* синтезируют наночастицы с большим разбросом размеров, а также в процессе

синтеза могут образовываться агломераты больших размеров. Кроме того, по результатам СЭМ анализа можно наблюдать похожую полидисперсность у наночастиц серебра, синтезированных с помощью *Rhizobium pisi*.

С другой стороны, наночастицы, полученные на основе *Sinorhizobium fredii* формируются с узким диапазоном размеров, что свидетельствует об их высокой монодисперсности.

Заключение

В результате проведенных исследований была подтверждена способность выбранных метилотрофных бактерий синтезировать наночастицы серебра. С помощью описанных в данном исследовании методов удалось установить такие характеристики, как средние размеры и форму полученных частиц.

Список литературы

1. Ahmad, S.; Munir, S.; Zeb, N.; Ullah, A.; Khan, B.; Ali, J.; Bilal, M.; Omer, M.; Alamzeb, M.; Salman, S. M.; Ali, S. Green Nanotechnology: A Review on Green Synthesis of Silver Nanoparticles — an Ecofriendly Approach. *International Journal of Nanomedicine* 2019, 14, 5087–5107. <https://doi.org/10.2147/IJN.S200254>.

УДК 579.64

Матвеева А.С., Махотин П.Д., Морозова Е.А., Шагаев А.А., Марквичёв Н.С.

Исследование антагонистической активности бактерий рода *Lactobacillus* spp. и *Leuconostoc* spp. по отношению к бактериям ризосферы корневой системы

Матвеева Анна Сергеевна¹, магистрант 1-го года обучения кафедры биотехнологии;
nyusha.matveeva.2002@mail.ru

Махотин Павел Дмитриевич, студент бакалавриата 4-го года обучения кафедры биотехнологии;

Морозова Екатерина Андреевна, аспирант 1-го года обучения кафедры биотехнологии;

Шагаев Антон Александрович, к.б.н., ассистент кафедры биотехнологии;

Марквичёв Николай Семёнович, к.т.н., доцент, доцент кафедры биотехнологии;

¹ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,
Россия, Москва, 125480, улица Героев Панфиловцев, дом 20.

В статье оценивалась антагонистическая активность молочнокислых микроорганизмов по отношению к представителям бактериальной ризосферной микрофлоры при различных условиях взаимодействия. В результате исследования было показано, что условия, при которых оценивалось взаимодействие микроорганизмов, влияют на проявление антагонистической активности молочнокислых бактерий.

Ключевые слова: ризосфера, антагонистическая активность, компоненты питания

Investigation of the antagonistic activity of bacteria of the genus *Lactobacillus* spp. and *Leuconostoc* spp. in relation to the bacteria of the rhizosphere of the root system

Matveeva A.S., Makhotin P.D., Morozova E.A., Shagaev A.A., Markvichev N.S.

D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article evaluated the antagonistic activity of lactic acid microorganisms in relation to representatives of bacterial rhizospheric microflora under various conditions of interaction. As a result of the study, it was shown that the conditions under which the interaction of microorganisms was evaluated affect the manifestation of the antagonistic activity of lactic acid bacteria.

Keywords: rhizosphere, antagonistic activity, nutritional component

Введение

Ризосфера представляет собой особый слой почвы, прилегающий к корням растения, в котором активно взаимодействуют корневая система и микроорганизмы. Ризосфера корня формируется за счет постоянного выделения экссудатов корнями растений [1]. Экссудаты – это низкомолекулярные и высокомолекулярные органические соединения, включающие сахара, продукты фотосинтеза и аминокислоты, которые служат питанием для микроорганизмов прикорневой зоны [2]. Микроорганизмы в ризосфере находятся в состоянии роста, активно метаболизируют экссудаты и выделяют различные метаболиты, а также взаимодействуют между собой [3]. В нормальных условиях, без воздействия стрессовых факторов, растения синтезируют и выделяют экссудаты. Однако при возникновении абиотических или биотических стрессов состав и интенсивность выделения экссудатов могут изменяться, что негативно влияет как на само растение, так и на микрофлору прикорневой зоны. Микроорганизмы ризосферы активно взаимодействуют между собой при недостатке компонентов питания.

Выделение экссудатов создает в ризосфере особый градиент концентрации питательных веществ, что привлекает различные микроорганизмы для колонизации субстрата. При этом важно отметить, что микроорганизмы могут поступать из внешней среды или развиваться непосредственно в ризосфере. Существует огромное количество ризосферных микроорганизмов. С точки зрения оценки фитосанитарного состояния почвы условно

выделяют три группы: факультативные паразиты, обязательные сапротрофы, постоянно присутствующие в почве, и обязательные паразиты [4].

Одной из ключевых задач современной биологической защиты растений является формирование благоприятного биоценоза в прикорневой зоне на начальных этапах проращивания растений [5]. Внесение благоприятной микрофлоры в прикорневую зону на ранних этапах развития для формирования фитоположительной микрофлоры положительно влияет на ростовые характеристики растения и помогает в случае различных абиотических и биотических стрессов. Таким образом, анализ и подбор микроорганизмов, которые можно использовать в системах защиты растений, – актуальная и важная задача. Не менее важной задачей является изменение уже сформировавшегося биоценоза, поэтому необходимы средства и способы влияния на биоценоз для снижения биотического стресса.

Молочнокислые бактерии – одна из широко распространенных в природе групп микроорганизмов. Основной средой их обитания является почва, где они в наибольшем количестве концентрируются в ризосфере дикорастущих и особенно культурных растений. Важной особенностью молочнокислых микроорганизмов является синтез различных органических кислот таких, как: молочная, уксусная, пропионовая и масляная [6]. Кислоты снижают pH, тем самым мешая развитию патогенной микрофлоры. Кроме того, многие молочнокислые микроорганизмы

вырабатывают бактериоцины – гетерогенные антибактериальные пептиды, разнообразные по уровню активности, спектру и механизму действия [7]. Известно, что по результатам многих исследований молочнокислые микроорганизмы, в особенности различные штаммы *Lactobacillus*, обладают способностью стимулировать рост растений за счет выработки различных фитогормонов [8].

Благодаря синтезу различных метаболитов молочнокислые микроорганизмы могут смещать ризосферное равновесие, которое возникает в прикорневой зоне растения. Поэтому исследование и оценка перспективности использования данных микроорганизмов для корректировки биоценоза прикорневой зоны является неотъемлемой задачей науки. Синтез активных метаболитов молочнокислых бактерий по отношению к ризосферным микроорганизмам происходит при метаболизме богатых питательных сред, содержащих высокую концентрацию углеводов, белка, органических и минеральных солей. Однако исследуемые микроорганизмы обитают в прикорневой зоне, где растения секретируют экссудаты. В этих условиях может наблюдаться недостаток компонентов питания, что может отразиться на проявлении антагонистических свойств.

В связи с этим целью данного исследования являлась оценка влияния условий взаимодействия на антагонистическую активность молочнокислых микроорганизмов в отношении бактерий ризосферы корневой системы. Задачами исследования являлись:

- оценка антагонистической активности культуральных жидкостей молочнокислых микроорганизмов по отношению к ризосферной микрофлоре стандартными методами;
- оценка антагонистической активности культуральных жидкостей молочнокислых микроорганизмов по отношению к ризосферной микрофлоре при развитии на среде при недостатке компонентов питания.

Экспериментальная часть

В ризосфере обитают микроорганизмы различного происхождения, вследствие чего их реакция на антимикробные вещества и метаболиты может существенно различаться. Так, на первом этапе исследования необходимо было оценить антагонистическую активность молочнокислых бактерий по отношению к ризосферным микроорганизмам различной природы в стандартных условиях. Обычно при оценке антагонистической активности стандартными методами используются питательные среды, богатые источниками углерода, азота, фосфора.

В качестве объектов исследования были выбраны три ризосферных микроорганизма: *Lactobacillus plantarum* B1101, *Lactobacillus paracasei* B1105, и *Leuconostoc citreum* B1198, которые ранее были выделены из ризосферы огурца. Тест-объектами были выбраны представители фитопатогенной микрофлоры – *Rhizobium radiobacter* B2206 (вид

грамотрицательных палочковидных почвенных бактерий; вызывает образование корончатых галлов у растений), *Clavibacter michiganensis* B2226 (грамположительные бактерии; вызывает бактериальный рак), а также агенты биологического контроля – *Pseudomonas fluorescens* B1015 (грамотрицательная палочковидная бактерия; стимулирует рост растения за счет выработки фитогормонов), *Streptomyces rimosus* B1204 (почвенные бактерии из семейства актиномицетов; синтезируют метаболиты бактерицидной и фунгицидной природы).

Для проведения исследования предварительно глубоко в анаэробных условиях культивировали молочнокислые бактерии в колбах Эрленмейера с жидкой питательной средой MRS (гидролизат казеина – 10,00 г/л; пептон – 10,00 г/л; дрожжевой экстракт (ДЭ) – 5,00 г/л; глюкоза – 20,00 г/л; $\text{CH}_3\text{COONa} \times 3\text{H}_2\text{O}$ – 5 г/л; цитрат аммония – 2,00 г/л; твин – 1,00 г/л; $\text{K}_2\text{HPO}_4 \times 3\text{H}_2\text{O}$ – 2,00 г/л; $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,20 г/л; $\text{MnSO}_4 \times 4\text{H}_2\text{O}$ – 0,05 г/л; водопроводная вода – 1 л), объемом по 100 мл. *Lactobacillus plantarum* B1101 и *Lactobacillus paracasei* B1105 культивировали 48 ч при 37°C, *Leuconostoc citreum* B1198 культивировали 48 ч при 37°C по достижении концентрации клеток молочнокислых бактерий 10^9 КОЕ/мл.

Антагонистическую активность лактобактерий исследовали с помощью метода диффузии из лунок агара. Состав агаризованной среды L-агар: глюкоза – 20,00 г/л; дрожжевой экстракт (ДЭ) – 5,00 г/л; пептон – 10,00 г/л; NaCl – 2,00 г/л; бактериологический агар – 18,00 г/л; водопроводная вода – 1 л. Поверхность агаризованной среды с вырезанными лунками засеивали тест-объектами. Затем в лунки помещали 200 мкл культуральных жидкостей глубинных культур молочнокислых бактерий, в контрольные лунки помещали 200 мкл антибиотика в концентрации 500 мг/л (для грамотрицательных культур использовали стептомицина сульфат, для грамположительных – бицилин активностью 1500000 ЕД). Далее Чашки Петри помещали в термостат для инкубации при температуре 28°C, инкубацию проводили в течение 24 часов. По окончании инкубации оценивали проявление антагонистической активности молочнокислых микроорганизмов по отношению к различным представителям ризосферной микрофлоры. Результаты исследования представлены в таблице 1.



Рис. 1. Проявление антагонистической активности *L. plantarum* B1101 по отношению к представителям бактериальной ризосферной микрофлоры (А – *R. radiobacter* B2206; Б – *C. michiganensis* B2226; В – *P. fluorescens* B1015) в стандартных условиях

Таблица 1. Результаты исследования антагонистической активности молочнокислых бактерий по отношению к представителям бактериальной ризосферной микрофлоры при развитии в стандартных условиях

Тест-объект	<i>Rhizobium radiobacter</i> B2206		<i>Clavibacter michiganensis</i> B2226		<i>Pseudomonas fluorescens</i> B1015		<i>Streptomyces rimosus</i> B1204		радиус зон просветления вокруг лунок, мм
Исследуемый микроорганизм	Контроль	Культуральная жидкость	Контроль	Культуральная жидкость	Контроль	Культуральная жидкость	Контроль	Культуральная жидкость	
<i>L. planatum</i> B1101	8±0,5	9±0,5	13±0,5	10±0,5	13±0,5	12±0,5	4±0,5	12±0,5	
<i>L. paracasei</i> B1105	7±0,5	11±0,5	12±0,5	9±0,5	13±0,5	9±0,5	4±0,5	11±0,5	
<i>Leuconostoc citreum</i> B1198	7±0,5	8±0,5	12±0,5	8±0,5	12±0,5	8±0,5	5±0,5	10±0,5	

Из данных, представленных в таблице 1, можно заметить, что культуральная жидкость молочнокислых бактерий проявляет бактерицидную активность, соизмеримую с антибиотиком в высокой концентрации. Так, молочнокислые бактерии обладают достаточно высокой антагонистической активностью по отношению ко всем исследуемым группам ризосферных бактерий при проведении исследования в стандартных условиях в отсутствие недостатка компонентов питания (рис. 1.). Однако исследуемые микроорганизмы обитают в прикорневой зоне, где растения секретируют экссудаты. В этих условиях может наблюдаться недостаток компонентов питания, что может отразиться на проявлении антагонистических свойств. В связи с этим дальнейшую оценку активности необходимо проводить при недостатке компонентов питания.

Ранее было показано, что при развитии микроорганизмы могут обладать разными свойствами при развитии на богатых средах и при недостатке компонентов питания [9]. Так, на следующем этапе исследования необходимо было оценить влияние условий взаимодействия на проявление антагонистического действия молочнокислых

микроорганизмов по отношению к ризосферным микроорганизмам различной природы при недостатке компонентов питания.

Для проведения исследования предварительно глубоко в анаэробных условиях культивировали молочнокислые бактерии в колбах Эрленмейера с жидкой питательной средой, моделирующей экссудаты корневой системы (яблочная кислота – 0,10 г/л; янтарная кислота – 0,10 г/л; лимонная кислота – 0,10 г/л; фруктоза – 0,10 г/л; дрожжевой экстракт (ДЭ) – 0,01 г/л; водопроводная вода – 1 л) [10]. *Lactobacillus plantarum* B1101 и *Lactobacillus paracasei* B1105 культивировали 24 ч при 37°C, *Leuconostoc citreum* B1198 культивировали 24 ч при 37°C по достижении концентрации клеток молочнокислых бактерий 10⁶ КОЕ/мл.

Для оценки антагонистического действия был использован метод диффузии из лунок агар, но качестве агаризованной питательной среды была использована модель экссудатов растений. Далее оценивали проявление антагонистической активности молочнокислых микроорганизмов по отношению к различным представителям ризосферной микрофлоры. Результаты исследования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты исследования антагонистической активности молочнокислых бактерий по отношению к представителям бактериальной ризосферной микрофлоры при недостатке компонентов питания

Тест-объект	<i>Rhizobium radiobacter</i> B2206		<i>Clavibacter michiganensis</i> B2226		<i>Pseudomonas fluorescens</i> B1015		<i>Streptomyces rimosus</i> B1204		радиус зон просветления вокруг лунок, мм
Исследуемый микроорганизм	Контроль	Культуральная жидкость	Контроль	Культуральная жидкость	Контроль	Культуральная жидкость	Контроль	Культуральная жидкость	
<i>L. planatum</i> B1101	11±0,5	0	9±0,5	0	14±0,5	0	6±0,5	0	
<i>L. paracasei</i> B1105	11±0,5	0	10±0,5	0	14±0,5	0	5±0,5	0	
<i>Leuconostoc citreum</i> B1198	11±0,5	0	10±0,5	0	15±0,5	0	6±0,5	0	

В результате оценки антагонистической активности молочнокислых бактерий по отношению к ризосферным микроорганизмам видимой зоны просветления (зоны задержки роста) вокруг лунок с культуральной жидкостью молочнокислых микроорганизмов не отмечалось (табл. 2.). Однако микроорганизмы, скорее всего, взаимодействуют между собой, но охарактеризовать это взаимодействие данным методом не представляется возможным.

В условиях применения молочнокислых бактерий для смещения равновесия используется следующая система. Микроорганизмы, находящиеся в ризосфере, развиваются в естественных условиях при недостатке компонентов питания, а внесение препаратов, содержащих молочнокислые бактерии, подразумевает предварительное культивирование на богатой питательной среде для накопления метаболитов. В связи с этим на следующем этапе необходимо было

оценить антагонистическую активность молочнокислых микроорганизмов в отношении ризосферных бактерий при взаимодействии на среде с недостатком компонентов питания, в случае когда молочнокислые микроорганизмы предварительно культивировали на богатой питательной среде.

Для проведения исследования предварительно культивировали молочнокислые бактерии в колбах Эрленмейера с жидкой питательной средой MRS. Антагонистическую активность лактобактерий исследовали с помощью метода диффузии из лунок агара. В качестве агаризованной питательной среды была использована модель экссудатов растений. Далее оценивали проявление антагонистической активности молочнокислых микроорганизмов по отношению к различным представителям ризосферной микрофлоры. Результаты исследования представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты исследования антагонистической активности молочнокислых бактерий по отношению к представителям бактериальной ризосферной микрофлоры при развитии при недостатке компонентов питания

Тест-объект	<i>Rhizobium radiobacter</i> B2206		<i>Clavibacter michiganensis</i> B2226		<i>Pseudomonas fluorescens</i> B1015		<i>Streptomyces rimosus</i> B1204		радиус зон просветления вокруг лунок, мм
Исследуемый микроорганизм	Контроль	Культуральная жидкость	Контроль	Культуральная жидкость	Контроль	Культуральная жидкость	Контроль	Культуральная жидкость	
<i>L. planatum</i> B1101	10±0,5	11±0,5	9±0,5	12±0,5	10±0,5	13±0,5	5±0,5	13±0,5	
<i>L. paracasei</i> B1105	8±0,5	12±0,5	11±0,5	12±0,5	14±0,5	13±0,5	5±0,5	12±0,5	
<i>Leuconostoc citreum</i> B1198	9±0,5	10±0,5	10±0,5	11±0,5	12±0,5	10±0,5	4±0,5	10±0,5	

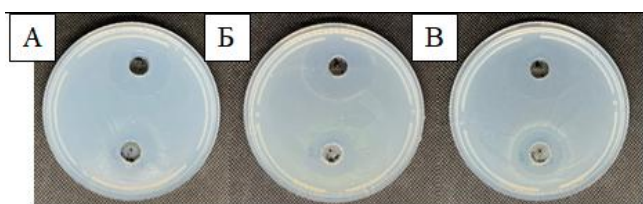


Рис. 2. Проявление антагонистической активности *L. planatum* B1101 по отношению к представителям бактериальной ризосферной микрофлоры (А – *R. radiobacter* B2206; Б – *C. michiganensis* B2226; В – *P. fluorescens* B1015) при недостатке компонентов питания

Из данных, представленных в таблице 3, можно заметить, что исследуемые штаммы молочнокислых микроорганизмов проявляют достаточно высокую антагонистическую активность по отношению к представителям бактериальной ризосферной микрофлоры (рис. 2.). При этом антагонистическая активность молочнокислых микроорганизмов по отношению к представителям грамотрицательной ризосферной микрофлоры выше в среднем на 20-45%,

грамположительной – 15-33% в сравнении с результатами оценки антагонистической активности, когда микроорганизмы развивались на богатой питательной среде.

Заключение

В ходе исследования была оценена антагонистическая активность молочнокислых бактерий в отношении ризосферных микроорганизмов при различных условиях взаимодействия. Было установлено, что условия проведения эксперимента оказывают влияние на проявление антагонистической активности молочнокислыми бактериями. Так, при взаимодействии микроорганизмов на богатой питательной среде, молочнокислые бактерии проявляют достаточно высокую антагонистическую активность по отношению к представителям бактериальной ризосферной микрофлоры. Однако при взаимодействии микроорганизмов при метаболизме экссудатов растений, когда исследуемые микроорганизмы и тест-объекты развивались при недостатке компонентов питания, видимой зоны

задержки роста вокруг лунок с культуральной жидкостью молочнокислых микроорганизмов не отмечалось. Как видно из результатов исследования, взаимодействие микроорганизмов при недостатке компонентов питания отличается от взаимодействия микроорганизмов на богатых питательных средах. В связи с этим исследование и оценку взаимодействия микроорганизмов целесообразно проводить в приближенных к ризосфере условиях.

Список литературы

1. Mueller C., Carsten W. From rhizosphere to detritosphere – Soil structure formation driven by plant roots and the interactions with soil biota //Soil Biology and Biochemistry. – 2024. – С. 109396.
2. Chai Y. N., Schachtman D. P. Root exudates impact plant performance under abiotic stress //Trends in Plant Science. – 2022. – Т. 27. – №. 1. – С. 80-91.
3. Феоктистова Н. В. и др. Ризосферные бактерии //Ученые записки Казанского университета. Серия естественные науки. – 2016. – Т. 158. – №. 2. – С. 207-224.
4. Каблова М. А., Шурхно Р. А., Сироткин А. С. Молочнокислые бактерии в сельскохозяйственном производстве //Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – №. 23. – С. 145-149.
5. Ali S., Tyagi A., Park S. Deciphering the plant microbiome to improve drought tolerance: mechanisms and perspectives //Environmental and Experimental Botany. – 2022. – Т. 201. – С. 104933.
6. Guimarães A. Anti-aflatoxigenic effect of organic acids produced by *Lactobacillus plantarum* //International journal of food microbiology. – 2018. – Т. 264. – С. 31-38.
7. Стоянова Л. Г., Устюгова Е. А., Нетрусов А. И. Антимикробные метаболиты молочнокислых бактерий: разнообразие и свойства //Прикладная биохимия и микробиология. – 2012. – Т. 48. – №. 3. – С. 259-259.
8. Murindangabo Y. T. et al. Prominent use of lactic acid bacteria in soil-plant systems //Applied Soil Ecology. – 2023. – Т. 189. – С. 104955.
9. Shagaev A., Behbudzada N., Zhuravleva A. Cultivation of fungi crops on hollow cellulose tubes as a model of the root system of a plant / Z.A. Shagaev A., Behbudzada N. // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020, NANO, BIO and green – Technologies for a sustainable future. - Pensoft, 2020. – С. 87-96.
10. Шагаев А. А. и др. Исследование роста *Trichoderma viride* и *Fusarium oxysporum* на твердых микробиологических средах, содержащих экссудаты растений огурца //Успехи в химии и химической технологии. – 2016. – Т. 30. – №. 9 (178). – С. 39-41.

УДК 579.66; 579.841.42; 636.087.7

Мельник М.Д., Сачавский А.А., Юрков Д.А., Яковлева Е.А., Суясов Н.А.

Влияние источников азота на накопление углеводов микробным сообществом на основе метанотрофных бактерий

Мельник Максим Денисович, студент 1 курса магистратуры факультета биотехнологии и промышленной экологии; luckyklever@gmail.com

Сачавский Александр Александрович, аспирант факультета биотехнологии и промышленной экологии;

Юрков Дмитрий Александрович, студент 3 курса бакалавриата факультета биотехнологии и промышленной экологии;

Яковлева Екатерина Алексеевна, студентка 4 курса бакалавриата факультета биотехнологии и промышленной экологии;

Суясов Николай Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры биотехнологии;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В настоящей работе представлены результаты исследований влияния различных источников азота на синтез экзополисахаридов сообществом метаноокисляющих бактерий на основе *Methylococcus capsulatus*. Было установлено, что наибольшая скорость роста и наибольший удельный выход экзополисахаридов наблюдался при использовании нитрата аммония в качестве источника азота и составил 0,107 г/л. А наибольший выход экзополисахаридов по отношению к сухой биомассе клеток был в среде, содержащей NaNO_3 - 0,136 г/г. Также исследовано влияние источников азота на состав микробного сообщества.*

*Ключевые слова: метанотрофные бактерии, метаноокисляющие бактерии, *methylococcus capsulatus*, экзополисахариды*

The effect of nitrogen sources on the accumulation of carbohydrates by a microbial community based on methanotrophic bacteria

Melnik M.D., Sachavsky A.A., Yurkov D.A., Yakovleva E.A., Suyasov N. A.

D. Mendelev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

*This paper presents the results of studies of the effect of various nitrogen sources on the synthesis of exopolysaccharides by a community of methane-oxidizing bacteria based on *Methylococcus capsulatus*. It was found that the highest growth rate and the highest specific yield of exopolysaccharides were observed when using ammonium nitrate as a nitrogen source and amounted to 0.107 g/L. And the highest yield of exopolysaccharides relative to the dry biomass of cells was in a medium containing NaNO_3 - 0.136 g/g. The influence of nitrogen sources on the composition of the microbial community has also been investigated.*

*Keywords: methanotrophic bacteria, methane-oxidizing bacteria, *methylococcus capsulatus*, exopolysaccharides*

Введение

етаноокисляющие бактерии – группа метилотрофных микроорганизмов, способных метаболизировать метан и использовать его в качестве единственного источника углерода и энергии. Доступность и распространённость метана делает его использование интересным как источник сырья микробиологического производства. Деятельность метанотрофных бактерий позволяет снизить выбросы метана, который является газом с сильным парниковым эффектом (в 80 раз превышающий углекислый газ), и чья концентрация за последние два столетия увеличилась почти вдвое из-за антропогенного действия. Благодаря своим уникальным свойствам, метаноокисляющие бактерии могут использоваться в производстве различных ценных продуктов. К ним относят: кормовой белок, биополимеры, компоненты для применения в нанотехнологиях, растворимые метаболиты, органические кислоты, эктоин, липиды и витамин B₁₂ [1].

Особый интерес для современной биотехнологии могут представлять микробные экзополисахариды, образующие слизи и капсулы вокруг клеток, используемые в промышленности как компоненты буровых растворов и гидрогелей, аналоги ксантана,

кормовые добавки, биосорбенты тяжелых металлов и вспомогательные вещества для доставки лекарственных средств [2] [3]. Коллоидные и адгезивные свойства ЭПС, а также их влияние на реологию системы нашло своё применение в пищевой, фармацевтической и нефтяной промышленности [4]. Хотя свойства и количество экзополисахаридов, производимых микроорганизмами, определяются их генетическими характеристиками, они сильно зависят от условий окружающей среды и процесса культивирования. Условия ферментации играют важную роль в формировании структуры, состава и вязкости микробиологических полисахаридов. На формирование экзополисахаридов у метанотрофов оказывает сильное влияние соотношение углерода относительно кислорода и азота.

Наличие источников азота в среде является необходимым для роста микроорганизмов. Метаноокисляющие микроорганизмы усваивают азот в форме нитратов и солей аммония. Однако при недостатке этих источников азота данные бактерии способны переходить к процессу азотфиксации [5]. Причём стоит отметить, что процесс фиксации азота клетками хоть и является менее затратным с точки зрения использования ресурсов человеком, он крайне

энергозатратен для клетки. В работе Ruo He [6] было показано, что процесс азотфиксации не только замедляет рост и развитие микроорганизмов, но и одновременно с этим способствует повышенному синтезу ЭПС клетками в пересчёте на сухой вес. Рост метанокисляющих бактерий на средах, содержащих ионы аммония менее трудоёмок для клеток, однако NH_4^+ ионы ингибируют работу ряда ферментов, что может негативно повлиять на выделение ЭПС [7]. Таким образом, целью данной работы являлось изучение влияния источников азота на накопление углеводов метанокисляющими микроорганизмами.

Экспериментальная часть

В качестве исследуемой культуры были взяты пробы сообщества микроорганизмов, выделенных из почвы, добытой на полуострове Ямал, содержащие метанокисляющую бактерию *Methylococcus capsulatus*, способную к синтезу внеклеточных полисахаридов.

Клетки культивировались на протяжении 6 суток (в 5 повторях). Далее из колб брались пробы для определения ОП, уровня ЭПС в среде и АСВ. Культивирование происходило при температуре 38°C в качалочных колбах, содержащих среду следующего состава (мг/л): $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 10, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 10,75, $\text{MnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 9,5, H_3BO_3 – 6,25, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 1,5, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 0,25, $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,25, $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 1,0, KCl – 125, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 105. Рост клеток происходил в обновляемой ежедневно метано-воздушной среде с соотношением 1:3 соответственно.

Метан являлся единственным источником углерода в среде. В качестве источников азота использовались среды различного состава: 1) не содержащая источников азота (кроме азота воздуха); 2) содержащая NH_4NO_3 – 0,5 г/л; 3) содержащая KNO_3 – 0,5 г/л; 4) содержащая NaNO_3 – 0,5 г/л. Концентрацию экзополисахаридов в исследуемых образцах определяли фенол-сернокислотным методом [8]. Приведённые ниже данные представляют собой средние показатели полученных исследуемых значений.

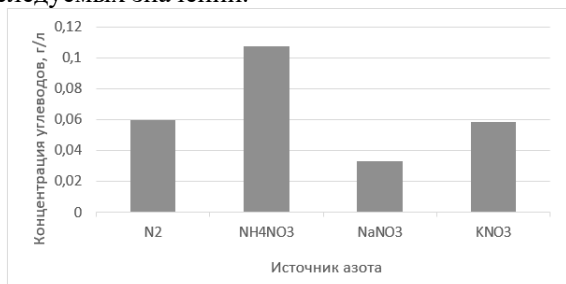


Рис. 1. Влияние источников азота на концентрацию углеводов в среде

Исходя из данных, приведенных на рисунке 1 видно, что наибольшая концентрация углеводов оказалась в среде, содержащей NH_4NO_3 (0,107 г/л), сильно превышая значения в остальных средах, что объясняется наибольшей скоростью роста микроорганизмов в среде, содержащей одновременно и NH_4^+ , и NO_3^- – легко усваиваемые источники азота. В среде, содержащей только азот воздуха, и в среде, содержащей KNO_3 выход углеводов оказался близким

по своим значениям. Наименьший выход наблюдался при культивировании в среде, содержащей NaNO_3 , что является следствием меньшего роста клеток из-за ингибирования высокими концентрациями Na^+ ионов.

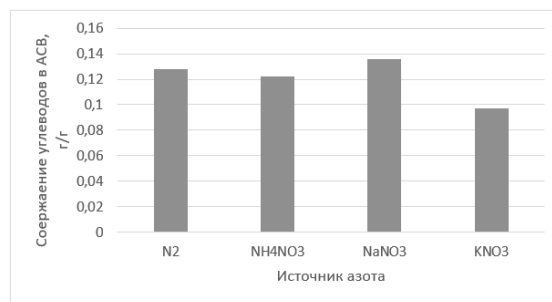


Рис. 2. Влияние источников азота на долю углеводов в АСВ

Данные, приведенные на рисунке 2 иллюстрируют, что не смотря на наибольшие показатели концентрации экзополисахаридов в NH_4NO_3 -среде, наибольшее содержание углеводов в АСВ (0,136 г/г) было в культуре, использующей NaNO_3 как источник азота. Это может быть связано с защитными свойствами экзополисахаридов, выделяемых в ответ на высокие концентрации ионов Na^+ [9]. Аналогично наблюдается высокое содержание ЭПС по отношению к сухой биомассе для среды, содержащей азот воздуха как единственный источник азота, что согласуется с литературными данными о повышении выхода экзополисахаридов метанокисляющими бактериями в процессе фиксации азота.

Приведенные в таблице 1 данные, показывают прямую взаимосвязь между скоростью роста культуры микроорганизмов и концентрацией накопленных углеводов. Наибольшая концентрация углеводов (в среднем 0,107 г/л) наблюдалась при культивировании в среде, содержащей нитрат аммония, достигая максимального значения в 0,128 г/л. Культура, растущая в присутствии NaNO_3 , хоть и давала наибольший выход углеводов в 0,136 г на 1 г сухой биомассы, при этом развивалась почти в 2 раза медленнее остальных культур, что может быть не оптимально при промышленном культивировании.

Таблица 1. Влияние источников азота на культивирование метанотрофов

Источник азота	ОП, у.е.	μ , ч ⁻¹	С _{углеводов} , г/л	С _{углеводов} : АСВ
N ₂	0,134	0,0191	0,059	0,128
NH ₄ NO ₃	0,289	0,0215	0,107	0,122
KNO ₃	0,170	0,0200	0,057	0,097
NaNO ₃	0,070	0,0117	0,03	0,136

Изменение состава среды влияет не только на выход ЭПС, но и на структуру микробного сообщества. На приведенных микрофотографиях (рисунок 3) видно изменение состава сопутствующих бактерий-спутников. В среде, предназначенной для азотфиксации, доминируют в основном спутники-кокки, размером клетки порядка 0,5-1 мкм. Среда,

содержащие нитраты аммония и калия, имеют схожую структуру спутников палочковидной формы длиной не более 2 мкм. В среде с нитратом натрия сопутствующие спутники имеют форму толстых палочек с размерами клеток $2 \times 0,5$ мкм.

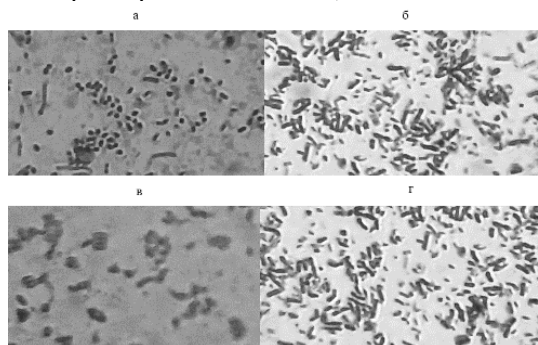


Рис. 3. Влияние источников азота на состав микробного сообщества. а – N_2 , б – NH_4NO_3 , в – $NaNO_3$, г – KNO_3

Заключение

Таким образом, в результате проведенной работы было исследовано влияние различных источников азота на синтез углеводов метанотрофными бактериями и установлено, что несмотря на свои ингибирующие свойства, наибольший выход углеводов оказался в среде, содержащей NH_4NO_3 – 0,107 г/л. Однако наибольшее содержание углеводов в абсолютном сухом весе оказалось в среде, содержащей $NaNO_3$ – 0,136 г/г. Также было проиллюстрировано влияние источников азота на состав микробного сообщества. Полученные данные могут иметь важное практическое применение для оптимизации микробиологического производства с целью промышленного получения микробных экзополисахаридов на основе сообщества, содержащего метанотрофные бактерии.

Список литературы

1. Strong P. J., Xie S., Clarke W. P. Methane as a resource: can the methanotrophs add value? //Environmental science & technology. – 2015. – Т. 49. – №. 7. – С. 4001-4018.
2. Nwodo U. U., Green E., Okoh A. I. Bacterial exopolysaccharides: functionality and prospects //International journal of molecular sciences. – 2012. – Т. 13. – №. 11. – С. 14002-14015.
3. Andhare P. et al. Microbial exopolysaccharides: advances in applications and future prospects //Biotechnology. – 2014. – Т. 3. – №. July 2015. – С. 25.
4. Cantera Ruiz de Pellón S. et al. Multi-production of high added market value metabolites from diluted methane emissions via methanotrophic extremophiles. – 2018.
5. Auman A. J., Speake C. C., Lidstrom M. E. nifH sequences and nitrogen fixation in type I and type II methanotrophs //Applied and Environmental Microbiology. – 2001. – Т. 67. – №. 9. – С. 4009-4016.
6. He R. et al. Response of methanotrophic activity to extracellular polymeric substance production and its influencing factors //Waste Management. – 2017. – Т. 69. – С. 289-297.
7. Dunfield P., Knowles R. Kinetics of inhibition of methane oxidation by nitrate, nitrite, and ammonium in a humisol //Applied and environmental microbiology. – 1995. – Т. 61. – №. 8. – С. 3129-3135.
8. Dubois M., Gilles K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A. Colorimetric method for the determination of sugars and related substances // Analyt. Chem. 1983. V. 28. P. 350–356.
9. Kolesnikov O. M., Panikov N. S. Salt inhibition of methanotrophic activity in sphagnum peat //Eurasian Soil Science. – 2005. – Т. 38. – №. 4. – С. 419-424.

УДК 658.567.1

Михрабов А.И., Тихонова И.О.

Критериальная оценка потенциала формирования экотехнопарка в промышленном кластере

Михрабов Александр Ильич – аспирант группы АС-111; mixrabovs@mail.ru .

Тихонова Ирина Олеговна – к.т.н., доцент кафедры промышленной экологии;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В статье рассмотрены экотехнопарки как центры по утилизации промышленных отходов, образованных при производственной деятельности предприятий, расположенных в промышленных кластерах. Рассмотрен метод анализа иерархий как способ оценки потенциала формирования экотехнопарка в промышленном кластере. Приведены критерии и подкритерии, необходимые для полноценного анализа альтернатив при создании экотехнопарка.

Ключевые слова: экотехнопарк, промышленные отходы, утилизация отходов, промышленный кластер

A critical assessment of the potential for the formation of an ecotechnopark in an industrial cluster

Mikhrabov A.I., Tikhonova I.O.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article considers ecotechnoparks as centers for the disposal of industrial waste generated during the production activities of enterprises located in industrial clusters. The method of hierarchy analysis is considered as a way to assess the potential for the formation of an ecotechnopark in an industrial cluster. The criteria and subcriteria necessary for a full-fledged analysis of alternatives when creating an ecotechnopark are presented.

Key words: ecotechnopark, industrial waste, waste disposal, industrial cluster

В соответствии со стратегией развития промышленности по обращению с отходами в Российской Федерации к 2030 году планируется ввести в эксплуатацию 70 экотехнопарков, которые будут представлять собой центры по утилизации отходов с применением наилучших доступных технологий [1]. В настоящий момент ППК РЭО активно реализует свою программы по строительству экотехнопарков в различных регионах как центров по утилизации ТКО, для максимально вовлечения вторичных ресурсов, образованных населением, в производственный цикл. На данный момент идут активные обсуждения по созданию экотехнопарков, специализирующихся на утилизации промышленных отходов, проблема эффективной утилизации которых до сих пор до конца не решена [2].

В 2023 году количество образованных отходов увеличилось по сравнению с прошлым годом на 3% и составило 9,3 млрд. тонн, из которых 98 % пришлось на отходы промышленных предприятий [3]. Тенденция по ежегодному росту количества отходов наблюдается на протяжении последних нескольких лет и превалирующее большинство приходится на промышленные отходы что говорит о необходимости создания центров по их утилизации.

На территории Российской Федерации сложились устойчивые промышленные центры – кластеры, промышленные узлы – которые объединяют на промплощадке крупные производства, зачастую одного сектора экономики, благодаря чему, обладающие высоким потенциалом для реализации экотехнопарков по утилизации промышленных отходов [4]. Однако, прежде чем говорить о создании экотехнопарка в каком-либо промышленном центре необходимо провести отраслевое исследование для определения перечня основных групп отходов,

пригодных к утилизации, потенциала их использовании в качестве вторичных материальных или энергетических ресурсов, а также обозначить перспективные технологии утилизации.

Полученные в результате исследования данные необходимо проанализировать для итогового вердикта. Для этого следует использовать метод аналитического иерархического процесса (Analytic Hierarchy Process, АНР), применяемого при выборе технологий обращения с отходами. Метод АНР представляет собой метод ранжирования множества альтернатив, когда в процессе принятия решений присутствует несколько критериев и подкритериев, представленных в виде иерархической структуры, на каждом этапе (уровне) которой проводят попарные сравнения для расчета их веса [5]. В ходе попарного сравнения в диапазоне от 1 (равный) до 9 (принципиально лучше) определяют значимость каждого критерия (подкритерия) и соответствующий весовой коэффициент [6]. Полученные весовые коэффициенты демонстрируют иерархию значимости критериев, что позволяет выявить наиболее значимые аспекты, требующие большего внимания, после чего обоснованно оценить перспективы создания экотехнопарка в конкретном промышленном центре.

С учетом государственной политики в области охраны окружающей среды и экономического развития для определения потенциала реализации экотехнопарка предлагается применять три универсальных критерия, зависящих друг от друга, рассматривающих его эффективность на протяжении всего жизненного цикла: экономический, экологический и технологический критерий. Для каждого критерия подобраны свои подкритерии, охватывающие наиболее значимые его аспекты. Подкритерии имеют собственные количественные критерии, измеряющиеся в конкретных единицах

измерения, что позволяет определить значимость критерия значительно эффективней. Данные для количественных критериев получают на основании результатов проведенного отраслевого исследования.

Экономический критерий позволяет оценить перспективы создания экотехнопарка с точки зрения рентабельности и отказаться от реализации убыточного производства уже на стадии предпроектной подготовки. Для оценки вводятся четыре подкритерия представляющих собой основные статьи доходов и расходов предприятия. Ключевое внимание уделяется статьям расходов, особенно инвестиционным, на которые приходится основная доля всех затрат, в то время как оставшиеся подкритерии определяют финансовый баланс на период эксплуатации предприятия. Для того, чтобы грамотно оценить значимость подкритериев, следует для каждого ввести собственные количественные критерии, приведенные в рублях на единицу чего-либо (рис. 1). Данный подход позволяет оперировать реальными суммами, что в свою очередь приводит к упрощению выявления наиболее значимого аспекта.

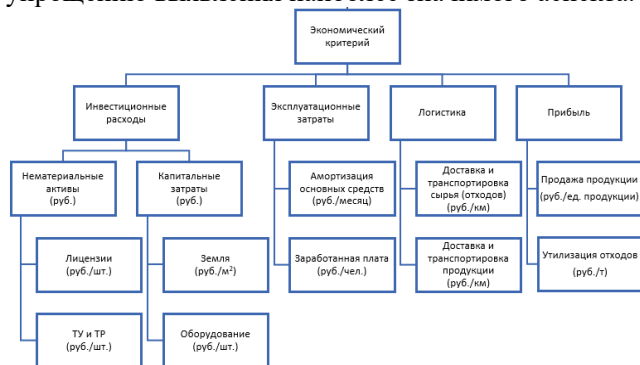


Рис.1. Иерархия экономического критерия

Экологический критерий рассматривает степень воздействие экотехнопарка на окружающую среду и позволяет на стадии планирования отказаться от технологий или совокупности технологических решения, реализация которых приведет к превышению установленных в нормативно-правовых актах (НПА) значений. Для оценки воздействия вводятся два подкритерия, комплексно охватывающие основные виды негативного воздействия от предприятия. Эмиссии позволяют оценить соответствие качества и количества выбросов и сбросов нормативным величинам, а вторичные отходы необходимо рассматривать в контексте реализации стратегии по развитию отрасли ППО и оценки эффективности производственной деятельности экотехнопарка. Количественные критерии определяются на основании результатов предварительных расчетов предусматриваемых технологий, при этом большая роль в оценке экологической эффективности будет отводиться соотношению массе утилизируемых и образованных отходов, поскольку это определяет эффективность планируемых к реализации технологических решений (рис. 2).

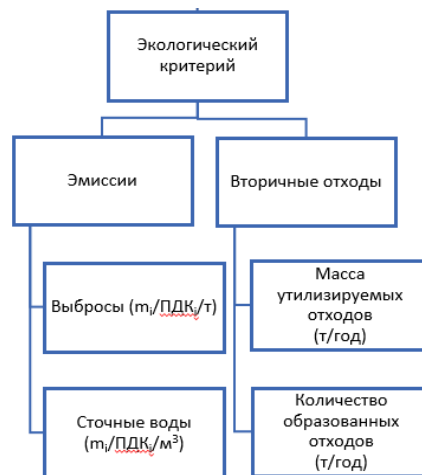


Рис.2. Иерархия экологического критерия

Технологический критерий необходим для оценки эффективности предлагаемых технологических решений. Предлагаемую технологию следует рассматривать с помощью двух подкритериев, отвечающих современным запросам устойчивого производства, а именно соответствие концепции наилучших доступных технологий (НДТ) и ресурсная эффективность [6]. Соответствие НДТ является безальтернативным подкритерием для объектов по утилизации отходов и единственным количественным критерием к нему будет количество лет для внедрения технологии в эксплуатацию [7]. Ресурсную эффективность следует рассматривать при помощи двух количественных критериев: количество применяемых технологий и количество видов утилизируемых отходов (рис. 3). Их соотношение будет играть ключевую роль и приоритет нужно отдавать технологиям, способным утилизировать как можно больше видов отходов на одной технологической установке.

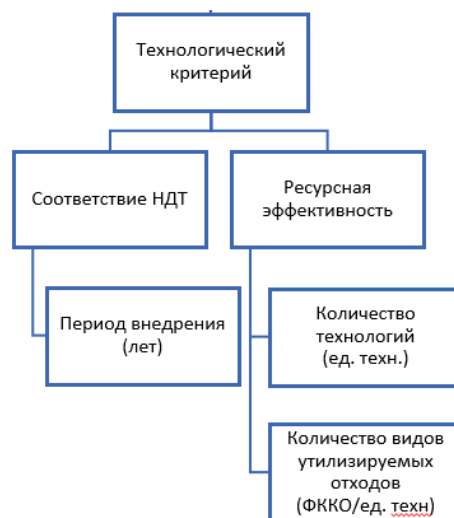


Рис.3. Иерархия технологического критерия

Приведенную трехуровневую иерархическую систему принятия решений следует использовать для оценки альтернатив создания экотехнопарка. На первом уровне расположено три группы критериев, влияющих на принятие решения: экономический,

экологический и технологический. Второй уровень представляет собой разбиение каждой группы критериев на подкритерии, а на третьем уровне подкритерии дополнительно разбиты на количественные критерии. В качестве альтернатив следует рассматривать четыре варианта: обособленные утилизаторы, экотехнопарк по утилизации малотоннажных отходов, экотехнопарк по утилизации многотоннажных отходов и экотехнопарк. Для каждого варианта критерии попарно сравниваются в рамках каждого аспекта. В сравнении выбирается лучший вариант и интенсивность в диапазоне от 1 до 9. На основании результатов разрабатываются модели взвешивания для отображения результатов [4].

Таким образом, использование метода АНР позволяет при помощи метода ранжирования множества альтернатив, представленных в виде иерархической структуры, определить потенциал формирования экотехнопарка в промышленном кластере. Для этого предлагается использовать трехуровневую иерархическую систему принятия решений с приведенными критериями, позволяющую в полном объеме оценить различные аспекты и сравнить альтернативы. Такой подход позволит на основе данных отраслевого исследования сделать достоверный анализ потенциала формирования экотехнопарка.

Список литературы

1. Российская Федерация. Распоряжение. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ от 25 января 2018 г. №84-р. – Москва, 2018 – 59 с.
2. Создание экотехнопарков – рациональный путь к развитию отрасли комплексной переработки отходов и использования вторичных ресурсов / Д.О. Скобелев, В.А. Марьев, Г.Г. Потапов и др. // Экология промышленного производства. 2018. № 2 (102). С. 7-21.
3. Информация об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, размещении отходов производства и потребления. Отчет по форме 2-ТП (отходы) [Электронный ресурс]. – URL: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/> (дата обращения: 11.05.2025).
3. Оценка перспектив формирования экотехнопарка в Нижнекамском промышленном узле / И. О. Тихонова, Е. М. Данилова, В. А. Марьев, Е. М. Аверочкин С. 45–51. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-4-045-051 // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С.45-51.
- 4 Эколого-экономическое обоснование принятия решений при выборе технологий термической утилизации отходов с учетом ранжирования критериев устойчивости / О. И. Сергиенко, А. И. Нечепуренко, Ю. А. Рахманов, В. Л. Василенок // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и Экологический менеджмент». 2023. № 2.С. 150-163.
5. Saaty T.L., Tran L.T. On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the Analytic Hierarchy Process // Mathematical and Computer Modelling. 2007. Т. 46. № 7-8. p. 962-975.
6. Шубов Л.Я., Скобелев К.Д., Загорская Д.А. Формирование межрегионального экотехнопарка – показательный пилотный проект для достижения целей устойчивого развития экономики // Экономика устойчивого развития. 2020. № 3(43). С. 116-122.
7. Скобелев Д.О., Шубов Л.Я., Иванков С.И., Доронкина И.Г. Систематизация технологий ресурсосбережения –М.: ООО «Сам Полиграфист», 2020.-2020.-610с.

УДК 577.18:579.22

Мокроусова С.А., Романова М.В., Белодед А.В.

Исследование антимикробной активности термофильных штаммов бактерий семейства *Bacillaceae*

Мокроусова Светлана Андреевна – студентка 3 курса факультета биотехнологии и промышленной экологии, e-mail: smokrousovats6@mail.ru

Романова Мария Васильевна – аспирант, ассистент кафедры биотехнологии;

Белодед Андрей Васильевич – к.б.н., доцент кафедры биотехнологии;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20.

В статье рассмотрены антимикробные метаболиты термофильных штаммов сем. *Bacillaceae*. Перспективным направлением является применение термофильных штаммов бактерий, способных синтезировать широкий спектр биоактивных пептидов. По сравнению бактериоцинами лактобактерий бактериоцины, продуцируемые бациллами, обладают термостабильностью и устойчивостью к различным химическим агентам. В настоящее время на основе метаболитов сем. *Bacillaceae* разработаны многочисленные ферментные, антимикробные и пробиотические препараты, активно используемые в медицине, пищевой промышленности и ветеринарии. Была охарактеризована антимикробная активность пяти термофильных штаммов в отношении широкого спектра тест-культур. Выявлен наиболее перспективный штамм Т4.2, проявивший антибактериальную активность против 9 тест-культур, включая виды *Bacillus megaterium*, *Bacillus coagulans*, *Escherichia coli*, *Enterococcus durans*, *Streptococcus thermophilus*. Методом гель-электрофореза была определена молекулярная масса антимикробного соединения штамма Т4.2, которая составила около 3,5 кДа, что позволяет предположить его пептидную природу.

Ключевые слова: бактериоцины, сем. *Bacillaceae*, термофилы, электрофорез.

Study of antimicrobial activity of thermophilic strains of bacteria of the *bacillaceae* family

Mokousova S.A., Romanova M.V., Beloded A.V.

D. Mendelev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article considers antimicrobial metabolites of thermophilic strains of the *Bacillaceae* family. A promising direction is the use of thermophilic bacterial strains capable of synthesizing a wide range of bioactive peptides. In comparison with bacteriocins of lactobacilli, bacteriocins produced by bacilli have thermal stability and resistance to various chemical agents. Currently, based on metabolites of the *Bacillaceae* family, numerous enzyme, antimicrobial and probiotic preparations have been developed that are actively used in medicine, food industry and veterinary science. The antimicrobial activity of five thermophilic strains against a wide range of test cultures was characterized. The most promising strain T4.2 was identified, which showed antibacterial activity against 9 test cultures, including *Bacillus megaterium*, *Bacillus coagulans*, *Escherichia coli*, *Enterococcus durans*, *Streptococcus thermophilus*. The molecular weight of the antimicrobial compound of strain T4.2 was determined by gel electrophoresis and was about 3.5 kDa, which suggests its peptide nature.

Keywords: bacteriocins, family *Bacillaceae*, thermophiles, electrophoresis.

Введение

Бактериоцины представляют собой рибосомально синтезированные пептиды, обладающие способностью подавлять рост генетически близкородственных микроорганизмов. Их чувствительность к протеолитическим ферментам является простым и точным подходом к подтверждению биохимической природы производимых антимикробных метаболитов для их классификации как бактериоцинов. Эти соединения можно рассматривать как способ конкурентного выживания бактерий, обеспечивающее преимущества в борьбе за питательные субстраты и экологические ниши [1].

История изучения бактериоцинов началась с их обнаружения у молочнокислых бактерий [2]. За последние десятилетия некоторые из них нашли широкое применение в пищевой промышленности (низин, субтилин, субтилозин), медицине и ветеринарии. В природе микроорганизмы имеют несколько механизмов для установления взаимодействия и защиты. Один из таких механизмов связан с выработкой бактериоцинов, пептидов с

антимикробной активностью. Бактериоцины содержатся в грамположительных и грамотрицательных бактериях.

Широкое использование различных антимикробных веществ в виде лекарственных препаратов и пестицидов вызывает ответные реакции со стороны микроорганизмов. Они адаптируются, мутируют и становятся устойчивыми к существующим средствам защиты. На данный момент в условиях развития резистентности бактерий, увеличения их патогенности и ухудшения экологической ситуации, вызванных неконтролируемым использованием антибиотиков, становится очевидной актуальность поиска новых решений. В связи с этим перспективным направлением является использование термофильных бактерий для получения новых антимикробных средств [3]. Эти микроорганизмы обладают уникальными свойствами, позволяющими создавать менее токсичные, безопасные для человека и окружающей среды соединения. В частности, использование термофильных штаммов *Bacillus*, в

качестве источника антимикробных метаболитов обладает рядом значительных преимуществ.

Бактерии сем. *Bacillaceae* благодаря обширному набору полезных свойств активно используются в биотехнологических производствах. Термофильные штаммы характеризуются высокой термостабильностью, что обеспечивает устойчивость их бактериоцинов к высоким температурам и позволяет применять их в различных технологических процессах, таких как обработка продуктов питания, и в медицине. Бациллы способны к синтезу различных антимикробных метаболитов, что делает их перспективными агентами биоконтроля. В процессе аэробного культивирования клетки выделяют в окружающую среду соединения, ингибирующие рост некоторых штаммов грамположительных микроорганизмов, например, бактерий р. *Listeria*, *Micrococcus*, *Staphylococcus*, *Streptococcus* и *Enterococcus* [4]. Это свойство способствует эффективной борьбе с вредными бактериями без нарушения естественной микрофлоры. Таким образом, использование термофильных представителей сем. *Bacillaceae* способствует повышению эффективности и безопасности биотехнологических продуктов, что особенно актуально в условиях роста антимикробной резистентности и экологических угроз.

Целью данной работы являлась характеристика антимикробного потенциала термофильных штаммов, выделенных из растительного сырья, и определение молекулярной массы антимикробного соединения наиболее активного штамма.

Экспериментальная часть

В работе использовали штаммы термофильных бактерий ТЗ.1, ТЗ.2, ТЗ.3, Т4.1, Т4.2, ранее выделенных на кафедре Биотехнологии РХТУ им. Д.И. Менделеева из растительных источников, таких как почва, перегной, компост при 50°C. По совокупности морфологических и физиологических свойств штаммы были предварительно отнесены к семейству *Bacillaceae*. Для проверки антибактериальной активности использовали тест-культуры *Bacillus megaterium* В-3750, *Bacillus coagulans* В-4521, *Bacillus coagulans* В-9868, *Bacillus coagulans* В-10468, *Bacillus cereus* В-8076, *Escherichia coli* В-3254, *Enterococcus durans* В-11854, *Enterococcus durans* В-12789, *Xanthomonas campestris* В-2228, *Xanthomonas campestris* В-5335, *Micrococcus luteus*, *Pseudomonas stutzeri*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus pumilus* В-12413, *Staphylococcus aureus* В-43300, *Staphylococcus aureus* В-2913, *Staphylococcus epidermidis* В-12228, *Streptococcus thermophilus* В-3386, *Streptococcus thermophilus* В-3809, *Streptococcus thermophilus* В-4463.

Штаммы выращивали на питательной среде Vegetable peptone broth (Oxoid), включающей следующие компоненты (г/л): овощной пептон – 18; дрожжевой экстракт – 3; NaCl – 5; K₂HPO₄ – 2,5; декстроза – 2,5. Культивирование проводили в колбах объемом 250 мл, содержащих 50 мл питательной

среды, на орбитальном шейкере при 50 °C при скорости вращения 150 об/мин в течение 24 часов.

Для культивирования тест-штаммов р. *Bacillus*, *Escherichia*, *Micrococcus* и *Pseudomonas* использовали питательную среду LB следующего состава (г/л): триптон – 10; дрожжевой экстракт – 5; NaCl – 5. Для культивирования представителей р. *Enterococcus* и *Staphylococcus* использовали среду MRS состава (г/л): триптон – 20; глюкоза – 20; дрожжевой экстракт – 5; K₂HPO₄ – 2; MgSO₄ – 0,2; MnSO₄ – 0,05. Для культивирования штаммов р. *Streptococcus* использовали среду M17 следующего состава (г/л): триптон – 5; пептон – 5; дрожжевой экстракт – 2,5; мясной экстракт – 5; лактоза – 5; аскорбиновая кислота – 0,5; MgSO₄ – 0,25. Для *Xanthomonas campestris* применяли среду следующего состава (г/л): сахароза – 20; триптон – 10; дрожжевой экстракт – 10. При подготовке полужидких сред в жидкую основу вносили 7 г/л агара. Все тест-культуры выращивали при 37°C, за исключением штаммов *X. campestris*, которых выращивали при 28°C.

Перед определением антимикробной активности метаболитов термофилов, культуральную жидкость штаммов отделяли от биомассы путем центрифугирования при 8000 об/мин в течение 15 минут (Eppendorf Centrifuge 5804R, Германия), затем полученный супернатант концентрировали с помощью специальных центрифужных фильтров Amicon Ultra 4 (Millipore, Sigma-Aldrich, Германия) с отсечением по молекулярной массе 3 кДа. Центрифугирование проводили 30 минут при 6000 об/мин. Далее концентрат стерилизовали фильтрацией через мембраны с порами 0,2 мкл (Spartan 13, Whatman GmbH, Германия).

Антимикробную активность метаболитов штаммов проверяли методом диффузии супернатанта в агар [5]. В чашку Петри разливали полуагаризованные питательные среды объемом 30 мл с 1 мл бактериальной суспензией тест-культуры. После затвердевания агара с помощью обрезанных стерильных наконечников вырезали лунки диаметром 6 мм. В лунки агара вносили по 70 мкл исследуемых супернатантов и контрольные пробы. В качестве отрицательного контроля использовали стерильный фосфатно-солевой буфер, в качестве положительного контроля – антибиотик ампициллин с концентрацией 50 мкг/мл. Чашки оставляли на 2 часа при комнатной температуре для диффузии предполагаемых бактериоцинов в агар. Далее посеы помещали в термостат при оптимальной температуре роста тест-культуры и инкубировали в течение 24-48 часов до появления зон подавления роста микроорганизмов вокруг лунок.

Электрофорез антимикробных веществ проводили в полиакриламидном геле с использованием системы Трис-Трицин-SDS согласно протоколу [6] с некоторыми модификациями. Образцы сконцентрированной культуральной жидкости смешивали с невосстанавливающим буфером для проб и без предварительного кипячения загружали в лунки в количестве 10 мкл. Для

определения молекулярной массы использовали белковый предокрашенный маркер Prism Ultra Protein Ladder (3,5 - 240 кДа), который добавляли в лунку геля в количестве 5 мкл. По окончании электрофореза первую половину геля с маркером фиксировали в смеси 50% метанола и 10% изопропанола в течение 30 минут, затем дорожки с опытными пробами окрашивали 0,25% Кумасси бриллиантовым голубым G-250 в течение 3 часов. Избыток красителя отмывали 7% раствором уксусной кислоты. Оставшуюся часть геля фиксировали в смеси 20% изопропанола и 10% уксусной кислоты в течение 2 часов, затем промывали стерильной

дистиллированной водой в течение 4 часов. После отмывки фрагменты геля помещали в стерильную чашку Петри, заливали 30 мл полуагаризованной среды, содержащей 1 мл тест-культуры, и инкубировали в течение 24 часов до появления зон ингибирования роста.

Для скрининга антимикробных метаболитов термофильных штаммов были выбраны различные тест-культуры грамположительных и грамотрицательных бактерий, дикие штаммы которых могут являться инфекционными агентами и фитопатогенами. Результаты анализа представлены в табл. 1 и на рис. 1, 2.

Таблица 1. Антимикробная активность метаболитов термофильных штаммов в отношении различных бактериальных тест-культур. Диаметры зоны угнетения роста, мм

Название тест-культуры	T3.1	T3.2	T3.3	T4.1	T4.2
<i>Bacillus megaterium</i> B-3750	н/о*	15,0	н/о	н/о	17,0
<i>Bacillus coagulans</i> B-4521	н/о	н/о	н/о	н/о	18,0
<i>Bacillus coagulans</i> B-9868	н/о	н/о	н/о	17,0	н/о
<i>Bacillus coagulans</i> B-10468	н/о	8,0	н/о	н/о	н/о
<i>Bacillus cereus</i> B-8076	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
<i>Escherichia coli</i> B-3254	н/о	10,0	8,0	н/о	9,0
<i>Enterococcus durans</i> B-11854	15,0	н/о	н/о	12,0	17,0
<i>Enterococcus durans</i> B-12789	н/о	12,5	н/о	н/о	15,0
<i>Xanthomonas campestris</i> B-2228	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
<i>Xanthomonas campestris</i> B-5335	н/о	н/о	н/о	15,0	20,0
<i>Micrococcus luteus</i>	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
<i>Pseudomonas stutzeri</i>	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
<i>Bacillus pumilus</i> B-12413	н/о	н/о	н/о	10,0	20,0
<i>Staphylococcus aureus</i> B-43300	н/о	14,0	н/о	н/о	11,0
<i>Staphylococcus aureus</i> B-29213	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
<i>Staphylococcus epidermidis</i> B-12228	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
<i>Streptococcus thermophilus</i> B-3386	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
<i>Streptococcus thermophilus</i> B-3809	н/о	10,0	н/о	12,0	17,0
<i>Streptococcus thermophilus</i> B-4463	22,0	н/о	н/о	н/о	н/о

* н/о – не обнаружено

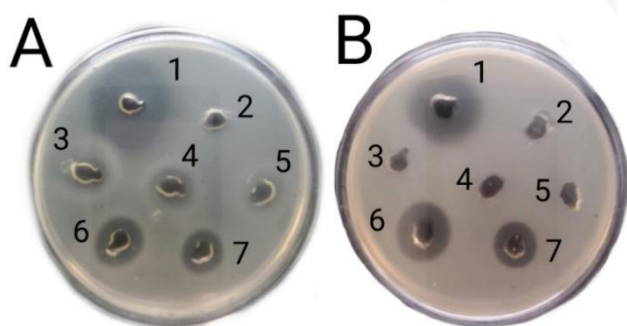


Рис. 1. Антимикробная активность термофильных штаммов в отношении тест-культур *Streptococcus thermophilus* B-3809 (А) и *Xanthomonas campestris* B-5335 (В). Цифрами обозначены: 1- положительный контроль; 2-отрицательный контроль; 3 - T3.1; 4 - T3.2; 5 - T3.3; 6 - T4.2; 7 - T4.1

Согласно данным табл. 1, у штамма T3.1 была выявлена антимикробная активность в отношении 2 тест-культур из 20 рассмотренных, у штамма T3.2 – 6 тест-культур, у штамма T3.3 – 1 тест-культуры, у штамма T4.1 – 5 тест-культур, у штамма T4.2 – против 9 тест-культур. Среди тест-штаммов, чувствительных к метаболитам культуры T4.2, присутствуют бактерии р. *Staphylococcus* и *Enterococcus*, штаммы которых могут вызывать инфекционные заболевания у человека. Особенно было отмечено ингибирование роста грамотрицательных бактерий *E. coli* и *X. campestris*, что характерно лишь для некоторых бактериоцинов грамположительных бактерий. Бактерии р. *Xanthomonas* являются фитопатогенами, которые могут вызывать заболевания листьев капусты, томатов, риса и других сельскохозяйственных культур растений.

С целью дальнейшего исследования перспективного антимикробного соединения штамма Т4.2 и предполагая, что он может принадлежать к пептидам или белкам, был проведен электрофорез в полиакриламидном геле для последующего определения молекулярной массы. В качестве чувствительной тест-культуры использовали *Bacillus megaterium* В-3750. Результаты продемонстрированы на рис. 2.

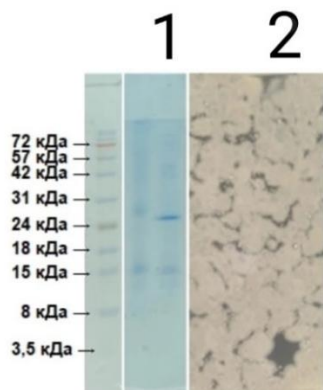


Рис. 2. Электрофорез в ПААГ антимикробного соединения термофильного штамма Т4.2 (1) и его антимикробная активность в отношении *B. megaterium* В-3750 (2)

Согласно зоне ингибирования роста тест-культуры на дорожке 2 электрофореграммы рис. 2, молекулярная масса предполагаемого антимикробного пептида составила около 3,5 кДа. При окрашивании геля Кумасси на дорожке 1 пептида не было зафиксировано, что, по-видимому, объясняется его низкой концентрацией в супернатанте культуры Т4.2, при этом высокой активностью, что характерно для бактериоцинов.

Заключение

В результате проведенного анализа антимикробной активности среди пяти термофильных штаммов выявлен наиболее эффективный из них, обладающий значительным потенциалом для использования в качестве источника новых антимикробных средств. Термофильный штамм Т4.2 проявил наиболее широкий спектр антимикробной активности против 9 тест-культур из

20, включая представителей р. *Bacillus*, *Enterococcus*, *Streptococcus*, *Staphylococcus*, *Xanthomonas*, а также *E. coli*. Определена молекулярная масса антимикробного вещества штамма Т4.2 методом электрофореза в полиакриламидном геле, которая составила 3,5 кДа. Предположительно данный метаболит относится к пептидам. В дальнейшем планируется изучение природы антимикробного вещества и механизма его действия, установить таксономическую принадлежность штамма-продуцента, определить его потенциал для биотехнологического применения и подготовить основу для разработки новых безопасных и эффективных антимикробных препаратов на основе термофильных микроорганизмов.

Список литературы

1. Хайруллин Р.М., Сорокань А.В., Габдрахманова В.Ф., Максимов И.В. Перспективные свойства *Bacillus thuringiensis* и направления их использования для защиты растений // Прикладная биохимия и микробиология. – 2023. – Т. 59. – № 4. – стр. 337-354.
2. Байрамова М.А., Гедаев С.Р. Изучение антимикробного потенциала молочнокислых бактерий в молочных продуктах // Символ науки. – 2024. – №. 11-2-3. – С. 38-40.
3. Сазыкин И.С., Хмелевцова Л.Е., Селиверстова Е.Ю., Сазыкина М.А. Влияние антибиотиков, используемых в животноводстве, на распространение лекарственной устойчивости бактерий // Прикладная биохимия и микробиология. – 2021. – Т. 57. – №. 1. – С. 1-12.
4. Похиленко В. Д. и др. Выделение и характеристика бактериоцина штамма *Bacillus subtilis*, изолированного из пассифлоры. – 2022.
5. Epishkina J. M. et al. Evaluation of Rye Bran Enzymatic Hydrolysate Effect on Gene Expression and Bacteriocinogenic Activity of Lactic Acid Bacteria // Fermentation. – 2022. – Т. 8. – №. 12. – С. 752. – DOI: 10.3390/fermentation8120752
6. Schagger, H. Tricine-SDS-PAGE. Nat Protoc 1, 16–22 (2006). – DOI: 10.1038/nprot.2006.4

УДК 628.543.3/9

Морозова С.А.

Очистка высококонцентрированных сточных вод от фенола и формальдегида с применением электрохимического окисления

Морозова Софья Алексеевна – студентка группы Э-41; sofiamor0z0va@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия,

Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В данной статье представлены результаты исследований по очистке высококонцентрированных фенол-формальдегидсодержащих сточных вод. Были определены оптимальные реагенты и их необходимые дозы для эффективной обработки сточных вод. Экспериментально подтверждено, что предложенная технология способна снизить основные показатели загрязнения сточных вод.

Ключевые слова: водоочистка, сточные воды, деревообработка, сорбция, коагуляция

Purification of phenol-formaldehyde-containing wastewater from woodworking industries

Morozova S.A.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

This article presents the results of research on the treatment of highly concentrated phenol-formaldehyde containing wastewater. The optimal reagents and their necessary doses for effective wastewater treatment were determined. It has been experimentally confirmed that the proposed technology is able to reduce the main indicators of wastewater pollution.

Keywords: Water treatment, wastewater, woodworking, sorption, coagulation

Введение

В современном мире проблема загрязнения воды стала одной из наиболее острых и требующих срочных мер по ее решению. Одним из главных источников поступления загрязняющих веществ в экосистему являются сточные воды промышленной деятельности человека. Сточные воды предприятий способствуют загрязнению водных объектов, именно это приводит к серьёзным последствиям для экологии. Одним из таких производств являются деревообрабатывающие предприятия, они – важная составляющая часть экономики государства, но наряду с этим, деревообрабатывающая промышленность представляет собой серьёзную экологическую проблему, оказывая негативное воздействие на окружающую среду. В процессе производства древесно-стружечных плит, фанеры, мебели и других изделий из древесины, обрабатываемых химическими реагентами, образуются высококонцентрированные сточные воды, которые содержат органические вещества, такие как фенол, формальдегид, метанол, смолы и другие органические и неорганические компоненты [1].

С развитием промышленного производства объем сточных вод растет, их высокая концентрация не уменьшается, а технологии очистки образующихся при этом стоков остаются на прежнем уровне, что довольно негативно сказывается на человеке и окружающей среде: загрязнение атмосферного воздуха при выбросах летучих органических соединений, выделяющихся при нанесении клея и прессования фанеры, загрязнение водных ресурсов при сбросе сточных вод, образующиеся при гидротермической обработке древесины, загрязнение почвенного покрова, воздействие на биоразнообразие и на здоровье населения [2].

Сточные воды деревообрабатывающих предприятий имеют неоднозначный состав, в который, чаще всего, входят фенолы и

формальдегиды. Их относят к веществам II класса опасности, они обладают высокой токсичностью, мутагенностью и способностью накапливания в живых организмах. Концентрации фенолов могут колебаться в широких пределах: от 5 мг/л до 30 г/л, а концентрация формальдегида может составлять 1500 мг/л [3,4].

Однако сточные воды на подобных предприятиях чаще всего не проходят должную очистку и собираются в специальных ёмкостях, предназначенных для жидких отходов – хвостохранилища, или после разбавления сточных вод, все сливается в канализацию. В современном мире применяются большое количество методов по очистке сточных вод, но не все из них имеют одинаковую эффективность.

Широкое применение в составе многоступенчатых схем, особенно в условиях высокой концентрации органических загрязнителей, нашли окислительные технологии (в частности, электрохимическое окисление), которые обеспечивают глубокую деструкцию фенола и формальдегида до нетоксичных конечных продуктов, таких как углекислый газ, вода и органические кислоты [5, 6].

Процесс электрохимической очистки сточных вод включает прямое анодное окисление или косвенное окисление через активные формы хлора, если в воде присутствуют хлориды. Для такого окисления обычно применяют три типа электродов: Ti/PbO₂ (титан с покрытием из диоксида свинца), Ti/RuO₂ (титан с покрытием из диоксида рутения) и BDD (алмазные электроды с борным легированием). Электроокисление рекомендуется проводить в нейтральной или слабощелочной среде при плотности тока не более 10 А/м² расстоянии между электродами не более 20 мм. Главное преимущество электрохимического окисления – обеспечение глубокой минерализации органики. Недостатки

метода – высокое энергопотребление и износ электродов [7].

Цель работы заключалась в разработке правильных и эффективных технологий с применением электрохимического окисления в области очистки высококонцентрированных сточных вод деревообрабатывающего производства, содержащих фенол и формальдегид.

Объектом исследования выступала модель сточной воды, характерной для деревообрабатывающих производств, в одном литре водопроводной воды содержалось 8 мл формидрона, 0,3 грамма фенола, 6 мл этанола. Сточная вода представляла собой прозрачную жидкость желтовато-коричневого цвета. pH исходной сточной воды колебался в диапазоне от 6,5 до 6,8. Оценку эффективности предложенных постадийных методов очистки модельной сточной воды проводили с помощью определения химического потребления кислорода (ХПК, мгО/л) фотометрическим методом. Для этого анализируемую пробу обрабатывали бихроматом калия в сернокислом растворе в

присутствии сульфата серебра. Длина волны, на которой проводили измерение оптической плотности полученных растворов, $\lambda = 600$ нм [8]. Для оценки содержания фенола и формальдегида применялся спектрофотометрический метод с использованием прибора КФК-3. Концентрация фенола в исследуемой воде проводили фотоколориметрическим методом с применением 4-аминоантипирина. Методика определения содержания формальдегида основывалась на том, что при добавлении фенилгидразина к раствору, содержащему формальдегид, в присутствии окислителя гексацианоферрата (III) калия $K_3[Fe(CN)_6]$, фенилгидразин окисляется до фенилгидразона, причем промежуточный продукт этого окисления конденсируется с формальдегидом, образуя вещество, окрашенное в оранжево-красный цвет.

Экспериментальная часть

Процедуры обработки сточных вод проводились в несколько этапов (рис. 1). И включали в себя как физические и химические методологии, так и методы сорбции на активированном угле.



Рисунок 1. Блок-схема предложенной процедуры очистки сточных вод.

На первом этапе исследования была применена коагуляция, где в качестве осадителя (коагулянта) выступал 10% раствор CaO. Доза коагулянта была 20 мл на 200 мл обрабатываемой сточной воды, что соответствовало концентрации коагулянта – 10 г/л. Процесс коагуляции проводился на магнитной мешке в течение 30 минут при постоянной температуре 60°C.

Второй этап эксперимента включал процесс электрохимического окисления пробы сточной воды после коагуляции на платиновых титановых анодах, схематичное представление которой приведено на рис. 2.

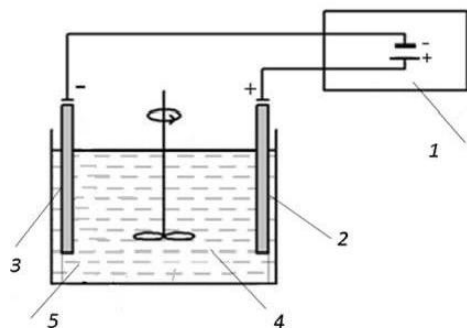


Рис. 2. Электрохимический реактор: 1 – источник постоянного тока, 2 – анод, 3 – катод, 4 – анодный отсек, 5 – катодный отсек.

Электролиз проводили в гальваностатическом режиме с использованием источника постоянного тока DAZHENG PS-305D (Китай). В качестве

электролита использовался 10% раствор хлорида натрия (NaCl) в объеме 2 мл, который вводили в 150 мл обрабатываемой пробы. Процесс длился 30 минут, при подаче максимального напряжения на электроды.

На последнем этапе был применен процесс адсорбции, где в качестве сорбента был использован порошковый активированный уголь марки «УПК». Этот материал был подготовлен методом дробления. Его доза составила 0,1 гр на 50 мл сточной воды (2 г/л). Процедура обработки проводилась при постоянном перемешивании на магнитной мешалке в течение 30 минут. После этого этапа полученная проба подверглась фильтрации посредством бумажного фильтрационного средства «синяя лента».

В табл. 1 представлены консолидированные лабораторные результаты по очистке модельной сточной воды деревообрабатывающего производства.

В результате проведенных испытаний были получены следующие степени очистки сточной воды:

- по значению ХПК: после коагуляции составила 15%, после электрохимии – 2%, после сорбции – 21%;
- по значению фенолов: после коагуляции составила 19%, после электрохимии – 94%, после сорбции – 70%.
- по значению формальдегидов: после коагуляции составила 72%, после электрохимии – 59%, после сорбции – 24,5%.

Таблица 1. Результаты аналитического контроля проб воды до и после рассматриваемых стадий очистки

Показатель	Стадии очистки			
	Без очистки	№1	№2	№3
ХПК, мгО/л	16175	13800	13600	10750
Фенол, мг/л	216	174	10	3
Формальдегид, мг/л	48	13	5,3	4

Электрохимическое окисление показало высокую эффективность в удалении фенола и формальдегида из сточных вод, достигнув значительных уровней очистки за 30 минут обработки. Следует отметить, что применение сорбции после использования электрохимии привело к более эффективному снижению ХПК. Но, несмотря на этот результат, обработанная сточная вода все еще не соответствует приемлемым стандартам сброса – допустимых концентраций (ДК) на сброс по ХПК. Стадия 2 позволяет с высокой эффективностью до 94% удалить фенол из сточной воды, а стадия 1 – альдольная конденсация в присутствии СаО – до 72% позволяет удалить формальдегид. Однако необходимы дополнительные исследования для оптимизации процесса и изучения долгосрочной устойчивости электрохимической очистки в различных условиях эксплуатации.

Заключение

Постадийная очистка фенол-формальдегидсодержащих сточных вод с применением коагуляции, электроокисления и сорбции представляет собой перспективный и комплексный подход. Сочетание этих технологий позволяет не только добиться более глубокой очистки, но и гибко настраивать процесс в зависимости от конкретных характеристик сточных вод и меняющихся условий. Это особенно ценно, учитывая все более строгие требования к качеству воды в водоемах и необходимость ее безопасного использования в различных сферах. Разработка эффективных методов очистки сточных вод деревообрабатывающих предприятий от фенол-формальдегидсодержащих соединений имеет важное

значение для минимизации негативного влияния на окружающую среду и обеспечения экологической устойчивости производственных процессов в данной отрасли. Поэтому исследования в этой области продолжаются.

Список литературы

1. Дряхлов В.О., Алмазова Г.А., Шайхиев И.Г. Очистка ливневых сточных вод от фенола и формальдегида // вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, №6. – С. 186-188.
2. Николаева А.В. Воздействие предприятий по производству фанеры на окружающую среду // Вестник науки: международный научный журнал. – 2025. – №4 (85).
3. Богданов А.Г. Очистка сточных вод предприятий по обработке древесины // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. – 2011. – Вып. 4 (19).
4. Поспелов А.В., Дубина А.В. Комплексная технология очистки высококонцентрированных сточных вод деревообрабатывающих производств // Экология, рациональное природопользование, переработка отходов, энергетика. – 2024. – №3. – С. 45-52
5. Перетрутов А.А., Чубенко М.Н., Горюнов С.И. Использование цинкосодежащего шлака для очистки маточных растворов от меди // Химическая промышленность. – 2002. – №6. – С. 1-5.
6. Kuznetsov V.V.; Ivantsova N. A.; Kuzin E.N.; Pirogov A.V.; Mezhuiev Y.O.; Filatova E.A.; Averina Y.M. Study of the Process of Electrochemical Oxidation of Active Pharmaceutical Substances on the Example of Nitrofurazone ((2E)-2-[(5-Nitro-2-furyl)methylene]hydrazine Carboxamide) // Water. - 2023. - № 15. (3370).
7. Лепеш Г.В., Грицай Е.И., Хотулев В.А. Исследование сущности электрохимического процесса, как технологической составляющей очистки воды // ТТПС. – 2013. – №2 (24)
8. ПНДФ 14.1:2.4.210-2005. Методика измерений химического потребления кислорода (хпк) в пробах питьевых, природных и сточных вод фотометрическим методом. Москва: – 2005 (изд. 2013).

УДК 544.52 : 628.316.12

Мостовык П.Р., Пономарева Е.А., Любушкин Т.Г.

Фотодеструкция метилового красного в присутствии пероксосоединений

Мостовык Полина Романовна – бакалавр 4 курса; pmostovik@mail.ru;

Пономарева Елена Александровна – магистр 2 курса;

Любушкин Тимофей Геннадьевич – аспирант.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

Изучен процесс фотолитической деструкции модельного раствора синтетического красителя метилового красного в присутствии пероксосоединений, в качестве которых были выбраны пероксид водорода (H_2O_2) и персульфат аммония $((NH_4)_2S_2O_8)$. Доказано, что совместное применение УФ-излучения и использованных окислителей значительно увеличивает эффективность очистки. Максимальные эффективности очистки модельного раствора (85,6% в системе H_2O_2 /УФ и 99,57% в системе $(NH_4)_2S_2O_8$ /УФ) превышает сумму эффективностей индивидуальных методов, что подтверждает наличие синергического эффекта.

Ключевые слова: метиловый красный, Advanced Oxidation Processes, очистка сточных вод, химическое окисление, сульфат-радикалы.

Photodestruction of methyl red in the presence of peroxo-compounds

Mostovik P.R., Ponomareva E.A., Liubushkin T.G.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

Studied the process of photolytic degradation of a model solution of synthetic dye methyl red in the presence of peroxo-compounds, which was chosen as the hydrogen peroxide (H_2O_2) and ammonium persulfate $((NH_4)_2S_2O_8)$. It has been proven that the combined use of UV radiation and used oxidants significantly increases the cleaning efficiency. Maximum cleaning efficiency of the model solution (85.6% in the H_2O_2 /UV system and 99.57% in the $(NH_4)_2S_2O_8$ /UV system) exceed the sum of the efficiencies of the individual methods, which confirms the existence of a synergistic effect.

Keywords: methyl red, Advanced Oxidation Processes, chemical oxidation, wastewater treatment, sulfate radicals

Введение

Синтетические красители являются весьма распространёнными поллютантами в составе сточных вод, образующихся на предприятиях текстильной, лакокрасочной и целлюлозно-бумажной промышленности. Красители, попадая в окружающую среду, существенно ухудшают ее состояние, сокращают количество света, проходящего через воду, что негативно сказывается на водных растениях и процессе фотосинтеза. Также они способны накапливаться в тканях гидробионтов, что ведет к нарушению процессов дыхания, роста, размножения и, соответственно, уменьшает их популяции.

Для удаления красителей применяются различные методы очистки: физико-химические (адсорбция, коагуляция, мембранные процессы, ионный обмен), химические и биологические. Однако каждый из них характеризуется рядом недостатков [1].

Коагуляция наиболее эффективна при высоких концентрациях красителей, как правило, применяется на предварительном этапе очистки и не позволяет достичь предельно допустимых концентраций [2]. Адсорбционные методы непригодны для обработки высококонцентрированных сточных вод и требуют дополнительных затрат, связанных с регенерацией адсорбентов. Мембранные технологии, несмотря на высокую эффективность, сопровождаются значительными эксплуатационными и энергетическими расходами и зарастанием мембран. Биологические методы чувствительны к изменениям

параметров окружающей среды и содержанию красителей, большинство из которых токсичны [3].

Химические методы очистки демонстрируют высокую эффективность деструкции устойчивых органических поллютантов в сточных водах. Однако их применение связано с существенными затратами на реагенты и с вторичным загрязнением воды продуктами окисления. В последние годы в качестве окислителей загрязняющих веществ активно рассматриваются различные пероксосоединения, такие как пероксид водорода, надуксусная кислота, пероксид кальция и др. [4]. Наиболее распространенным среди них является пероксид водорода, который, несмотря на высокую эффективность в удалении органических загрязняющих веществ, обладает рядом существенных недостатков: высокая стоимость, взрывоопасность и высокая токсичность ПДКв = 0,1 мг/дм³ [5].

Недостатки традиционного химического окисления привели к развитию усовершенствованных методов окисления АОР (Advanced Oxidation Processes), которые обеспечивают наиболее полную деструкцию стойких органических загрязняющих веществ. Это достигается благодаря применению высоко реакционных свободных радикалов (гидроксил, пероксильный радикалы), обладающих высоким окислительно-восстановительным потенциалом (редокс-потенциалом) $E = 1,8-2,7$ В [6,7].

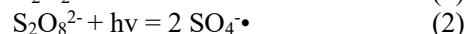
Помимо гидроксильных радикалов в последнее время все большее внимание уделяется сульфат-

радикалам ($\text{SO}_4^{\bullet-}$), которые обладают высоким редокс-потенциалом $E = 2,5-3,1$ В [7].

Источником сульфат-радикалов, как правило, выступает пероксодисерная кислота ($\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$) или ее соли персульфаты (например, персульфат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$). По сравнению с пероксидом водорода эти реагенты обладают существенными преимуществами: низкая стоимость, отсутствие вероятности взрывов, а также более высокая предельно допустимая концентрация ПДКв = 0,5 мг/дм³, что превышает аналогичный показатель для пероксида водорода в 5 раз [7,8].

Для инициации распада с образованием свободных радикалов, используемых в процессах усовершенствованного окисления реагентов, как правило, используют различные методы активации: реагентная активация переходными металлами, термическая активация, алкильная активация и т.д. Особый интерес представляет фотоактивация, поскольку она обеспечивает высокую скорость окисления и минимизирует риск вторичного загрязнения окружающей среды [9]. В процессе фотоактивации загрязняющие вещества подвергаются разрушению не только под воздействием свободных радикалов, но и под действием ультрафиолетового излучения. Молекулы красителя непосредственно поглощают кванты УФ-излучения. Это приводит к возбуждению их электронной структуры и разрыву химических связей, что, в свою очередь, способствует более эффективному разложению загрязняющих веществ.

Образование свободных радикалов в результате фотоактивации распада пероксида водорода и персульфат-аниона протекает согласно реакциям 1 и 2:



Целью данного исследования является изучение процесса фотодеструкции синтетического красителя в присутствии пероксосоединений.

Экспериментальная часть

Исследования проводились с использованием модельного загрязняющего вещества, в качестве которого был выбран синтетический азокраситель метиловый красный ($\text{C}_{15}\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_2$). Начальная концентрация красителя в модельном растворе составила 3 мг/дм³. Доза пероксида водорода и персульфата аммония в опытах составила 10 мг/мг загрязняющего вещества.

Измерение концентрации метилового красного проводили фотометрическим методом на приборе ЗОМС КФК 3-01 (Россия). УФ-деструкция осуществлялась с помощью импульсной ксеноновой лампы ФП-05/120 с частотой импульса 6 Гц.

На начальном этапе исследования была проведена оценка эффективности применения индивидуальных окислителей. Полученные экспериментальные данные представлены на рисунке 1.

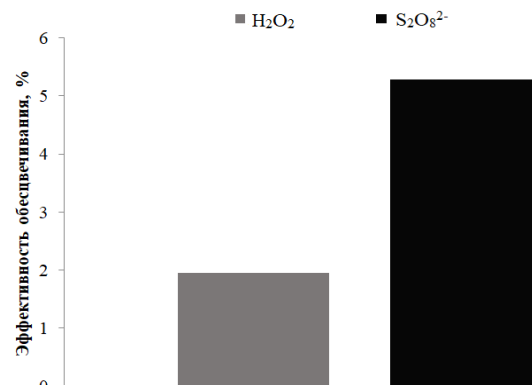


Рис.1. Эффективность деструкции метилового красного с применением индивидуального пероксида водорода и персульфата аммония

Как видно из данной диаграммы при использовании индивидуальных окислителей эффективность окисления не превышает 10%. Низкая эффективность окисления метилового красного вероятнее всего связана с крайне высокой устойчивостью его хромофорной азо-группы ($\text{N}=\text{N}$).

С целью повышения эффективности окисления метилового красного на втором этапе эксперимента было принято решение о необходимости применения УФ-активации. Данные представлены на рисунке 2.

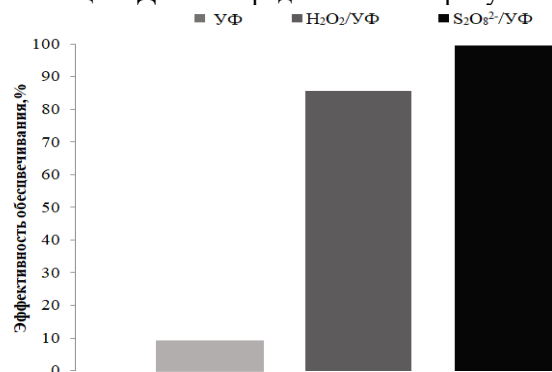


Рис.2. Эффективность деструкции метилового красного с применением УФ-излучения

Как следует из второй диаграммы, применение индивидуальной фотодеструкции обеспечивает несколько более высокую степень удаления загрязняющего вещества (9,2 %) по сравнению с использованием отдельных окислителей, однако эффективность метода остается незначительной. В то же время комбинированное воздействие окислителя и УФ-излучения более чем в 10 раз повышает степень деструкции и очистки. Так, при использовании системы $\text{УФ}/\text{H}_2\text{O}_2$ степень удаления метилового красного составила 85,6%, тогда как при применении $\text{УФ}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ — достигла 99,57%. Повышенная эффективность деструкции метилового красного в системе $\text{УФ}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ может быть объяснено тем фактом, что сульфат радикалы обладают большей окислительной способностью, чем гидроксил радикалы [7].

Заключение

В ходе исследования был изучен процесс фотохимического окисления синтетического

красителя метилового красного в присутствии пероксида водорода и персульфата аммония в качестве окислителей. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности метода: степень очистки модельных растворов составила 85,6% в системе УФ/ H_2O_2 и достигала 99,57% в системе УФ/ $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$. Помимо этого, полученные данные позволяют выдвинуть предположение о возможности использования персульфата аммония в качестве потенциального окислителя для очистки сточных вод, загрязненных устойчивыми к традиционным окислителям веществами, характерных для фармацевтической, лакокрасочной, нефтехимической и других отраслей промышленности.

Дальнейшее изучение механизмов активации данного окислителя позволят оптимизировать процесс деструкции устойчивых загрязняющих веществ, что будет являться продолжением тематики.

Список литературы

1. Кадер Д. М. и др. Методы удаления пигментов из сточных вод // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – №. 7. – С. 54-64.
2. Настенко А. О., Зосуль О. И. Современные коагулянты и флокулянты в очистке природных и сточных вод //Международный студенческий научный вестник. – 2015. – №. 3-4. – С. 531-537.
3. Shindhal T. et al. A critical review on advances in the practices and perspectives for the treatment of dye industry wastewater //Bioengineered. – 2021. – V. 12. – №. 1. – P. 70-87.
4. Więkol-Ryk A., Thomas M., Białecka B. Solid peroxy compounds as additives to organic waste for reclamation of post-industrial contaminated soils //Materials. – 2021. – V. 14. – №. 22. – P. 6979.
5. Исаев А. Б., Магомедова А. Г. Новые технологии очистки сточных вод от красителей на основе окислительных процессов //Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. – 2022. – Т. 63. – №. 4. – С. 247-268.
6. Kuznetsov V. V., Ivantsova N. A., Kuzin E. N. [et al] . Study of the Process of Electrochemical Oxidation of Active Pharmaceutical Substances on the Example of Nitrofurazone ((2E)-2-[(5-Nitro-2-furyl)methylene]hydrazine Carboxamide) // Water. – 2023. – V. 15. – N. 19. – P. 3370.
7. Xia X. et al. A review study on sulfate-radical-based advanced oxidation processes for domestic/industrial wastewater treatment: degradation, efficiency, and mechanism //Frontiers in chemistry. – 2020. – V. 8. – P. 592056.
8. Любушкин Т.Г. и др. Оценка возможности использования пероксодисерной кислоты в процессах очистки сточных вод, содержащих синтетические красители // Известия Высших Учебных Заведений. Серия «Химия и химическая технология». – 2025. – Т. 68. – №. 1. – С. 120-126.
9. Иванцова, Н. А. Фотокаталитическая очистка воды от фенола и формальдегида / Н. А. Иванцова, Е. Н. Кузин, А. А. Чурина // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. – 2022. – Т. 22. – № 3. – С. 275-281.

УДК 633.8

Новикова А.А., Шевченко А.Т., Евдокимова С.А.

Влияние экстрактов чабреца и иван-чая, богатых полифенолами, на рост бифидобактерий

Новикова Алиса Александровна, студентка 4 курса бакалавриата факультета биотехнологии и промышленной экологии, e-mail: alinov03@mail.ru

Шевченко Алла Тарасовна, студентка 1 курса магистратуры факультета биотехнологии и промышленной экологии, e-mail: allasheff@mail.ru

Евдокимова Светлана Александровна, к.б.н., ассистент кафедры биотехнологии;

Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева,

125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20

В представленной работе приведено исследование влияния экстрактов чабреца и иван-чая, богатых полифенольными соединениями, на рост и активность пробиотических штаммов бифидобактерий. Проведено культивирование четырёх штаммов р. Bifidobacterium в питательных средах, содержащих экстракты на спиртовой – для чабреца и водной – для иван-чая основах, при различных концентрациях полифенольных соединений. Установлено, что при добавлении небольших концентраций общих фенолов экстракты обладают пребиотическим эффектом – наблюдали активный рост бактерий и выработку первичных метаболитов. Данный эффект был наиболее выражен для B. infantis, а наименее – для B. longum. Увеличение концентрации полифенольных соединений оказывает ингибирующий эффект на рост исследуемых микроорганизмов. Данное исследование демонстрирует потенциал изучения полифенольных растительных экстрактов в качестве пребиотиков.

Ключевые слова: полифенолы, экстракты, чабрец, иван-чай, бифидобактерии

The effect of thyme and ivan tea extracts rich in polyphenols on the growth of bifidobacteria

Novikova A.A., Shevchenko A.T., Evdokimova S.A.

D. Mendelev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia.

This study investigates the influence of thyme and fireweed (Ivan-chai) extracts, rich in polyphenolic compounds, on the growth and activity of probiotic Bifidobacterium strains. Four Bifidobacterium strains were cultured in nutrient media supplemented with alcohol-based thyme extract and aqueous fireweed extract at varying concentrations of polyphenolic compounds. It was established that at low concentrations of total phenols, the extracts exhibited a prebiotic effect, promoting active bacterial growth and production of primary metabolites. This effect was most pronounced for B. infantis and least pronounced for B. longum. Increasing the concentration of polyphenolic compounds exerted an inhibitory effect on the growth of the studied microorganisms. This research demonstrates the potential of polyphenol-rich plant extracts for further investigation as prebiotics.

Keywords: polyphenols, extracts, thyme, ivan tea, bifidobacteria

Введение

Микробиота кишечника – важная составляющая организма человека, влияющая на его общее состояние здоровья. Микробиоту заселяют микроорганизмы различных родов и видов, наиболее важными из которых являются условно полезные, например р. *Bifidobacterium*, р. *Lactobacillus* и другие [1]. Благодаря их полезным свойствам: участие в пищеварении и синтезе короткоцепочечных жирных кислот и бактериоцинов, препятствие росту патогенных микроорганизмов, – эти виды бактерий, после выделения из организма, стали использовать в качестве пробиотиков [2]. Согласно Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) и Международной научной ассоциации по вопросам пробиотиков и пребиотиков (ISAPP), пробиотики – это живые микроорганизмы, которые при введении в организм в адекватных количествах оказывают положительное влияние на общее состояние здоровья человека [3].

Пробиотические микроорганизмы оказывают мультифакторное воздействие на организм человека, ключевым аспектом которого является расширение его метаболических возможностей [4]. Они обеспечивают ферментативную деградацию

неперевариваемых полисахаридов (пищевых волокон), недоступных для ферментов человека. В процессе метаболизма пробиотические микроорганизмы синтезируют короткоцепочечные жирные кислоты (КЦЖК) – вещества, обладающие противовоспалительной (масляная кислота), нейромодулирующей, иммуномодулирующей и энергетической (уксусная кислота) функциями, влияют на регенерацию слизистой оболочки (молочная кислота) и поддерживают кислотность среды кишечника, не позволяя развиваться патогенной микробиоте [5]. Многие представители пробиотиков участвуют в образовании нейромедиаторов боли и воспалений, синтезируют гормоны, образуя ось «кишечник – мозг» [6]. Синтезируя бактериоцины, представители полезной микробиоты так же подавляют рост патогенных микроорганизмов. Представители р. *Bifidobacterium* синтезируют витамины группы В, К и С, способствуют усвоению кальция [7].

Для поддержания здоровья кишечника используют также соединения, стимулирующие рост и активность пробиотиков – пребиотики. Согласно определению Всемирной гастроэнтерологической организации (WGO), данному в 2008 году: пребиотик

— это неперевариваемый субстрат, избирательно используемый микробиотой и положительно влияющий на состав и активность микроорганизмов желудочно-кишечного тракта [8].

Примерами пребиотических веществ являются различные поли- и олигосахариды: олигофруктоза, инулин, арабиноза, арабиноксилан, раффиноза и другие [9]. Данные вещества отвечают требованиям, предъявляемым к пребиотикам: устойчивы к кислым значениям pH и ферментам желудочно-кишечного тракта человека, метаболизируются микробиотой и оказывают селективное воздействие на полезные микроорганизмы – стимулируют их рост и/или жизнедеятельность [10]. Именно углеводные соединения являются главными субстратами для синтеза КЦЖК и оказывают значительное влияние на микробиоту кишечника. Однако различные исследования позволили расширить спектр веществ, соответствующих критериям пребиотиков. Перспективным направлением стало изучение фитохимических веществ, таких как полифенолы [11]. Являясь метаболитами растений, при попадании в кишечник, полифенолы и их гликозиды (имеющие углеводный остаток) оказывают стимулирующие действие на полезную микробиоту и подавляют рост патогенных микроорганизмов. Такое воздействие происходит за счет способности фенольных соединений влиять на экспрессию генов бактерий, ограничивая размножение болезнетворных представителей, и способности изменять проницаемость и жесткость мембраны бактерий, защищая полезных представителей микробиоты от окислительного стресса [12]. Среднее потребление полифенолов составляет 900-1000 мг/день, главными источниками являются чай, кофе, фрукты, овощи и вино [13].

Таким образом, пробиотические и пребиотические препараты являются частью терапии

при лечении и/или профилактике дисбактериоза (нарушение качественного и количественного состава микробиоты) и других заболеваний кишечника. Часто эти компоненты используют совместно (синбиотики) или включают в продукты функционального питания [14].

Целью данной работы являлось исследование влияния концентрации общих фенолов спиртового экстракта чабреца ползучего и водного экстракта иван-чая (кипрея узколистного) на рост исследуемых штаммов р. *Bifidobacterium*.

Экспериментальная часть

Объектами исследования являлись пробиотические штаммы бифидобактерий, полученные из Национальной Биоресурсной Всероссийской Коллекции Промышленных Микроорганизмов (БРЦ ВКПМ): *B. bifidum* (AC-1666), *B. longum* subsp. *longum* (AC-1665), *B. breve* (AC-1911), *B. longum* subsp. *infantis* (AC-1912).

Для получения экстрактов использовали сушеные стебли и листья чабреца ползучего (*Thymus serpyllum*) и иван-чая (кипрея узколистный - *Epilobium angustifolium*). Для первого вида сырья проводили экстракцию 80% этиловым спиртом при температуре 80°C в течение 1,5 часов. Спиртовой экстракт разбавляли в соотношении 1:1 водой и подвергали автоклавированию для выпаривания спирта. Для второго сырья проводили водную экстракцию при 80°C в течение 1 часа.

Наличие полифенолов было доказано с помощью спектрофотометрии разбавленных экстрактов в ультрафиолетовой области – результат представлен на рисунке 1. Для наиболее распространенных полифенольных соединений (флавоноиды, флавонолы, их гликозиды) характерны два максимума поглощения: при 250-290 и 330-360 нм [15]. Полученные спектры поглощения анализируемых экстрактов лежат в этой области.

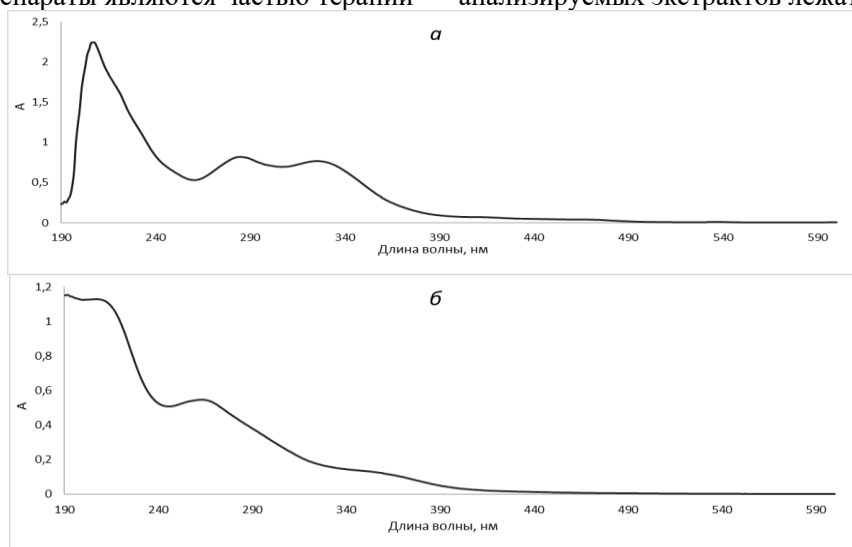


Рисунок 1. Спектры поглощения спиртового экстракта чабреца, при разбавлении в 500 раз (а) и водного раствора иван-чая, при разбавлении в 1000 раз (б).

Для культивирования бифидобактерий использовали питательную среду по Rossi et al половинного состава, с некоторыми модификациями

[16]. Культивирование проводили в CO₂-инкубаторе при 37°C в анаэробных условиях в течение 10 часов.

Была проведена серия ферментаций бифидобактерий в питательных средах с добавлением исследуемых экстрактов в различных концентрациях от 0 – нет экстракта до 0,1 мл экстракта/мл среды (далее мл/мл). Для оценки влияния экстрактов на рост

бактерий определяли конечное значение pH (отражал синтез КЦЖК) и изменение ОП (отражал рост бактерий). Полученные данные продемонстрированы на рисунках 2-3.

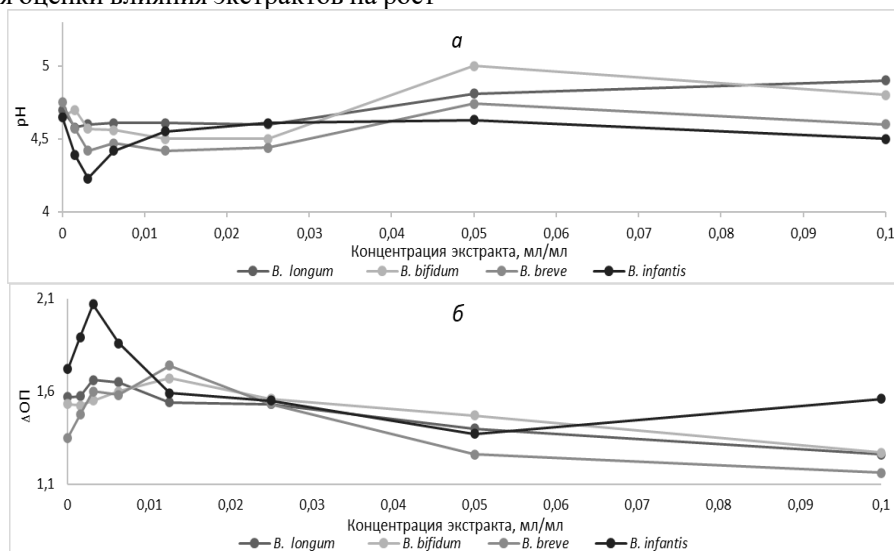


Рисунок 2. Конечное значение pH (а) и изменение оптической плотности (б) культуральной жидкости при культивировании бифидобактерий в питательной среде с добавлением различной концентрации спиртового экстракта чабреца

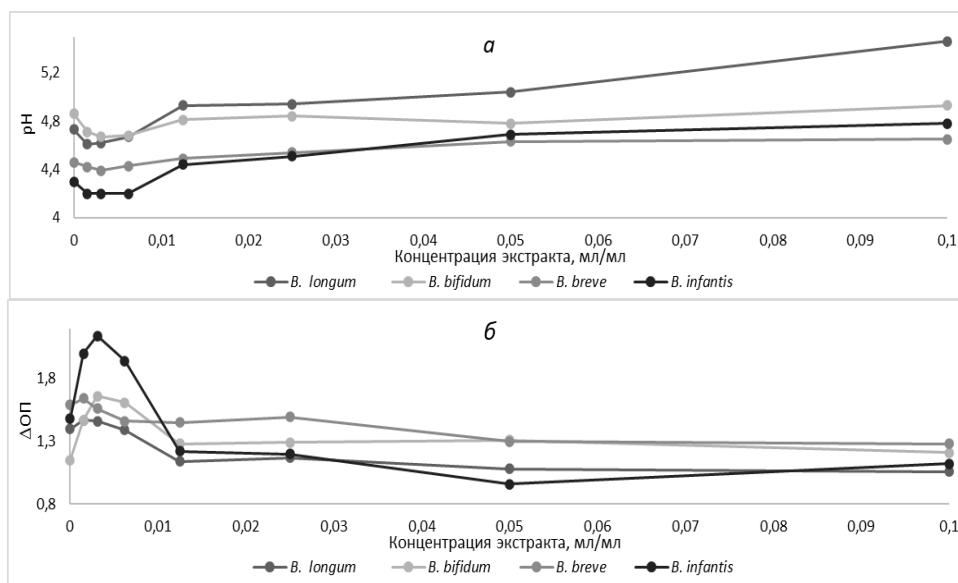


Рисунок 3. Конечное значение pH (а) и изменение оптической плотности (б) культуральной жидкости при культивировании бифидобактерий в питательной среде с добавлением различной концентрации водного экстракта иван-чая

Результаты культивирования бифидобактерий свидетельствуют о том, что низкие концентрации (0,001–0,01 мл/мл) полифенол-содержащих экстрактов демонстрируют пребиотическую активность. Это подтверждается значительным увеличением ОП и снижением pH культуральной жидкости по сравнению с контролем без экстрактов. При повышении концентрации фенольных соединений наблюдали снижение пребиотического эффекта, а в некоторых случаях было отмечено ингибирование роста и жизнедеятельности бифидобактерий.

Наибольшую чувствительность к изменению концентрации экстрактов продемонстрировал штамм *B. longum* subsp. *infantis*. При оптимальной концентрации экстракта (0,003 мл/мл) наблюдали максимальное увеличение оптической плотности культуры, превышающее контрольные значения (без экстракта) в 1.5 раза, что свидетельствует о значительном стимулировании роста, а также существенное снижение pH культуральной жидкости, обусловленное активным продуцированием КЦЖК. Данный эффект создает неблагоприятные условия для роста патогенных микроорганизмов, что указывает на антагонистический потенциал. В отличие от *B.*

longum subsp. *infantis*, для штамма *B. longum* subsp. *longum* ключевые параметры роста и метаболизма значимо не изменились.

Заключение

Ключевым условием достижения целевого пребиотического эффекта (стимулирование роста и метаболической активности бифидобактерий) является оптимизация концентрации полифенол-содержащих экстрактов. Исследование подтверждает существование узкого диапазона концентраций, оказывающих стимулирующее действие, за пределами которого наблюдается ингибирующий эффект. Также важно подобрать штаммы, наиболее совместимые с выбранными экстрактами. Для дальнейшего изучения экстрактов чабреца и иван-чая на данном этапе исследования наиболее перспективным является *B. longum* subsp. *infantis*. Представленные результаты подтверждают научную перспективу разработки пребиотических композиций на основе данных растительных экстрактов и обосновывают целесообразность их углубленного изучения.

Выполнено при финансовой поддержке
Российского Научного Фонда (Грант № 24-19-00298).

Список литературы

1. Тикунов А. Ю. и др. Таксономический состав и биоразнообразие кишечного микробиома пациентов с синдромом раздраженного кишечника, язвенным колитом и бронхиальной астмой // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2022. – Т. 25. – №. 8. – С. 864-873.
2. Грицинская В. Л. Пробиотики: классификация, основные характеристики, требования к пробиотическим штаммам и сфера их применения // Детская медицина Северо-Запада. – 2022. – Т. 10. – №. 3. – С. 12-20.
3. Hill C. et al. The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic // Nature reviews Gastroenterology & hepatology. – 2014. – Т. 11. – №. 8. – С. 506-514.
4. Floch M. H. The effect of probiotics on host metabolism: the microbiota and fermentation // Journal of clinical gastroenterology. – 2010. – Т. 44. – С. S19-S21.
5. Шендеров Б. А. Мишени и эффекты короткоцепочечных жирных кислот. 21
6. Awe T. et al. The modulatory role of gut microbiota on host behavior: exploring the interaction between the brain-gut axis and the neuroendocrine system // AIMS neuroscience. – 2024. – Т. 11. – №. 1. – С. 49.
7. Gavzy S. J. et al. Bifidobacterium mechanisms of immune modulation and tolerance // Gut Microbes. – 2023. – Т. 15. – №. 2. – С. 2291164.
8. Guarner F., Garisch J. Пробиотики и пребиотики/Всемирная гастроэнтерологическая организация (WGO). Практические рекомендации. 2008. – 2008.
9. Davani-Davari D. et al. Prebiotics: definition, types, sources, mechanisms, and clinical applications // Foods. – 2019. – Т. 8. – №. 3. – С. 92.
10. Anadón A. et al. Assessment of prebiotics and probiotics: an overview // Bioactive foods in promoting health. – 2010. – С. 19-41.
11. Plamada D., Vodnar D. C. Polyphenols—Gut microbiota interrelationship: A transition to a new generation of prebiotics // Nutrients. – 2021. – Т. 14. – №. 1. – С. 137.
12. Бобрышева Т. Н. и др. Полифенолы как перспективные биологически активные соединения // Вопросы питания. – 2023. – Т. 92. – №. 1 (545). – С. 92-107.
13. Espín J. C., González-Sarriás A., Tomás-Barberán F. A. The gut microbiota: A key factor in the therapeutic effects of (poly) phenols // Biochemical pharmacology. – 2017. – Т. 139. – С. 82-93.
14. Храмцов А. Г. и др. Пробиотики как функциональные пищевые ингредиенты: терминология, критерии выбора и сравнительной оценки, классификация // Вопросы питания. – 2018. – Т. 87, № 1. – С. 5-17.
15. Зибарева Л. Н. и др. Фитохимия. Соединения полифенольного комплекса: учебно-методическое пособие для студентов и магистрантов университетов. – 2022.
16. Rossi M. et al. Fermentation of fructooligosaccharides and inulin by bifidobacteria: a comparative study of pure and fecal cultures // Applied and environmental microbiology. – 2005. – vol. 71. – №. 10. – P. 6150-6158.

УДК 661.183.7 : 621.315.615.2

Осадчая Е.А., Курилкин А.А., Нистратов А.В.

Влияние времени выдержки модифицированного с помощью трансформаторного масла силикагеля на эффективность адсорбции паров бензола

Осадчая Елизавета Александровна – студент 4 курса бакалавриата группы Э-41 факультета биотехнологии и промышленной экологии.

Курилкин Александр Александрович – доцент факультета биотехнологии и промышленной экологии, кандидат технических наук.

Нистратов Алексей Викторович – доцент факультета биотехнологии и промышленной экологии, кандидат технических наук.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»

Россия, Москва, 125480, ул. Героев Панфиловцев, дом 20.

В статье рассмотрен процесс и результаты модификации силикагелей трансформаторным маслом при совместной термической обработке. Установлены показатели пористой структуры модифицированных адсорбентов, позволяющие оценить их гидрофобность. Показано, что повышение времени выдержки сырья при термообработке вызывает улучшение показателей адсорбентов. Получены кинетические кривые адсорбции паров бензола и воды из воздуха.

Ключевые слова: силикагель, адсорбция, модификация силикагеля, трансформаторное масло, время выдержки.

The effect of the exposure time of silica gel modified with transformer oil on the efficiency of benzene vapor adsorption

Osadchaya E.A., Kurilkin A. A., Nistratov A. V.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Russian Federation

In the article the process and results of modification of silica gel with transformer oil during joint heat treatment are considered. The indicators of the porous structure of modified adsorbents, allowing to estimate their hydrophobicity, have been established. It is shown that increasing the time of exposure of raw materials during heat treatment causes an improvement in adsorbent parameters. There are obtained kinetic curves of adsorption of benzene vapor and water from air.

Keywords: silica gel, adsorption, modification of silica gel, transformer oil, exposure time.

Введение

В промышленности в технологических процессах широко применяются различные адсорбенты, такие как активированные угли, цеолиты, металлоорганические каркасы (MOF) и силикагели. Каждый из них обладает уникальными свойствами, позволяющими решать специфические задачи: осушку воздуха, очистку газов от примесей, разделение смесей. Значительными достоинствами среди вышеперечисленных адсорбентов обладает силикагель: низкие температура и энергозатраты при регенерации (110-200 °С), пожаробезопасность, сравнительно низкая себестоимость, высокая механическая прочность по отношению к истиранию. Однако ключевым недостатком силикагеля является его гидрофильность, обусловленная наличием гидроксильных групп на поверхности. Для повышения эффективности данного адсорбента при поглощении молекул органических соединений требуется его гидрофобизация. Этот процесс включает нанесение поверхностного модификатора, термическую обработку, промывку и сушку [1]. В качестве модификаторов поверхности может выступать растительное сырьё при его карбонизации. Ранняя работа авторов показала эффективность добавки к силикагелю трансформаторного масла с его последующим пиролизом [2]. Введение трансформаторного масла позволяет повысить показатель гидрофобности поверхности силикагеля до 4.

Трансформаторное масло – минеральное масло высокой чистоты и низкой вязкости, которое применяется для заливки измерительных и силовых трансформаторов, масляных выключателей, а также реакторного оборудования. Силикагель и трансформаторное масло контактируют в процессе его очистки и регенерации, что критически важно для обеспечения надежности и долговечности трансформаторов [3], при этом отработанный пропитанный маслом силикагель представляет собой не утилизируемый отход.

Экспериментальная часть

Основной целью данной работы является оценка влияния выдержки при пиролизе смешанного с маслом силикагеля на эффективность адсорбции паров токсичного бензола, присутствующего во многих выбросах. Объектом исследования являются модифицированные с помощью трансформаторного масла силикагели марки КСКг и КСМ в соотношении КСКг-ТМ 2:1 и КСМ-ТМ 2:1, а также отработанный силикагель КСКг-ТМ, предоставленный АО «Экофонд».

Образцы были получены путём пиролиза выдержанных в масле в течение 7 сут. силикагелей в муфельной печи при температуре 475 °С и времени выдержки 30 минут и 1 час, чтобы проверить влияние этого параметра на сорбционные и иные показатели продуктов [4] (табл. 1). Из таблицы 1 видно, что лучший показатель гидрофобности у КСКг-ТМ 2:1 при времени выдержки час при постоянной

температуре, при этом сохраняется допустимая механическая прочность при истирании – более 90%.

Таблица 1. Показатели качества модифицированных силикагелей КСКг-ТМ 2:1 и КСМ-ТМ 2:1 при разном времени выдержки

Показатели сорбционной структуры		КСКг-ТМ 2:1 Час выдержки	КСКг-ТМ 2:1 30 минут выдержки	КСМ-ТМ 2:1 Час выдержки	КСМ-ТМ 2:1 30 минут выдержки	КСКг-ТМ («Экофонд»)
Объем сорбируемых пор, см ³ /г	V _s (CCl ₄)	0,91	0,02	0,31	0,06	0,88
	V _s (C ₆ H ₆)	0,91	0,94	0,31	0,33	0,87
	V _s (H ₂ O)	0,24	0,30	0,31	0,32	0,31
Суммарный объем пор V _Σ , см ³ /г		0,93	0,96	0,31	0,36	0,80
Показатель гидрофобности (V _s C ₆ H ₆ /V _s H ₂ O)		3,79	3,11	1	1,01	2,81
Насыпная плотность, г/см ³		0,35	0,42	0,72	0,71	0,41
Механическая прочность при истирании, %		93,2	98,8	94,4	73,9	92,7

Также подтверждено, что в статических условиях бензол лучше сорбируется на силикагеле крупного зерна КСКг. Лучший образец КСКг-ТМ 2:1 при часе выдержки по статическим показателям совпадает с отработанным силикагелем КСКг-ТМ, представленный АО «Экофонд».

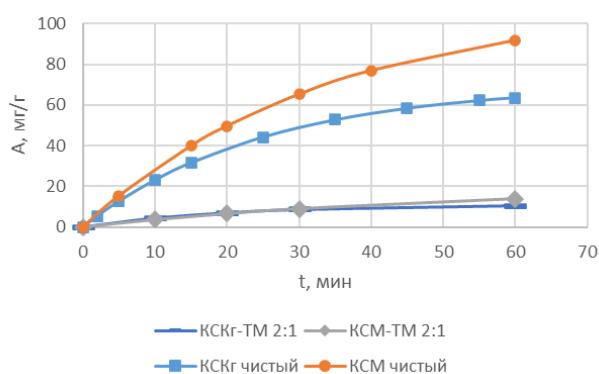


Рис. 1. Кинетические кривые адсорбции паров воды образцами КСКг, КСКг-ТМ 2:1, КСМ, КСМ-ТМ 2:1 (условия проведения: T=20 °C, влажность 50 %, радиус частиц 0,25 см)

Для более полного анализа эффективности материала необходимо провести изучение кинетики адсорбции им паров воды. На рис. 1 представлены кинетические зависимости адсорбции по воде исходного КСКг и КСМ в сравнении с модифицированными КСКг-ТМ 2:1 и КСМ-ТМ 2:1.

Из представленных зависимостей видно, что модифицированный силикагель более гидрофобен, чем исходный («чистый»), поглощая меньшее количество воды за фиксированное время. Большая гидрофобность позволяет лучше улавливать органические соединения из влажных газовых потоков. Параметры кинетики адсорбции H₂O, вычисленные по рис. 1, приведены в табл. 2.

Для испытаний при поглощении из потока был выбран бензол, потому что он имеет небольшие размеры молекул, что делает его идеальным для оценки адсорбции в микропорах, ответственных за эффективность силикагелей при улавливании летучих органических соединений. Рисунок 2 показывает, насколько хорошо силикагель поглощает бензол и вещества с аналогичными размерами молекул.

Таблица 2. Показатели кинетики для КСКг-ТМ 2:1, КСМ-ТМ 2:1 и чистых КСКг и КСМ при адсорбции паров воды

Показатели	КСКг-ТМ 2:1 Час выдержки	КСМ-ТМ 2:1 Час выдержки	КСКг чистый	КСМ чистый
Равновесная ёмкость A _m , мг/г	11	20	70	110
Константа скорости K, мин ⁻¹	0,05	0,02	0,04	0,03
Коэффициент внутр. диффузии Di, см ² /г	1,9·10 ⁻⁴	1,2·10 ⁻⁴	1,8·10 ⁻⁴	1,7·10 ⁻⁴
Критерий Bio	2,92	3,29	2,39	2,43

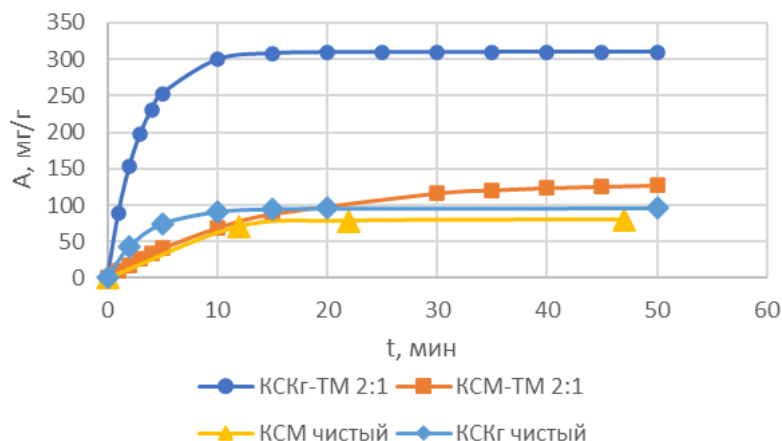


Рис.2. Кинетические зависимости адсорбции паров бензола с помощью КСКГ, КСКГ-ТМ 2:1, КСМ, КСМ-ТМ 2:1 (условия проведения: $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, влажность 50%, радиус частиц 0,25 см)

На рисунке 2 видно, что модифицированный силикагель КСКГ-ТМ 2:1 поглощает гораздо больше молекул бензола, чем чистый силикагель: A_m (КСКГ-ТМ 2:1) = 300 мг/г; A_m (КСКГ чистый) = 100 мг/г.

Таблица 3. Сравнение показателей для КСКГ-ТМ 2:1, КСМ-ТМ 2:1 и чистых КСКГ и КСМ при адсорбции паров бензола

Показатели	КСКГ-ТМ 2:1 Час выдержки	КСМ-ТМ 2:1 Час выдержки	КСКГ чистый	КСМ чистый
Равновесная ёмкость A_m , мг/г	300	129	100	80
Константа скорости K , мин ⁻¹	0,34	0,08	0,30	0,20
Коэффициент внутр. диффузии D_i , см ² /г	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Критерий Bio	3,83	3,13	3,01	4,07

Из таблиц 2 и 3 следует, что константы скорости уравнения первого порядка при сравнимых коэффициентах диффузии позволяют сделать предположение об интенсификации процесса диффузии внутри зёрен сорбента в случае модификации силикагеля трансформаторным маслом.

Заключение

Модифицированный трансформаторным маслом силикагель крупного зёрнения (КСКГ-ТМ 2:1) имеет более высокую ёмкость по парам C_6H_6 при поглощении из воздушного потока, чем чистый КСКГ. При этом данный сорбент сохраняет высокую прочность при истирании.

Увеличение времени выдерживания с 30 минут до 1 часа при модификации силикагеля позволяет примерно на 20% повысить показатель гидрофобности для сорбента КСКГ-ТМ, в то время как

для силикагеля мелкого зёрнения этот показатель не изменяется.

Список литературы

1. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники // 2-е изд., перераб., доп. — М.: Химия, 1984. — 591 с.
2. Курилкин А.А., Петров А.С., Нистратов А.В. Новый способ модифицирования силикагелей для повышения гидрофобности их поверхности // Вестник науки №9 (78) том 5, 2024. — с. 424 - 429.
3. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло // М. Энергоатомиздат, 1983. — 296 с.
4. Кольшкин Дмитрий Алексеевич. Активные угли: Свойства и методы испытаний: Справочник // Д. А. Кольшкин, К. К. Михайлова ; Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Т. Г. Плаченова. — Ленинград : Химия. Ленингр. отд-ние, 1972. — 57 с.

УДК 579.24

Павленко Е.О., Кускова А.В., Морозова Е.А., Шагаев А.А., Марквичев Н.С.

Исследование колонизации корневой системы огурца бактериями рода *Streptomyces* sp. и *Pseudomonas* sp.Павленко Екатерина Олеговна¹, магистрант 1-го года обучения кафедры биотехнологии;
yekaterina_pavlenko_2002@mail.ru.Морозова Екатерина Андреевна¹, аспирант 1-го года обучения кафедры биотехнологии;Кускова Алиса Владимировна¹, студент бакалавриата 4-го года обучения кафедры биотехнологии;Шагаев Антон Александрович¹, к.б.н., ассистент кафедры биотехнологии;Марквичёв Николай Семёнович¹, к.т.н., доцент, доцент кафедры биотехнологии;¹ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,
Россия, Москва, 125480, улица Героев Панфиловцев, дом 20.

В статье оценивалась способность *Pseudomonas fluorescens* B1015 и *Streptomyces rimosus* B1204 колонизировать корневую систему огурца, а также изучалось взаимодействие данных микроорганизмов с *Rhizobium radiobacter* B2206 при начальных этапах формирования ризосферы. В результате исследования было показано, что *Pseudomonas fluorescens* B1015 и *Streptomyces rimosus* B1204 способны колонизировать корневую поверхность огурца при обработке семенного материала исследуемыми клетками, при этом они также обладают конкурирующей способностью по отношению к *Rhizobium radiobacter* B2206, как на богатой питательной среде, так и при недостатке компонентов питания на поверхности корневой системы.

Ключевые слова: *Rhizobium radiobacter*, *Streptomyces rimosus*, агенты биологического контроля, формирование ризосферы, колонизация

Investigation of colonization of the cucumber root system by bacteria of the genus *Streptomyces* sp. and *Pseudomonas* sp.

The article evaluated the ability of *Pseudomonas fluorescens* B1015 and *Streptomyces rimosus* B1204 to colonize the cucumber root system, and also studied the interaction of these microorganisms with *Rhizobium radiobacter* B2206 during the initial stages of rhizosphere formation. As a result of the study, it was shown that *Pseudomonas fluorescens* B1015 and *Streptomyces rimosus* B1204 are able to colonize the root surface of cucumbers when processing seed material with the studied cells, while they also have a competitive ability with respect to *Rhizobium radiobacter* B2206, both on a rich nutrient medium and with a lack of nutritional components on the surface of the root system.

Введение

Ризосфера — это очень сложная экосистема, состоящая из узкой зоны богатой питательными веществами почвы или другого субстрата, которая окружает корни растений и находится под их влиянием. Она густо заселена разнообразными микроорганизмами, включая грибы, бактерии, простейшие, нематод и беспозвоночных [1]. Корни растений выделяют целый ряд первичных метаболитов, например, органические кислоты, углеводы и аминокислоты, и вторичных метаболитов, например, алкалоиды, терпеноиды и фенолы, которые, как считается, формируют, сигнализируют, препятствуют развитию или каким-то образом влияют на микрофлору ризосферы [2].

В отличие от природных субстратов, которые являются естественной средой обитания ризосферных микроорганизмов, минеральная вата, активно используемая в тепличных комбинатах, является абсолютно инертным и стерильным материалом, что говорит об отсутствии сформированного микробного сообщества. Однако в процессе роста растения происходит непрерывная экссудация низкомолекулярных и высокомолекулярных органических соединений [3], что приводит к неизбежному развитию микроорганизмов в минераловатном субстрате, путями переноса которых зачастую служат воздух, вода, семенной материал и др [4]. Такими путями в субстрат могут попадать как сапрофитная или

«полезная» для растения микрофлора, так и фитопатогенная. Так целенаправленное внесение полезных микроорганизмов на начальных этапах развития растения позволит минимизировать или избежать вовсе развитие фитопатогенной микрофлоры за счет образования устойчивого сообщества микроорганизмов, которое будет положительно влиять на растение, снижая при этом влияние абиотических и биотических стрессов. В связи с этим контролируемое формирование ризосферы является важным и значимым этапом при выращивании сельскохозяйственных культур в минераловатных субстратах.

При неконтролируемом развитии биоценоза с водными потоками, используемыми в поливных системах теплиц, в минеральную вату попадают преимущественно грамотрицательные бактерии, в частности *Rhizobium radiobacter* (ранее *Agrobacterium tumefaciens*). Данная бактериальная культура способна образовывать биоплёнку, является возбудителем корончатой галлы у растений, а также приводит к неконтролируемому разрастанию корней, что негативно сказывается на развитии растения ввиду ограниченности объема минераловатного субстрата [5].

Микроорганизмы, используемые для принудительного формирования ризосферы растения, должны отвечать ряду требований, в первую очередь, таким как способностью потреблять корневые экссудаты и быстро их метаболизировать, развиваться

и взаимодействовать с другими микроорганизмами при недостатке компонентов питания, а также свойством колонизации, поскольку преимущество в прикорневой зоне будут иметь именно те микроорганизмы, которые локализованы в зоне наибольшей концентрации доступных питательных веществ, то есть непосредственно на поверхности корневой системы [6]. Таким образом, корень выступает местом взаимодействия микроорганизмов, которые, потребляя органические компоненты корневых экссудатов, выделяют разнообразные метаболиты, оказывая влияние на всю микрофлору и само растение.

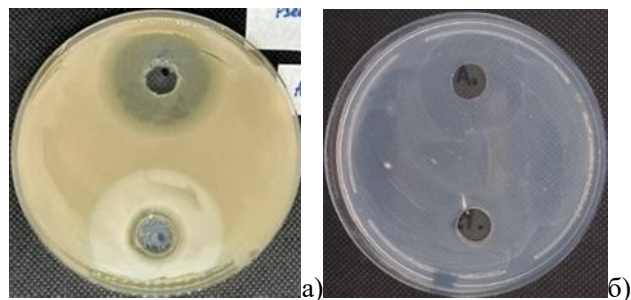
Бактерии рода *Pseudomonas* являются ризосферными микроорганизмами и являются потенциальными агентами биологического контроля. *Pseudomonas* имеют минимальные требования к питательной среде и способны с высокой скоростью метаболизировать растительные экссудаты, что дает значимое преимущество перед другими микроорганизмами [7]. Бактерии рода *Pseudomonas* также способны колонизировать корневую систему и вызывать статистически значимое повышение урожайности, за счет выработки ряда вторичных метаболитов, в частности таких фитогормонов, как индолуксусная кислота, цитокинины, гиббереллины и др [8]. Кроме того, бактерии рода *Pseudomonas spp.* снижают негативное влияние фенолов на развитие растения, которые обнаруживаются в минеральной вате в небольшом количестве [9]. Хотя *Pseudomonas* не обладают бактерицидной или фунгицидной активностью, однако их использование для формирования ризосферы является перспективным.

Еще одну важную группу почвенных микроорганизмов представляют актиномицеты, главным образом из-за того, что они способны вырабатывать метаболиты, которые обладают бактерицидной и фунгицидной активностью, а также обладают рядом свойств, стимулирующих рост растений [10]. Помимо этого, они также способны метаболизировать растительные экссудаты [11].

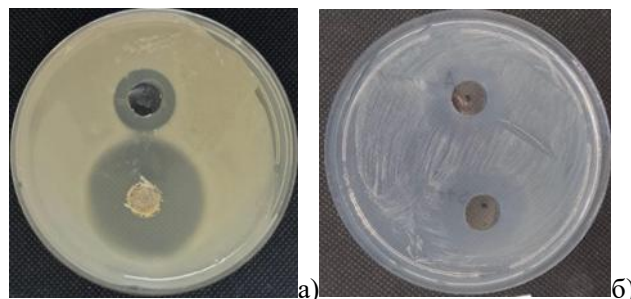
Так как бактерии рода *Pseudomonas* и *Streptomyces*, по литературным данным, обладают большим количеством положительных свойств, использование данных микроорганизмов может быть оправдано для формирования ризосферы на начальной этапе развития растения.

Таким образом для того, чтобы понять, удовлетворяют ли исследуемые микроорганизмы требованиям, предъявляемых агентам биологического контроля с целью формирования ризосферы, а также каким образом они взаимодействуют с фитопатогенной микрофлорой, которая может также принимать участие в формировании ризосферы, в данном исследовании было необходимо оценить способность *Pseudomonas fluorescens* B1015 и *Streptomyces rimosus* B1204 колонизировать корневую систему огурца, а также изучить взаимодействие данных микроорганизмов с *Rhizobium radiobacter* B2206 при начальных этапах формирования ризосферы.

Экспериментальная часть



1 – Антибиотик; 2 – культуральная жидкость *Pseudomonas fluorescens* B1015
Рисунок 1. Антагонистическое действие культуральной жидкости *Pseudomonas fluorescens* B1015 по отношению к клеткам *Rhizobium radiobacter* B2206 на богатой питательной среде L-агар (А) и на агаризованной среде, моделирующей экссудаты огурца (Б)



1 – Антибиотик; 2 – культуральная жидкость *Streptomyces rimosus* B1204
Рисунок 2. Антагонистическое действие культуральной жидкости *Streptomyces rimosus* B1204 по отношению к клеткам *Rhizobium radiobacter* B2206 на богатой питательной среде L-агар (А) и на агаризованной среде, моделирующей экссудаты огурца (Б)

При попадании в естественные условия перед тем, как начать колонизировать поверхность корневой системы, происходит взаимодействие вносимой культуры с присутствующей микрофлорой. В связи с этим важно оценить, каким образом исследуемые микроорганизмы взаимодействуют с той микрофлорой, которая может присутствовать в ризосфере растения. При этом важно учесть, что проявление тех или иных свойств микроорганизмов при их взаимодействии зависит от множества факторов, в первую очередь от компонентов питания и их концентрации в среде, в которой непосредственно происходит взаимодействие. Таким образом, на первом этапе исследования нами было решено исследовать способность *Pseudomonas fluorescens* B1015 и *Streptomyces rimosus* B1204 проявлять антагонистическую активность по отношению к *Rhizobium radiobacter* B2206 как на стандартной питательной среде при отсутствии лимита по компонентам питания, так и на бедной питательной среде, моделирующей состав корневых выделений. Для этого поверхности богатой питательной среды L-агар и агаризованной

питательной среды, моделирующей экссудаты огурца [12], засекали тест-объектом - *Rhizobium radiobacter* B2206 в концентрации 10^9 КОЕ/мл объемом 200 мкл. Затем, в заранее вырезанные лунки помещали 200 мкл культуральных жидкостей глубинных культур *Pseudomonas fluorescens* B1015 и *Streptomyces rimosus* B1204 с концентрацией 10^9 КОЕ/мл, в контрольные лунки помещали 200 мкл антибиотика – стрептомицина сульфата в концентрации 500 мг/л. Далее Чашки Петри инкубировали при температуре

28°C в течение 24 часов. По окончании инкубации оценивали антагонистическое действие *Pseudomonas fluorescens* B1015 и *Streptomyces rimosus* B1204 по отношению к *Rhizobium radiobacter* B2206, для этого проводили замер радиуса зоны задержки роста тест-объекта с последующим вычетом радиуса лунки.

Результаты представлены на рисунках 1-2 и в таблице 1.

Таблица 1. Радиусы зон задержки роста *Rhizobium radiobacter* B2206 клетками *Streptomyces rimosus* B1204 и *Pseudomonas fluorescens* B1015

Питательная среда	Микроорганизм	Радиус r, мм	
		Антибиотик	Культуральная жидкость
L-агар	<i>P. fluorescens</i> B1015	7±0,5	2±0,5
	<i>S. rimosus</i> B1204	6±0,5	12±0,5
Модель экссудатов	<i>P. fluorescens</i> B1015	7±0,5	0±0,5
	<i>S. rimosus</i> B1204	7±0,5	10±0,5

Из результатов представленных на рисунках 1-2 и в таблице 1 видно, что в случае *Pseudomonas fluorescens* B1015 наблюдалась незначительная задержка роста бактерий *Rhizobium radiobacter* B2206, однако отмечалось нарастание клеток *Pseudomonas fluorescens* B1015 поверх тест-культуры. В случае клеток *Streptomyces rimosus* B1204 радиусы зон задержки роста *Rhizobium radiobacter* B2206 превышали значений контрольных вариантов, как на богатой питательной среде, так и на среде, моделирующей корневые экссудаты. Таким образом, можно предположить, что *Streptomyces rimosus* B1204 обладает антагонистической активностью по отношению к *Rhizobium radiobacter* B2206, тогда как *Pseudomonas fluorescens* B1015 не проявляет бактерицидных свойств к исследуемой тест-культуре, однако способна конкурировать за питательные вещества, вероятно, из-за высокой скорости роста.

Антагонистическая активность, рассмотренная на первом этапе, играет не малую роль в процессе колонизации, однако на втором этапе исследования необходимо оценить непосредственно способность колонизировать корневую систему исследуемыми микроорганизмами, причем в условиях непрерывного выделения экссудатов, и, соответственно, непрерывного их потребления. Для этого подготавливали пробирки со стерильным

минеральным раствором, куда на слой фильтровальной бумаги выкладывали семена огурца гибрида F₁ Бьерн, обработанные суспензией клеток в концентрации 10^6 КОЕ/мл в течение 1,5 минут *Pseudomonas fluorescens* B1015, или *Streptomyces rimosus* B1204, или *Rhizobium radiobacter* B2206, или совместно в соотношении 1:1 *Pseudomonas fluorescens* B1015 и *Rhizobium radiobacter* B2206, *Streptomyces rimosus* B1204 и *Rhizobium radiobacter* B2206. Количество нанесенных клеток на поверхность семечка определяли путем погружения его в 10 мл физиологического раствора и последующем определении количества клеток, смытых в физиологический раствор, методом последовательных разведений (метод Коха). После обработки семена проращивали в течение 7 суток при постоянном освещении и температуре 25 °С. На 4,5,6,7 сутки производили десорбцию клеток с корневой системы огурца путем последовательного погружения в девять пробирок с 10 мл физиологического раствора, выдерживая корень в каждой пробирке в течение 1,5 минут. Концентрацию десорбированных с корня клеток определяли методом Коха.

Результаты представлены в таблице 2 и на рисунках 3-6.

Таблица 2. Количество клеток исследуемых бактериальных культур на поверхности корневой системы огурца в различные дни проращивания

Вариант обработки семян	Количество клеток, нанесенное на поверхность семечка, КОЕ/семечко		Общее количество десорбированных клеток с поверхности корневой системы, КОЕ/корень			
			4 сутки	5 сутки	6 сутки	7 сутки
<i>S. rimosus</i>	10		1*10 ³	2*10 ⁴	3*10 ⁴	2*10 ⁵
<i>S. rimosus</i> + <i>R. Radiobacter</i>	<i>S. rimosus</i>	10	1*10 ³	3*10 ³	3*10 ³	5*10 ³
	<i>R. radiobacter</i>	1*10 ⁴	4*10 ⁵	9*10 ⁵	4*10 ⁶	4*10 ⁶
<i>R. radiobacter</i>	1*10 ⁴		1*10 ⁵	4*10 ⁵	9*10 ⁵	4*10 ⁶
<i>P. fluorescens</i>	1*10 ⁴		2*10 ⁵	9*10 ⁵	3*10 ⁶	3*10 ⁶
<i>P. fluorescens</i> + <i>R. Radiobacter</i>	<i>P. fluorescens</i>	1*10 ⁴	3*10 ⁵	8*10 ⁵	3*10 ⁶	3*10 ⁶
	<i>R. radiobacter</i>	1*10 ⁴	2*10 ⁴	2*10 ⁴	1*10 ⁴	1*10 ⁴



Рисунок 3. Корневая поверхность огурца на 7 сутки проращивания при обработке семечка клетками *S. rimosus* B1204, выложенная на поверхность агаризованной питательной среды L-агар после 9 цикла десорбции



Рисунок 4. Корневая поверхность огурца на 7 сутки проращивания при обработке семечка клетками *S. rimosus* B1204 и *R. radiobacter* B2206, выложенная на поверхность агаризованной питательной среды L-агар после 9 цикла десорбции



Рисунок 5. Корневая поверхность огурца на 7 сутки проращивания при обработке семечка клетками *P. fluorescens* B1015, выложенная на поверхность агаризованной питательной среды L-агар после 9 цикла десорбции



Рисунок 6. Корневая поверхность огурца на 7 сутки проращивания при обработке семечка клетками *P. fluorescens* B1015 и *R. Radiobacter* B2206, выложенная на поверхность агаризованной питательной среды L-агар после 9 цикла десорбции

Из результатов, представленных в таблице 2 видно, что при обработке семян культуральной жидкостью *Pseudomonas fluorescens* B1015 количество клеток на поверхности корневой системы огурца возрастает по мере развития растения, при этом рост концентрации целевой культуры также наблюдается при совместной обработке семян клетками *Pseudomonas fluorescens* B1015 и *Rhizobium radiobacter* B2206, тогда как концентрация последних не изменяется. В случае обработки семян культуральной жидкостью *Streptomyces rimosus* B1204 также наблюдается увеличение концентрации клеток на поверхности корня в процессе его развития, как в индивидуальном варианте, так и при совместной обработке с бактериальной культурой *Rhizobium radiobacter* B2206, однако концентрация последней преобладает над целевой культурой. Также на рисунках 3-6 можно заметить, что после 9 циклов десорбции и выкладывания на стандартную питательную среду клетки *Pseudomonas fluorescens* B1015 и *Streptomyces rimosus* B1204 обнаруживаются на поверхности корневой системы огурца. Таким образом, можно предположить, что *Pseudomonas fluorescens* B1015 и *Streptomyces rimosus* B1204 в условиях данного эксперимента на ранних этапах проращивания семян огурца способны развиваться, потребляя растительные экссудаты, как в одиночном

варианте, так и при наличии посторонней микрофлоры, а также способны задерживаться на поверхности корневой системы огурца.

Заключение

Как фактор колонизации было исследовано взаимодействие *Pseudomonas fluorescens* B1015 и *Streptomyces rimosus* B1204 с представителем ризосферы микрофлоры *Rhizobium radiobacter* B2206 и показано, что они проявляют конкурирующую способность при взаимодействии с данным микроорганизмом как на богатой питательной среде, так и при недостатке компонентов питания, при этом клетки *Streptomyces rimosus* B1204 проявляют выраженную антагонистическую активность по отношению к тест-культуре. При изучении колонизации показано, что при обработке семенного материала огурца клетками *Pseudomonas fluorescens* B1015 и *Streptomyces rimosus* B1204 исследуемые микроорганизмы развиваются совместно с растением и полностью колонизируют поверхность корневой системы. При этом при изучении совместной колонизации с ризобийной микрофлорой, которая также может присутствовать на поверхности семенного материала, было показано, что *Pseudomonas fluorescens* B1015 и *Streptomyces rimosus* B1204 также проявляют конкурирующие свойства по отношению к *Rhizobium radiobacter*

B2206, при этом при совместной колонизации *Pseudomonas fluorescens* B1015 с *Rhizobium radiobacter* B2206, наблюдается значительный прирост целевой культуры, тогда как концентрация клеток ризобияльной микрофлоры не изменяется. Таким образом, за счет свойств, показанных в данном исследовании, *Pseudomonas fluorescens* B1015 и *Streptomyces rimosus* B1204 оправдано применять для формирования ризосферы на ранних этапах развития растения, что в свою очередь снизит влияние биотических и абиотических стрессов и в целом повысить эффективность растениеводства в защищенном грунте.

Список литературы

1. Ling N., Wang T., Kuzyakov Y. Rhizosphere bacteriome structure and functions //Nature communications. – 2022. – Т. 13. – №. 1. – С. 836.
2. Berendsen R. L., Pieterse C. M. J., Bakker P. A. H. M. The rhizosphere microbiome and plant health //Trends in plant science. – 2012. – Т. 17. – №. 8. – С. 478-486.
3. Vives-Peris V. et al. Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond //Plant cell reports. – 2020. – Т. 39. – №. 1. – С. 3-17.
4. Бехбудзада Н. Б., Минич М. В., Селиванов И. О., Шагаев А.А., Журавлева А.С., Горюнова О. Б., Васильев В. В., Куренин А. В., Марквичев Н.С. Минеральная вата нового поколения — формирование микробного ценоза // Гавриш. - № 3. - с. 42-45
5. Ramey B. E. et al. Biofilm formation in plant-microbe associations //Current opinion in microbiology. – 2004. – Т. 7. – №. 6. – С. 602-609.
6. Gregory P. J. Roots, rhizosphere and soil: the route to a better understanding of soil science? //European journal of soil science. – 2006. – Т. 57. – №. 1. – С. 2-12.
7. Морозова Е.А., Журавлева А.С., Шагаев А.А., Марквичев Н.С. Оценка свойств различных штаммов *Pseudomonas fluorescens* как агента биологического контроля // сборник Успехи химии и химической технологии. – 2023. - том 37. – с. 115-119.
8. Sahu B. et al. *Pseudomonas fluorescens* PGPR bacteria as well as biocontrol agent: A review //International Journal of Chemical Studies. – 2018. – Т. 6. – №. 2. – С. 01-07.
9. Реутова Т. О., Скосырев Д. К. Минеральная вата-отличный субстрат для растений //Гавриш. – 2011. – №. 6. – С. 30-32
10. Писаревская В.А., Ребрина А.С., Шагаев А.А., Марквичев Н.С. Исследование колонизации корневой системы томата бактериями рода *Streptomyces* при выращивании в минераловатных субстратах // сборник Успехи химии и химической технологии. – 2023. - том 37. – с. 129-131.
11. Vurukonda S. S. K. P., Giovanardi D., Stefani E. Plant growth promoting and biocontrol activity of *Streptomyces* spp. as endophytes //International journal of molecular sciences. – 2018. – Т. 19. – №. 4. – С. 952.
12. Писаревская В.А., Журавлева А.С., Бехбудзада Н.Б., Шагаев А.А., Марквичев Н.С. Поверхностное культивирование грибов рода *Trichoderma* на средах, моделирующих экссудаты *Cucumis sativus* // сборник Успехи в химии и химической технологии. – 2021. - том 35. - № 12. - с. 164-167.

УДК 628.316.12

Пересунько Ю. Д.¹, Азопков С. В.¹**Оценка эффективности дефторирования сточных вод с использованием промышленных отходов**Пересунько Юлия Дмитриевна – магистрант 1-го года обучения кафедры промышленной экологии; yperesunko@mail.ru,

Азопков Сергей Валерьевич – к.т.н., заведующий лабораторией кафедры промышленной экологии;

¹ ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

Исследована возможность применения промышленных отходов (пыли газоочистки электросталеплавильного производства и фосфомела) в качестве альтернативы традиционному известковому молоку для очистки высококонцентрированных фторсодержащих сточных вод (14,5 г/дм³). Установлено, что при соотношении $\text{Ca/F} = 1,25$ известковое молоко обеспечивает остаточную концентрацию фторидов 175 мг/дм³, тогда как отходы демонстрируют меньшую эффективность (для фосфомела - 5400 мг/дм³, пыль газоочистки ЭСПП – 1990 мг/дм³). Методами рентгенофазового анализа подтверждено образование малорастворимых фторсодержащих соединений (CaF_2 , Ca_2SiO_4). Результаты показывают перспективность использования отходов на первой стадии очистки, но указывают на необходимость дополнительной доочистки для достижения нормативных показателей.

Ключевые слова: сточные воды, фториды, фосфомел, пыль газоочистки, осаждение

Assessment of the effectiveness of wastewater defluorination using industrial wastePeresunko Y. D.¹, Azopkov S. V.¹¹ D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Russian Federation, Moscow

The possibility of using industrial waste (gas purification dust from electric steelmaking and phosphomel) as an alternative to traditional lime milk for the treatment of highly concentrated fluorinated wastewater (14,5 g/dm³) has been investigated. It was found that at a ratio of $\text{Ca/F} = 1,25$, lime milk provides a residual fluoride concentration of 175 mg/dm³, while waste shows lower efficiency (for phosphomel - 5400 mg/dm³, ESPP gas purification dust – 1990 mg/dm³). The formation of poorly soluble fluorinated compounds (CaF_2 , Ca_2SiO_4) has been confirmed by X-ray phase analysis methods. The results show the prospects of using waste at the first stage of purification, but indicate the need for additional post-treatment to achieve regulatory targets.

Keywords: wastewater, fluorides, phosphomel, gas purification dust, precipitation

Введение

Быстрый рост населения и промышленности увеличивает нагрузку на производства, потребляющие огромное количество ресурсов, и, в особенности, чистой пресной воды, что в свою очередь усиливает негативное воздействие на окружающую среду из-за большого объема образующихся сточных вод и промышленных отходов.

Основными источником образования фторсодержащих сточных вод являются цветная металлургия (производство алюминия), химическая (производство минеральных удобрений, фосфорной кислоты), в меньшей степени к ним относятся производства стекла и полупроводников [1].

Сброс производственных сточных вод, содержащих фториды, на городские очистные сооружения приводит к ингибированию ключевых биохимических процессов, таких как нитрификация и денитрификация. Экспериментальные данные свидетельствуют, что при концентрации фторидов свыше 20 мг/дм³ эффективность нитрификации снижается на 30–50% [2]. Это обусловлено токсичным воздействием фторид-ионов на нитрифицирующие бактерии, что нарушает работу биологических очистных систем.

Ужесточение экологических нормативов, в частности требований к допустимому сбросу, связано с высокой токсичностью и способностью фторидов

накапливаться в водных экосистемах. Превышение установленных нормативов допустимого сброса ведёт к значительным штрафным санкциям и росту эксплуатационных затрат предприятий. В частности, сверхнормативный сброс фторидов требует дополнительных финансовых расходов на оплату экологических платежей и усложняет процесс согласования разрешительной документации.

В связи с этим, совершенствование технологий очистки фторсодержащих сточных вод представляет собой важную научно-практическую задачу. Оптимизация существующих методов (осаждение, сорбция, ионный обмен) и внедрение комбинированных схем очистки позволят минимизировать экологические риски и снизить экономические издержки промышленных предприятий.

На практике существует несколько способов дефторирования сточных вод:

- Ионный обмен, осуществляемый в проточных ионообменных фильтрах с загрузкой анионообменной смолы. Чаще всего, данный метод может быть применим для удаления фторидов при их начальном содержании до 5 мг/дм³. В процессе очистки сточных вод с содержанием фторидов более 10 мг/дм³, эффективность ионного обмена снижается до 60% и требуется больше циклов регенерации. Недостатками метода являются образование больших объемов промывных вод с высоким содержанием

фторидов до 500-1000 мг/дм³ и, как следствие, возникает необходимость решать проблему утилизации промывной воды и регенерирующих растворов [3].

- Баромембранные методы – частный случай их – обратный осмос. Применяется крайне редко ввиду того, что очистка высокофтористых сточных вод сопровождается образованием нерастворимых соединений с алюминием или кальцием, снижая проходимость мембран, повышая рабочее давление для поддержания эффективности процесса обессоливания [4].

- Реагентные методы, включающие осаждение с использованием солей кальция или магния, или коагуляцию с применением солей алюминия/ железа/ титана или магния [5-7]. С точки зрения эффективности и минимальных реагентных затрат первому этапу в процессе дефторирования высокофтористых сточных вод принадлежит реагентное осаждение Ca/Mg с последующей доочисткой коагуляционным способом с использованием традиционных или комплексных реагентов. Применение традиционных реагентов

(Ca(OH)₂, CaO, Mg(OH)₂, MgO, соли алюминия или железа) для дефторирования сточных вод с высоким содержанием фторидов весьма эффективно (до 90-95%), однако, перспективным направлением является вовлечение вторичных отходов производств в качестве альтернативных реагентов для очистки воды [8-10]

Учитывая высокую экологическую опасность фторсодержащих сточных вод и экономические затраты, связанные с их очисткой, целью данной работы является сравнительный анализ эффективности традиционного реагента – известкового молока и альтернативных материалов – отходов промышленных производств в процессе дефторирования.

Материалы и методы исследования

В качестве реагентов-осадителей использовали:

- пыль газоочистки выбросов электросталеплавильных печей (ЭСПП);
- фосфомел (побочный продукт жидкфазной конверсии фосфогипса в сульфат аммония) [18].

Состав отходов, апробируемых в работе, представлен в таблице 1.

Таблица 1. Состав промышленных отходов (в пересчете на оксиды металлов)

Оксиды металлов	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Др.
Фосфомел	1,8	1,3	0,9	35,5	1,50	59,0
Пыль	10,4	11,0	18,4	18,0	0,3	41,9

В качестве традиционного кальцийсодержащего реагента применяли 10 %-ное известковое молоко.

Количество известкового молока для дефторирования варьировали в зависимости от соотношения Ca/F от 0,25 до 2,0. Время контакта 10 минут. Содержание фторидов определяли в надосадочной части после отделения осадка через фильтр «синяя лента».

Содержание фторид-ионов определяли в соответствии методикой ПНД Ф 14.1:2:4.270-2012.

В качестве объекта исследования использовали сточную воду, образующуюся в результате очистки газовых выбросов производства экстракционной фосфорной кислоты, с исходным содержанием фторидов 14,5 г/дм³ и значением pH 2,1.

Обсуждение результатов

Результаты апробации кальцийсодержащего реагента и исследуемых отходов производств в процессе дефторирования, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Остаточные концентрации фторид-ионов после очистки

Соотношение: Реагент/F	Остаточное содержание F ⁻ , мг/дм ³		
	Пыль	Фосфомел	Известковое молоко
Исх.	14 500 мг/дм ³		
0,25	9884,3	10440,4	310,0
0,50	8121,3	9840,0	278,1
0,75	5346,7	9360,5	267,2
1,0	5102,5	8280,1	193,0
1,25	3985,5	7680,3	175,3
1,5	2183,8	6840,7	189,2
1,75	2015,5	6360,9	179,7
2,0	1990,5	5400,2	181,0

Из данных таблицы 2, установлено, что применение отходов производств, в частности, побочного продукта переработки фосфогипса и сталеплавильного производства, могут являться альтернативными реагентами для первой стадии дефторирования высокофтористых сточных вод. Вовлечение апробируемых отходов производств в

процессе удаления фторидов из сточных вод позволит значительно снизить реагентные затраты индивидуального применения известкового молока. Однако, несмотря на высокие показатели эффективности, остаточное содержание фторид-ионов по-прежнему остается высоким для сброса в

водный объект либо возврата в водооборотный цикл предприятия.

Использование промышленных отходов в качестве реагентов для очистки сточных вод позволяет не только снизить затраты на утилизацию вторичных материалов, но и минимизировать потребление первичных реагентов, что соответствует принципам экономики замкнутого цикла.

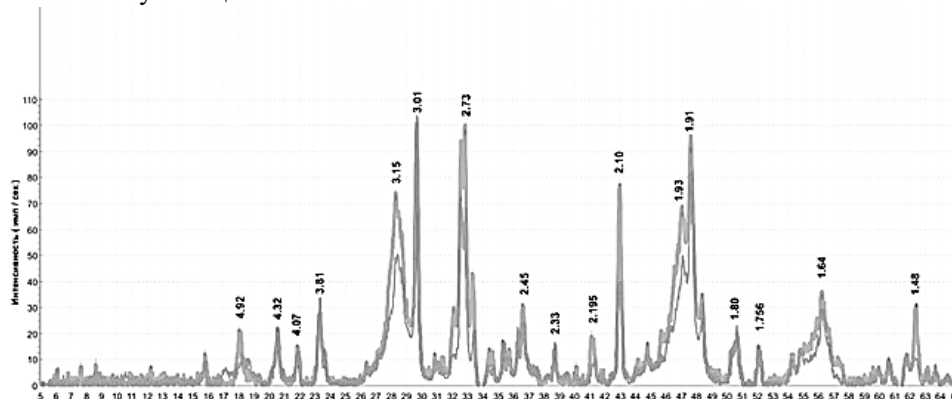


Рис. 1. Дифрактограмма фазового состава осадков пыли и фосфомела после дефторирования

На основании данных, представленных на рис. 1, установлено, что использование пыли после абсорбционной очистки и фосфомела, способствует образованию малорастворимых фторсодержащих соединений (CaF_2 20-25%, Ca_2SiO_4 (40-45%), $11\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaF}_2$ (35%)).

Заключение

В ходе проведенных исследований был изучен процесс удаления фторид-ионов методом химического осаждения из высококонцентрированных сточных вод с исходным содержанием фторидов $14,5 \text{ г/дм}^3$.

Исследования показали, что применение 10%-ной суспензии гидроксида кальция обеспечивает минимальную остаточную концентрацию фторид-ионов (175 мг/дм^3) в очищенной воде.

Продемонстрирована возможность эффективного использования техногенных отходов сталеплавильного производства и процесса переработки фосфогипса в качестве реагентов-осадителей.

Результаты экспериментов подтвердили возможность применения различных отходов в качестве альтернативного кальцийсодержащего реагента для дефторирования сточных вод, позволяющего существенно сократить расход известкового молока.

Однако, остаточные количества фторидов после всех исследуемых реагентов в рамках данной работы, все еще остаются высокими и требуется провести дополнительные исследования для поиска наилучших комбинированных методов дефторирования сточной воды.

Список литературы

1. De Mello Santos V.H., Campos T.L.R., Espuny M. et al. Towards a green industry through cleaner production development // *Environmental Science and Pollution Research (ESPR)*. 2022. V. 29. P. 349–370.

С целью определения состава основного продукта процесса дефторирования сточной воды пылью и фосфомелом, исследовали фазовый состав образующихся осадков после применения отходов производств. Результаты представлены на рисунке 1

2. Wang J., Zhang P. Inhibition kinetics of fluoride on nitrifying sludge in wastewater treatment // *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 362. P. 327–334.

3. Millar G. J., Couperthwaite S. J., Wellner D. B. [et al.]. Removal of fluoride ions from solution by chelating resin with imino-diacetate functionality // *Journal of Water Process Engineering*. 2017. V. 20. P. 113–122.

4. Yangbo Q., Long-Fei R., Jiahui S., Lei X., Yan Z. An integrated separation technology for high fluoride-containing wastewater treatment: Fluoride removal, membrane fouling behavior and control // *Journal of Cleaner Production*. 2022. V. 349. P. 131225.

5. Zhang J.F. Fluoride removal by Al, Ti, and Fe hydroxides and coexisting ion effect // *J. Envi-ron. Sci*. 2017. V. 57. P. 190–195.

6. Tafu M. Properties of sludge generated by the treatment of fluoride-containing wastewater with dicalcium phosphate dihydrate // *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. 2016. V. 1. P. 1–8.

7. El Diwani G. Fluoride pollutants removal from industrial wastewater // *Bulletin of the National Research Centre*. 2022. V. 46. № 1. P. 143.

8. Кузин, Е. Н. Получение комплексных коагулянтов на основе крупнотоннажных отходов и продуктов промышленных производств / Е. Н. Кузин, Н. Е. Кручинина // *Цветные металлы*. – 2021. – № 1. – С. 13–18.

9. Кузин, Е. Н. Получение комплексных коагулянтов на основе крупнотоннажных отходов и продуктов промышленных производств / Е. Н. Кузин, Н. Е. Кручинина // *Цветные металлы*. – 2021. – № 1. – С. 13–18.

10. Kuzin, E. N. Use of metallurgical scale in the processes of engineering protection of the environment / E. N. Kuzin, N. E. Kruchinina // *CIS Iron and Steel Review*. – 2022. – Vol. 24. – P. 93–97.

УДК 628.4.036

Петров А.С., Юмашева Ю.Ю., Тихонова И.О.

Возможности использования строительных отходов, образованных при ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде

Петров Андрей Сергеевич – студент 1 курса магистратуры группы МЭ-11 факультета биотехнологии и промышленной экологии.

Юмашева Юлия Юрьевна – студентка 1 курса магистратуры группы МЭ-11 факультета биотехнологии и промышленной экологии.

Тихонова Ирина Олеговна – к.т.н., доцент кафедры промышленной экологии;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В статье рассмотрены современные направления возможного использования строительных отходов, образованных при ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде на примере производственной площадки «Усольехимпром».**Ключевые слова: строительные отходы, переработка, вторичные ресурсы***The possibility of using construction waste generated during the liquidation of accumulated environmental damage facilities**

Petrov A.S., Yumasheva Y.Y., Tihonova I.O.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

*The article discusses the current trends in the possible use of construction waste generated during the liquidation of accumulated environmental damage facilities using the example of the «Usolyokhimprom» production site.**Key words: construction waste, recycling, secondary resources***Введение**

На сегодняшний день в рамках национального проекта «Экологическое благополучие», выполнение задач которого рассчитано на период с 2025 по 2030 год, работают инициативы: «Генеральная уборка», подразумевающая ликвидацию экологически опасных объектов, по данным государственного реестра число которых составляет более тысячи, и «Экономика замкнутого цикла» - развитие системы по обращению с отходами, для повторного вовлечения отходов в производственные циклы в качестве вторичных ресурсов [1, 2].

При ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде, в частности бывших производственных площадок, могут образовываться различные строительные отходы – ценный ресурс, имеющий множество направлений для повторного вовлечения в производственные циклы, в особенности внедрение в новое строительство. Отрасль строительства занимает пятое место по объёму отходов производства и потребления в

годовом исчислении и насчитывает порядка 50 миллионов тонн [3].

Одним из примеров объекта, объединяющего идеи обеих инициатив национального проекта, является территория производственной площадки «Усольехимпром», которая, будучи крупнейшим объектом накопленного вреда окружающей среде, также является значительной ресурсной базой строительных отходов: при сносе и разборке зданий цехов и сопутствующей инфраструктуры образуются строительные отходы IV и V опасности, представляющие интерес в рамках экономики замкнутого цикла [4].

Обзор

По оценочным данным список отходов на производственной площадке «Усольехимпром» насчитывает от 35 до 40 наименований, общий объём отходов составляет более 2,4 миллионов тонн. Наиболее ценные и простые с точки зрения возможности возврата в производственный цикл отходы представлены в таблице 1 [4].

Таблица 1. Оценочное количество отходов на «Усольехимпром»

Наименование отхода	Код по ФККО	Масса, т
Лом кирпичной кладки от сноса и разборки зданий	8 12 201 01 20 5	1 108 421
Лом бетонный, железобетонных изделий в смеси при демонтаже строительных конструкций	8 22 911 11 20 4	1 079 964
Лом и отходы, содержащие незагрязненные черные металлы в виде изделий, кусков, несортированные	4 61 010 01 20 5	45 360
Бой стекла	3 41 901 01 20 5	44 371
Лом асфальтовых и асфальтобетонных покрытий	8 30 200 01 71 4	18 978
Итого:	2 297 094	

Одним из трёх рассматриваемых направлений, представленных на рисунке 1, является передача региональному оператору по обращению с твердыми коммунальными отходами – РТ-НЭО Иркутск [5]. В

первую очередь, региональные операторы осуществляют приём ТКО от абонентов, строительные отходы, за рядом исключений, в сферу их работы не входят.



Рисунок 1. Возможные направления использования и реализации отходов

В таблице 2 представлены отходы, размещение которых возможно на основании лицензии регионального оператора РТ-НЭО Иркутск (лицензия

№Л020-00113-54/00100047) и списку отходов, образующихся на «Усольехимпром».

Таблица 2. Отходы, принимаемые региональным экологическим оператором

Наименование по ФККО	Код по ФККО
Отходы рубероида	8 26 210 01 51 4
Лом асфальтовых и асфальтобетонных покрытий	8 30 200 01 71 4
Трубы, муфты из асбоцемента, утратившие потребительские свойства, незагрязненные	4 55 510 01 51 4
Листы волнистые и плоские, утратившие потребительские свойства, незагрязненные	4 55 510 02 51 4
Грунт, загрязненный нефтью или нефтепродуктами (содержание нефти или нефтепродуктов менее 15%)	9 31 100 03 39 4
Мусор от сноса и разборки зданий несортированный	8 12 901 01 72 4
Упаковка полипропиленовая, загрязненная минералами из классов карбонатов и силикатов	4 38 122 82 51 5

На территории Сибирского федерального округа имеется 22 объекта размещения отходов, на которых возможно размещение части отходов, образованных на производственной площадке «Усольехимпром». Расстояние до них составляет от 20 до 1250 км, до большинства же более 400 км. Перечень отходов, разрешенных к размещению на ОРО, согласно лицензиям, совпадает с перечнем отходов, принимаемых региональным экологическим оператором, представленным в таблице 2, но и включает отходы, внесенные в Перечень видов отходов производства и потребления, в состав которых входят полезные компоненты, захоронение которых запрещается, утвержденный распоряжением Правительства РФ от 25.07.2017 № 1589-р.

В общем случае передача строительных отходов на полигоны или региональному оператору является крайне несовременным подходом. Размещение отходов требует оплаты услуг полигонов или регионального экологического оператора, что увеличивает затраты при сносе и демонтаже. Зачастую при сносе и демонтаже количество отходов значительно, в особенности на крупных объектах, как представлено в таблице 1 – владельцы полигонов не заинтересованы в скором заполнении своих площадей. Строительные отходы могут применяться для вторичного использования и стать более дешевой заменой некоторых строительных материалов.

Основным способом переработки лома бетонного, железобетонных изделий в смеси при демонтаже строительных конструкций и лома

кирпичной кладки от сноса и разборки зданий является получение песка и вторичного щебня в соответствии с ГОСТ 32495-2013 «Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого бетона и железобетона» и ПНСТ 956-2024 «Отходы строительных материалов, образующиеся при сносе зданий. Требования к обращению с отходами силикатных материалов».

Лом асфальтовых и асфальтобетонных покрытий используется для получения переработанного асфальтобетона (РАР) в соответствии с ГОСТ Р 59118.1-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Переработанный асфальтобетон (РАР). Технические условия».

В Иркутской области общая протяженность дорожного покрытия составляет 12 037 км. В рамках федерального проекта «Безопасные качественные дороги» в период с 2017 по 2025 год было уложено 2 440 314 м² дорожного покрытия. Лом бетонный, железобетонных изделий и лом кирпичной кладки могут быть переработаны во вторичный щебень и направлен для укладки дорог. В таблице 3 представлены расчетные данные о возможной площади дорожного покрытия с использованием отходов производственной площадки «Усольехимпром». Для расчёта были выбраны данные о норме расхода материалов на 100 м² дороги и различные значения насыпной плотности получаемого вторичного щебня, значение которого зависит от степени измельчения и однородности материалов.

Таблица 3. Площадь укладки щебня при строительстве дорог в зависимости от насыпной плотности вторичного щебня

	Насыпная плотность, т/м ³								
	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
Площадь укладки, км ² (щебень из бетонного лома)	0,79	0,75	0,72	0,69	0,66	0,63	0,61	0,59	0,56
Площадь укладки, км ² (щебень из кирпичного лома)	0,83	0,79	0,76	0,72	0,69	0,67	0,64	0,62	0,59
Площадь укладки, км ² (щебень из смеси бетонного и кирпичного лома)	1,62	1,55	1,48	1,41	1,35	1,30	1,25	1,20	1,16

Согласно ориентировочным расчётам, образующиеся строительные отходы промышленной площадки могут покрыть от 23% до 67% площади целей проекта «Безопасные и качественные дороги» в зависимости от выбора вторичного щебня [6].

Заключение

Существуют очевидные перспективы в использовании строительных отходов, образованных при ликвидации объектов накопленного вреда. Строительные отходы активно вовлекаются в производственные циклы в крупных региональных центрах, поэтому было бы нерациональным игнорировать ресурсные возможности объектов накопленного вреда и захоранивать ценные материалы.

Объекты накопленного вреда следует рассматривать не только в качестве опасных экологических проблем, но и в качестве законсервированных ресурсных баз, раскрытие которых может помочь в сокращении потребления невозобновляемых ресурсов недр.

Список литературы

1. Национальные проекты. Экологическое благополучие. [Электронный ресурс]. URL: <https://национальныепроекты.рф/new-projects/ekologicheskoe-blagopoluchie/> (дата обращения: 06.10.24)
2. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Государственный реестр объектов накопленного вреда окружающей среде по состоянию на 25.03.2024. [Электронный

ресурс]. URL: <https://clck.ru/3FNToQ> (дата обращения: 19.12.24)

3. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году» [Электронный ресурс]. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/ (дата обращения: 19.12.24)

4. Федеральный экологический оператор Росатом. Общественные обсуждения. Общественные обсуждения по объекту государственной экологической экспертизы – проектной документации «выполнение работ по проектированию ликвидации накопленного вреда окружающей среде на территории городского округа г. Усолье-сибирское Иркутской области. этап 1, включая предварительные материалы оценки воздействия на окружающую среду» от 11.03.2022. Проектная документация. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosfeo.ru/oxrana-prirody/materialyi/> (дата обращения: 06.10.24)

5. РТ-НЭО Иркутск. Учредительные документы. [Электронный ресурс]. URL: <https://rtneo-irk.ru/company/uchreditelnye-dokumenty/index.php> (дата обращения: 20.04.2024)

6. Национальный проект «Безопасные качественные дороги». Иркутская область. [Электронный ресурс]. URL: <https://irkutsk.bkdrf.ru/> (дата обращения: 20.04.2024)

УДК 662.613.1

Писарева А. А., Кунилова И. В.

Оценка влияния обескремнивания на выщелачивание ценных элементов из золошлаковых отходов

Писарева Анастасия Андреевна – магистрант 1-го года обучения кафедры промышленной экологии; anastndrvn@yandex.ru,

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

Кунилова Ирина Валерьевна – к.т.н., старший научный сотрудник;

ФГУН Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Россия, Москва, 111020, Крюковский туп., дом 4.

Исследован процесс кислотного выщелачивания золошлаковых отходов от слоевого сжигания каменного угля с последующим обескремниванием фильтратов гидрофобизирующей кремнийорганической жидкостью. Обоснована целесообразность применения ультразвуковой обработки на стадии выщелачивания элементов. Остаточная концентрация кремния в фильтрате составила 29,7 мг/дм³. Ценными примесными элементами, переходящими в раствор выщелачивания, являются ванадий, кобальт, марганец, скандий, иттрий и цирконий.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, алюминий, выщелачивание, кремний, ультразвуковая обработка

Assessment of the effect of desilicification on the leaching of valuable elements from ash and slag wastePisareva A.A.^{1,2}, Kunilova I. V.²¹ D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Russian Federation, Moscow² Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

The process of acid leaching of ash and slag waste from coal bed combustion with subsequent desilicification of filtrates with a hydrophobic organosilicon liquid was studied. The feasibility of using ultrasonic treatment at the stage of leaching of elements was substantiated. The residual concentration of silicon in the filtrate was 29.7 mg/dm³. Valuable impurity elements passing into the leaching solution are vanadium, cobalt, manganese, scandium, yttrium and zirconium.

Keywords: ash and slag waste, aluminum, leaching, silicon, ultrasonic treatment

Введение

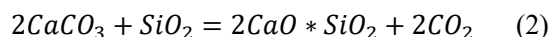
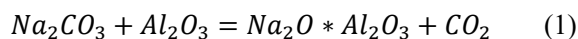
Переход к экономике замкнутого цикла, являющийся одним из важнейших путей решения экологических проблем в России, требует разработки инновационных технологий переработки крупнотоннажных минеральных отходов с получением востребованной продукции [1-3]. Для предприятий теплоэлектроэнергетики актуальной является проблема образования и накопления золошлаковых отходов (ЗШО), образующихся при сжигании твердого топлива. Известные методы использования и переработки ЗШО, включая рекуперацию ценных компонентов, сталкиваются с рядом технологических и других ограничений, сдерживающих их широкое внедрение. Ключевыми проблемами являются нестабильность состава отходов и его несоответствие нормативам при использовании в строительных отраслях, необходимость применения многостадийных схем и сложность разделения фаз при глубокой переработке [4].

Золошлаковые отходы являются многокомпонентной системой, включающей кристаллическую, стекловидную и органическую фазы. Значительное количество ценных неорганических элементов сосредоточено в стекловидной фазе, которая образуется в процессе высокотемпературного сжигания угля (от 900 °C). Последующее охлаждение приводит к формированию стекловидных микросфер, осаждению частиц с образованием агрегатов и других сложных структур,

представленных в основном силикатными, алюмосиликатными и железисто-алюмосиликатными соединениями. В кристаллической фазе ЗШО обычно присутствуют модификации кварца (SiO₂), муллита (3Al₂O₃·2SiO₂) или корунда (Al₂O₃).

Наличие труднорастворимых силикатных и алюмосиликатных соединений влияет на эффективность выщелачивания, снижая реакционную способность ценных элементов, что требует создания агрессивных кислых сред (HF, HCl, HNO₃ и т.д.). В свою очередь, в кислой среде происходит уменьшение заряда поверхности кремнезема, что способствует коагуляции и образованию геля, блокирующего поры материала и замедляющего кинетическую стадию выщелачивания, а также затрудняющего последующее фильтрование кека.

Перспективным подходом к снижению содержания кремния в растворах выщелачивания ЗШО является предварительная термическая обработка материала с различными реагентами. Отделение кремния достигается при использовании соединений кальция за счет образования невыщелачиваемого силиката кальция и перевода алюминия в кальциево/(натриево) – алюминатные фазы (уравнения 1-2), однако данный способ требует поддержания высокой температуры (> 1200 °C) и, следовательно, высоких энергетических затрат [5].



Проведение обжига при значительно более низких температурах без снижения эффективности удаления кремния возможно при условии включения в процесс переработки ЗШО стадии обескремнивания – щелочной обработки фильтратов выщелачивания [6]. Основным недостатком данного метода является повышенный расход щелочных реагентов, обусловленный необходимостью нейтрализации кислот, традиционно применяемых в процессе выщелачивания. Снижение содержания кремния в фильтрате альтернативным способом может быть достигнуто за счет применения органических соединений, в том числе поверхностно-активных веществ. На начальном этапе кислотного выщелачивания золошлаковых отходов аморфный кремнезем частично растворяется с образованием монокремниевой кислоты (H_4SiO_4). Известно, что мономеры конденсируются через стадии образования димеров ($\text{Si}_2\text{O}(\text{OH})_6$) и циклических тетрамеров ($\text{Si}_4\text{O}_8(\text{OH})_8$) до коллоидных наночастиц SiO_2 . Введение в систему различных органических соединений может способствовать агрегации частиц кремнезема и образованию гелеобразной структуры, которую возможно выделить из фильтрата выщелачивания.

Основной целью работы является исследование влияния процесса обескремнивания фильтратов, полученных в результате кислотного выщелачивания золошлаковых отходов, на эффективность извлечения ценных элементов.

Экспериментальная часть

Для проведения эксперимента использовали образцы золошлаковых отходов, полученные при слоевом сжигании каменного угля. Исследуемые образцы отличаются повышенными содержаниями цветных и редких металлов благодаря близости месторождения энергетического каменного угля и различных полиметаллических руд, что делает перспективным исследование комплексного извлечения ценных элементов из данных ЗШО с использованием обогатительно-гидрометаллургических методов [7].

Предварительный щелочной обжиг образцов ЗШО с целью образования растворимых соединений алюминия и других ценных элементов проводили со смесью реагентов KHSO_4 , NaOH , KHCO_3 при увлажнении шихты водой. Кислотное выщелачивание при температуре 70°C проводили растворами H_2SO_4 и HCl в присутствии окислителя. Для интенсификации процесса выщелачивания использовали ультразвуковую обработку при частоте 22 кГц. Параметры обжига и выщелачивания были выбраны аналогично ранее проведенным исследованиям [8].

На первом этапе эксперимента исследовали влияние ультразвуковой обработки, проведенной в растворе кислот и окислителя, на последующее выщелачивание ценных элементов. Анализ содержания элементов в твердой фазе проводили на

энергодисперсионном рентгеновском спектрометре Olympus X-5000. Результаты по извлечению некоторых металлов в фильтраты представлены на рисунке 1.

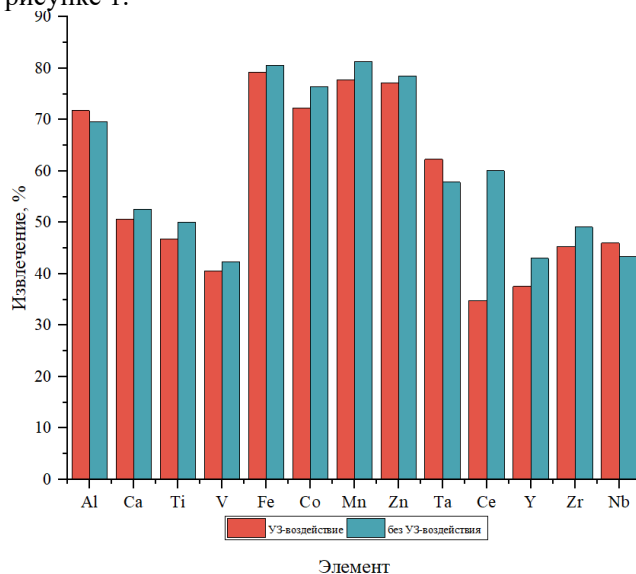


Рис.1. Влияние УЗ-обработки на извлечение элементов в раствор выщелачивания

Анализ результатов, представленных на рис.1, указывает на небольшое повышение извлечения алюминия (до 71,8 %), а также тантала и ниобия в фильтрат при выщелачивании с использованием предварительной ультразвуковой обработки. Данный эффект объясняется способностью ультразвуковых колебаний вызывать образование кавитационных пузырьков в жидкости, создающих локальные высокотемпературные и высоконапорные зоны, что приводит к повышению массопереноса за счет интенсивного перемешивания и улучшению диффузии и контакта реагентов с материалом. Увеличение извлечения вышеуказанных элементов, вероятно, связано также с более эффективным разрушением агрегатов содержащих их минеральных частиц при ультразвуковой обработке. Извлечение железа в фильтрат осталось на прежнем уровне (около 80 %) при его содержании порядка 1 г/дм³. Меньшее извлечение кремния в фильтрат (34,6 %) достигнуто в процессе выщелачивания с использованием ультразвуковой обработки. На основании полученных результатов было принято решение о включении стадии ультразвуковой обработки материалов при выщелачивании ЗШО.

На следующем этапе работы было исследовано влияние концентрации органического флокулирующего реагента - гидрофобизирующей кремнийорганической жидкости (ГКЖ) на эффективность обескремнивания фильтратов выщелачивания. Содержание элементов в фильтратах выщелачивания определяли на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 5800 ICP-OES. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Содержание элементов в фильтрах обескремнивания, мг/дм³

Параметры процесса	Содержание элементов в фильтрате, мг/л										
Доза ГКЖ, об. %	Al	Si	Ca	Ti	V	Fe	Co	Mn	Sc	Y	Zr
0,7	153,7	10,8	24,71	5,11	0,09	56,0	0,13	0,87	0,04	0,03	0,09
1	263,6	29,7	38,2	21,4	0,2	97,2	0,27	1,72	0,07	0,05	0,09

Результаты исследований показывают, что увеличение дозы ГКЖ с 0,7 до 1 об. % приводит к увеличению содержания ценных элементов в фильтрате: алюминия (в 1,72 раза), титана (в 4,19 раза) и железа (в 1,74 раза). При этом наблюдается повышение содержания кремния — с 10,8 до 29,7 мг/дм³, что может свидетельствовать о снижении эффективности извлечения SiO₂ в осадок. При дозе ГКЖ 0,7 об. % достигается минимальная концентрация как кремния, так и целевых компонентов.

Через несколько часов по завершении процесса обескремнивания в фильтрах начинает образовываться гелеобразная структура, что может быть связано с процессом полимеризации растворенного кремнезема. Важно отметить, что при использовании реагента ГФЖ формирующийся гель обладает хорошей фильтруемостью и не требует применения центрифугирования для разделения фаз.

Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию реагентного режима, способствующего эффективному разделению алюмосиликатных соединений и выщелачиванию элементов.

Заключение

По результатам проведенных экспериментов установлена эффективность обескремнивания кислых фильтратов, получаемых при выщелачивании ценных элементов из золошлаковых отходов слоевого сжигания каменных углей, с использованием органических флокулирующих агентов, что позволяет снизить расходы реагентов и количество осадка по сравнению с обескремниванием щелочными реагентами, при котором требуется дополнительная нейтрализация кислых фильтратов. Установлено, что при увеличении расхода ГКЖ с 0,5 до 1 об.% содержание алюминия в фильтрате увеличивается в 1,7 раза. Определено, что при дозе ГКЖ 1 об. % содержание кремния, перешедшего в раствор, составляет 29,7 мг/дм³.

Выявлено положительное влияние ультразвукового воздействия при частоте 22 кГц на извлечение ценных металлов в фильтрат выщелачивания благодаря дезинтеграции алюмосиликатных агрегатов частиц золы и интенсификации перемешивания с реагентами.

В совокупности полученные результаты свидетельствуют о перспективности разработки технологии переработки золошлаковых отходов с

целью извлечения алюминия и ценных элементов. Такой подход, основанный на интеграции вторичных ресурсов в производственный процесс, позволяет снизить нагрузку на природные ресурсы за счет уменьшения использования первичного сырья и сокращения объемов отходов.

Список литературы

1. Кузин, Е. Н. Получение комплексных коагулянтов на основе крупнотоннажных отходов и продуктов промышленных производств / Е. Н. Кузин, Н. Е. Кручинина // Цветные металлы. – 2021. – № 1. – С. 13-18.
2. Оценка возможности использования твердых экстрагентов на основе Д2ЭГФК/ТБФ в процессах извлечения скандия из сернокислотных растворов переработки диопсида / Е. Н. Кузин, Н. Е. Кручинина, А. Д. Зайцева [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 64-67.
3. Нейтрализация сернокислых растворов при комплексной переработке диопсидсодержащих отходов обогащения / Е. Н. Кузин, Н. Е. Кручинина, С. С. Галактионов, А. Н. Краснощеков // Обогащение руд. – 2019. – № 4. – С. 38-43.
4. Лавриненко, А.А. Электросепарация золошлаковых отходов Каширской ГРЭС / А. А. Лавриненко, И.О. Крылов, И.В. Кунилова // Экология и промышленность России. – 2023. – Т. 27, № 11. – С. 28-33.
5. Kumar, A. Processing of Coal Fly Ash for the Extraction of Alumina Values / A. Kumar, S. Agrawal, N. Dhawan // J. Sustain. Metall. – 2020. – V. 6. – P. 294–306.
6. Enhanced desilication of high alumina fly ash by combining physical and chemical activation / Y. Gong, J. Sun, S. Y. Sun [et.al.] // Metals. – 2019. V. 9, № 4. – P. 411.
7. Вергунов, А. В. Минералогия, геохимия и генезис редкометалльного Zr-Nb-Hf-Ta-P3Э-Ga оруденения в пласте XXX Минусинского бассейна/ А. В. Вергунов, С. И. Арбузов, В. В. Ермеева // Известия Томского политехнического университета. – 2020. – Т. 331, № 7. – С. 49-62.
8. Лавриненко, А.А. Влияние низкотемпературного обжига золы сжигания углей с щелочными реагентами на эффективность извлечения ценных компонентов / А. А. Лавриненко, И. В. Кунилова, Г. Ю. Гольберг // ГИАБ. – 2023. – № 10. – С. 104-121.

УДК: 628.16.094.3-926.214

Сахно Е.А., Кениг Л.Л.

Оценка эффективности очистки воды от фуразолидона с помощью озонирования

Сахно Екатерина Андреевна – студент группы Э-41; sahno.ekaterina2003@gmail.com.

Кениг Лидия Леоновна – студент группы Э-41; kenig.lida@yandex.ru.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В работе исследованы процессы окислительной деструкции модельных водных растворов фуразолидона методом озонирования. В ходе исследования анализировалось влияние параметров, таких как концентрация лекарств, расход озона. Результаты показали высокую эффективность очистки, достигающую выше 90%. Приведен график зависимости эффективности озонирования лекарственного препарата от времени озонирования. Проведена оценка токсического влияния исходных и очищенных растворов, подтверждающая эффективность очистки.

Ключевые слова: фуразолидон, озонирование, сточные воды, токсичность.

Evaluation of the efficiency of water purification from furazolidone using ozonation

Sakhno E.A., Kenig L.L.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article examines the processes of oxidative degradation of model aqueous solutions of furazolidone by ozonation.

The study analyzed the influence of parameters such as drug concentration and ozone consumption. The results showed high cleaning efficiency, reaching above 90%. A graph of the dependence of the effectiveness of ozonation of a medicinal product on the ozonation time is given.

Key words: furazolidone, ozonation, wastewater, toxicity.

Введение

На сегодняшний день фармацевтическая индустрия имеет прогрессивное развитие. Огромное количество лекарственных средств, уже превышающее 14,7 тысяч наименований, постоянно пополняется новыми разработками. Однако столь активное производство и широкое использование лекарств создают серьезную экологическую проблему – загрязнение водных объектов фармацевтическими препаратами [1]. Лекарства, попадая в воду, могут изменять структуру, приобретая устойчивые высокотоксичные свойства, образованные соединения могут представлять опасность как для здоровья людей, так и для состояния окружающей среды. Не все традиционные методы очистки являются эффективными в отношении трудноразлагаемых соединений. Перспективным методом очистки сточных вод, содержащих лекарственные препараты, является окисление, оно демонстрирует высокий потенциал в удалении органических соединений и их метаболитов [2]. Обычно применяют методы продвинутого окисления, основанные на активации перекиси водорода, озона или персульфата [3].

Фуразолидон (ФЗ) относится к группе синтетических производных нитрофурана, является противомикробным средством. Субстанция ФЗ представляет собой мелкокристаллический порошок желто-зеленого цвета, запаха не имеет, негигроскопичный [4]. В химической структуре ФЗ ($C_8H_7N_3O_5$) присутствует фуран, имеющий ароматический характер, и нитрогруппа, обеспечивающая антибактериальную активность [5]. Как правило, ФЗ применяется в перорально в таблетках при таких показаниях как дизентерия, лямблиоз и другие заболевания, вызванные микроорганизмами *Escherichia coli*, *Shigella dysenteria*

spp., *Shigella flexneri* spp., *Shigella boydii* spp., *Shigella sonnei* spp., *Salmonella typhi*, *Salmonella paratyphi*, *Staphylococcus* spp.

В случае низких концентраций (до 100 мг/л) органических нитросоединений в сточных водах целесообразно применение деструктивных методов очистки, таких как озонирование [6]. Озон обладает высоким окислительным потенциалом (2,07 В) [7], является мощным окислителем, способным разрушать органические и неорганические соединения при комнатной температуре, при различных концентрациях и значениях pH [6]. При взаимодействии с органическими молекулами озон атакует их двойные связи и активированные ароматические структуры [8]. Озон в генераторе (озонаторе) вырабатывается из кислорода под воздействием электрических разрядов. Воздух или чистый кислород подается в камеру, где под влиянием коронного или ультрафиолетового разряда молекулы кислорода разделяются и формируют молекулы озона. Важно отметить, что при озонировании сточных вод не образуются осадки и нет необходимости в регенерации окислителя. Деструкцию остаточного озона проводят с помощью специальных устройств — деструкторов со слоем катализатора, они разлагают O_3 на кислород.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования использовали модельные водные растворы фуразолидона производства компании «Авексима», Россия, Кемеровская обл., г. Анжеро-Судженск. Для их приготовления таблетки ФЗ тщательно измельчали, после чего взвешивали необходимое количество в пересчете на действующее вещество, далее растворяли в дистиллированной воде с помощью ультразвука в течение 10 минут. Начальная концентрация ФЗ в растворах составляла 10, 15 и 25

мг/л. Определение концентрации проводилось прямым фотометрированием путем измерения оптической плотности растворов при длине волны 370 нм.

Эксперимент проводили на установке, которая включает в себя: генератор О₃ (производительность 1000 мг/ч), колонну для озонирования, деструктор озона, представляющий собой цилиндрический сосуд, заполненный активированным углем. Деструктор присоединен к окислительной колонне и предназначен для сорбции следовых количеств озона и органических веществ, не подвергшихся окончательной деструкции при окислении озоном. Все компоненты соединены силиконовыми трубками. Озоно-воздушная смесь подавалась с расходом 1,5 л/мин. Озонированию подвергался раствор активного фармацевтического соединения (АФС) объемом 50 мл. Для анализа пробы отбирались каждые 5 минут на протяжении 1 часа. После измерения оптической плотности отобранный объем жидкости для анализа возвращали в систему.

На рис. 1 представлены результаты исследования озонирования фуразолидона.

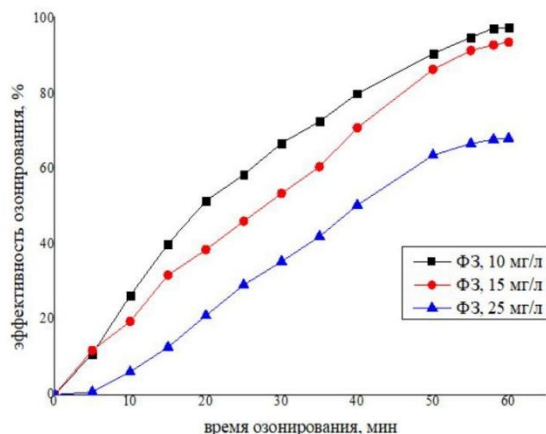


Рисунок 1. Зависимость эффективности озонирования фуразолидона от времени озонирования.

При окислении фуразолидона в течение 60 минут достигается высокая эффективность окисления его водного раствора, содержащего 10 и 15 мг/л, степень очистки составила 97,8 % и 93,9 %, соответственно. В случае обработки более высококонцентрированного раствора – 25 мг/л – максимальная эффективность озонирования (при времени обработка 60 минут) составила 68, 28 %. Установлено, что с увеличением исходной концентрации ФЗ в 2,5 раза (от 10-25 мг/л) эффективность его деструкции при времени обработки 25 минут снижается в 2 раза.

Поскольку фуразолидон относится к фармацевтическим препаратам, обладающим противомикробным действием в отношении как грамположительных, так и грамотрицательных бактерий, необходимо было провести оценку токсического влияния. В качестве объекта исследования был выбран тест-штамм *Escherichia coli* – грамотрицательная палочковидная бактерия, возбудитель кишечных инфекций.

Для проведения эксперимента готовили шесть модельных растворов, содержащих 5% инокулята штамма микроорганизмов и стерильной водопроводной воды. Для определения эффективности бактерицидного действия использовали исходные растворы фуразолидона, не подвергавшиеся обработке, с концентрациями 10, 15 и 25 мг/л. Также подготовили очищенные растворы препарата с соответствующими концентрациями, прошедшие обработку озонированием. Далее модельные растворы смешивались с 50 мл исследуемых растворов.

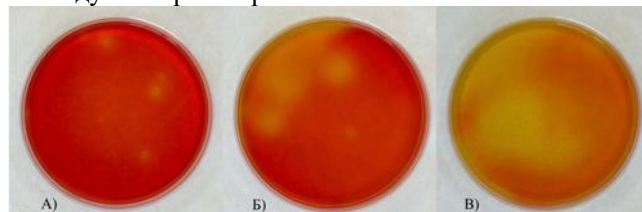


Рисунок 2. Чашки Петри с культурой *E. coli* после обработки исходными растворами фуразолидона с концентрациями: А) 25 мг/л; Б) 15 мг/л; В) 10 мг/л

После чего полученные пробы перемешивались на горизонтальном шейкере при 100 об/мин без дополнительного подогрева в течение 60 минут. Затем проводился прямой высев 1 мл проб на твердую питательную среду ксилоза лизин дезоксихолатный агар (XLD-агар). Посевы проб инкубировали в термостате при температуре (37±1) °С в течение 24 часов. Результаты обработки представлены на рис. 2 и 3.

Полученные результаты, представленные на рисунке 2, подтверждают, что исходные растворы препарата с заданной концентрацией, проявляют высокую противомикробную активность. Раствор с концентрацией 25 мг/л практически полностью ингибирует рост культуры *E. coli*, что подкрепляется отсутствием окраски среды в желтый цвет.

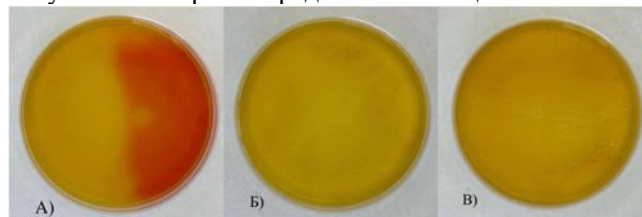


Рисунок 3. Чашки Петри с культурой *E. coli* после обработки очищенными растворами фуразолидона с концентрациями: А) 25 мг/л; Б) 15 мг/л; В) 10 мг/л

По результатам (рис. 3), можно оценить степень очистки фуразолидона озонированием. Продукты деструкции растворов с концентрациями 10 и 15 мг/л не влияют на развитие *E. coli*, что подтверждается сплошным ростом культуры и изменением окраски среды в желтый цвет. Высококонцентрированный раствор – 25 мг/л – даже после очистки остается активным в отношении бактерий.

Заключение

По результатам экспериментов установлено, что озонирование фуразолидона при малых

концентрациях (10-15 мг/л) – эффективный процесс для деструкции данного фармацевтического препарата. АФС после обработки озоном не реагирует на область свечения (370 нм), следовательно, можно предположить, что произошло окисление озоном с последующим разрушением ароматической структуры и хромогенных группы фармацевтического препарата, что, вероятно, приводит к его полному/практически полному разложению. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что продукты деструкции растворов фуразолидона с концентрациями 10 и 15 мг/л не обладают противомикробным действием в отношении культуры *E. coli*, что подтверждает эффективность очистки препарата.

Список литературы

1. Козлова М. А., Щеголькова Н. М. Факторы деградации, трансформации и распределения лекарственных веществ в системе “вода–донные отложения” //Водные ресурсы. – 2023. – Т. 50. – №. 6. – С. 701-709.
2. Квиткова Е. Ю. и др. Окислительная очистка сточных вод фармацевтических производств //Проблемы науки. Химия, химическая технология и экология. – 2022. – С. 689-694.
3. Koundle P. et al. Tetracycline degradation for wastewater treatment based on ozone nanobubbles advanced oxidation processes (AOPs) – Focus on nanobubbles formation, degradation kinetics, mechanism and effects of water composition //Chemical Engineering Journal. – 2024. – Т. 501. – С. 156236.
4. Государственный реестр лекарственных средств: электронный реестр: сайт. — URL: <http://grls.rosminzdrav.ru> (дата обращения 18.05.2025).
5. Беляцкая А. В. Нитрофураны для наружного применения (обзор) //Разработка и регистрация лекарственных средств. – 2019. – Т. 8. – №. 2. – С. 29-38.
6. Белов С. Г., Наумчик Г. О. Исследование деструкции нитрозамещенных органических веществ в водных растворах при озонировании. – 2016. – №. 2. – С. 54-58.
7. Тимонин А. С. Инженерно-экологический справочник. – 2003. – Т. 2. – 883 с.
8. Sharma V. K. Oxidative transformations of environmental pharmaceuticals by Cl₂, ClO₂, O₃, and Fe (VI): kinetics assessment //Chemosphere. – 2008. – Т. 73. – №. 9. – С. 1379-1386.
9. Печенюк Ю. А., Мурашов И. Д. Применение ультразвуковой установки как способ обеззараживания в технологической схеме очистки сточных вод мясокомбината //Евразийский научный журнал. – 2018. – №. 4. – С. 8-10.

УДК 579.66: 579.262: 57.083.132

Сачавский А.А., Яковлева Е.А., Мухамедова Л.Д., Мельник М.Д., Волков В.А., Калёнов С.В.

Совместное культивирование метано- и метилотрофных микроорганизмов в ходе получения биомассы с высоким содержанием белка

Сачавский Александр Александрович – аспирант группы АС-426; sachavski97@gmail.com;

Яковлева Екатерина Алексеевна – студент группы Э-44;

Мухамедова Лилия Дамировна – студент группы МЭ-22;

Мельник Максим Денисович – студент группы МЭ-12;

Волков Вадим Александрович – студент группы Э-34

Калёнов Сергей Владимирович – д.т.н., профессор кафедры биотехнологии; wsezart@yandex.ru;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В работе анализируется возможность увеличения продуктивности культивирования метанотрофных микроорганизмов рода *Methylococcus* для получения биомассы с большим содержанием белка при их совместном выращивании с метилотрофными бактериями. Было установлено, что созданные синтетические сообщества сохраняют свою бинарную структуру после многократных пересевов, а наличие в качестве метанооксиляющего спутника *Methylophilus methylotrophus* и одного из представителей рода *Methylobacterium* (штамм В-5603) положительно влияет на процесс наработки микробной биомассы и демонстрирует необходимость важность исследования взаимодействий в ассоциациях «метанотроф-метилотроф» на уровне конкретных изолятов и штаммов. Анализ содержания состава биомассы чистой культуры и ассоциаций показал увеличение содержания белка более, чем на 7% при совместном культивировании *Methylococcus* sp. со штаммом *Methylobacterium* В-5603. Результаты данного исследования открывают широкие перспективы в области оптимизации и повышения эффективности культивирования метанооксиляющих организмов и сообществ с высоким промышленным потенциалом.*

Ключевые слова: метанотрофы; метилотрофы; метанооксиляющие сообщества; белок одноклеточных организмов.

Co-cultivation of methanotrophic and methylotrophic microorganisms in the production of high-protein biomass.Sachavskii A.A.¹, Yakovleva E.A.¹, Muhamedova L.D.¹, Melnik M.D.¹, Volkov V.A.¹, Kalenov S.V.¹¹ D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

*In this work the potential for enhancing the productivity of cultivating methanotrophic microorganisms of the genus *Methylococcus* to obtain biomass with increased protein content through their co-cultivation with methylotrophic bacteria was analyzed. It was established that the constructed synthetic communities maintain their binary structure after multiple transfers, and the presence of *Methylophilus methylotrophus* as a methanol-oxidizing partner, along with one representative of the genus *Methylobacterium* (strain В-5603), has a positive effect on the microbial biomass accumulation process. This finding underscores the necessity of considering interactions within the "methanotroph-methylotroph" association at the level of specific isolates and strains. Analysis of the biomass composition of pure cultures and associations revealed an increase in protein content by more than 7% during the co-cultivation of *Methylococcus* sp. with *Methylobacterium* strain В-5603. The results of this study open broad prospects for the optimization and enhancement of the cultivation efficiency of methane-oxidizing organisms and communities with high industrial potential.*

Keywords: methanotrophs; methylotrophs; methane-oxidizing communities; single cell protein.

Введение

Метанооксиляющие бактерии (МОБ) широко распространены в различных природных средах и примечательны способностью использовать метан в качестве единственного углеродсодержащего субстрата. За данную особенность метанотрофов отвечают специализированные ферментные комплексы: метанмоноксигеназы (ММО), которые у различных представителей группы присутствуют в мембраносвязанной (рММО) и растворимой форме (sММО). В соответствии с текущей филогенетической классификацией метанотрофные бактерии разделяют на три основных типа (I, II и III), которые также связаны с характерными путями ассимиляции метана после его окисления до метанола и формальдегида в клетках [1]. Уникальность и гибкость метаболизма метанооксиляющих бактерий обуславливает широкий спектр соединений,

производимых данными микроорганизмами, и делает их востребованными в области биотехнологии. Метанотрофы Ia и Ib типа, преимущественно включающие углерод в биосинтетические процессы через рибулозомонофосфатный путь, являются перспективным источником биомассы, содержащей до 80% белка от сухого веса клетки [2]. Установлено, что белковое сырьё, получаемое из данных микроорганизмов по своему аминокислотному профилю сопоставимо с рыбной и соевой мукой, и может применяться в производстве кормовых добавок с доказанной эффективностью для аквакультур, птиц и млекопитающих [3].

В настоящее время всё более актуальными становятся исследования, посвящённые изучению и применению метанотрофных сообществ. Гетеротрофные бактерии, входящие в состав смешанных метанооксиляющих культур, потребляют

промежуточные продукты окисления метана (метанол, формальдегид и формиат), снижая их ингибирующее воздействие, повторно включают в метаболические процессы внеклеточные полимерные вещества и продукты лизиса, образованные клетками МОБ. Известно, что наличие метанотрофных участников консорциума может способствовать повышению стабильности и эффективности процесса культивирования [4]. Отдельный интерес представляют синтетические сообщества известного видового состава для получения смешанных метанотрофных культур, обладающих заданными характеристиками роста, контролируемым откликом на изменения условий культивирования, а также повышенным уровнем синтез целевых соединений [5].

Одну из важнейших функций, обеспечивающую устойчивость и продуктивность метанотрофных сообществ, выполняют метилотрофные микроорганизмы. Бактерии, потребляющие метанол для роста и получения энергии, могут образовывать прочные синтрофные связи с МОБ, образуя совместный интерактом, в результате чего происходит перестроение метаболических путей обоих участников сообщества [6]. Установлено, что присутствие метилотрофов стимулирует метанотрофную активность и увеличивает уровень секреции метанола клетками МОБ в окружающую среду, что указывает на взаимную пользу сосуществования данных групп микроорганизмов за счёт образованных естественным путём механизмов взаимодействия [7]. Однако, несмотря на очевидный позитивный эффект взаимодействия метан – и метанооксиляющих культур, обнаруженный в природных средах и модельных экспериментах, исследований, анализирующих направленное совместное культивирование, практически не проводилось. В данной работе рассматривали влияние различных метилотрофных культур на рост метанотрофных бактерий в составе ассоциации в сравнении с культивированием чистого изолята метанотрофа-продуцента белка. Также в рамках исследования оценивали устойчивость смешанных сообществ «метанотроф-метилотроф» и содержание белка в получаемой биомассе, на основании чего делали вывод о перспективах применения данного подхода в биотехнологии.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования был выбран метанотрофный изолят рода *Methylococcus*, выделенный из пробы заболоченной почвы. Для выделения метанотрофов использовали метод накопительных культур и метод предельных разведений [8]. Выделение микроорганизмов и получение инокулята осуществляли на модифицированной среде AMS, содержащей (г/л): $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$ – 0,5; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 1; $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – 0,2; NaCl – 0,15; KH_2PO_4 – 0,7; $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ – 1,5. В ростовую среду также добавляли раствор микроэлементов для среды AMS – 1 мл/л, а в качестве единственного источника органического углерода

применяли метан в составе метановоздушной среды (доля CH_4 – 30-35%) [9]. Подготовку инокулята проводили в периодическом режиме в колбах при температуре 37-39°C и непрерывном перемешивании со скоростью 160 об/мин в течение пяти суток. Метилотрофные бактерии, неспособные расти на метане, были отобраны из коллекции микроорганизмов кафедры биотехнологии РХТУ им. Д.И. Менделеева и включали: *Methylobacterium* sp. (ВКПМ В-5603); *Methylobacterium* sp. (изолят; сходство со штаммом B9.1 97,48%); *Methylobacterium zatmanii* (ВКМ В-2161); *Methylobacterium* sp. (изолят; сходство с *Methylobacterium extorquens* 99,40%); *Methylobacterium methylophilus* (изолят). Подготовку инокулята метанооксиляющих спутников проводили на аналогичной среде и при сходных условиях инкубирования с применением метанола в концентрации 10 мл/л вместо метана.

Эксперимент по совместному культивированию парных ассоциаций «метанотроф-метилотроф» проводили в 12-луночных культуральных планшетах путём добавления к 2,7 мл свежей ростовой среды 0,2 и 0,1 мл инокулята метано- и метилотрофной культуры соответственно. В качестве контрольной пробы использовали чистую культуру р. *Methylococcus* в отсутствие спутников. Культуральные планшеты помещали в эксикаторы с разлётом для подачи смеси воздуха и метана и инкубировали при условиях, описанных ранее. Каждое бинарное сообщество с целью создания устойчивых метанотрофных ассоциаций выращивали в ходе трёх последовательных пассажей длительностью 72, 48 и 48 часов. При каждом пересеве переносили 0,3 мл суспензии из лунки с предыдущей стадии на 2,7 мл свежей среды. Все эксперименты по культивированию для оценки сходимости и воспроизводимости результатов проводили в трёх повторностях.

По окончании проведения заключительного пассажа оценивали рост сообществ на спектрофотометре при помощи определения оптической плотности суспензии при длине волны 600нм (OP_{600}) и сравнивали с результатами, полученными для контрольной пробы (1).

Влияние метилотрофа =

$$\log_2(\text{OP}_{600, \text{ассоциация}}) - \log_2(\text{OP}_{600, \text{чистая культура}}) \quad (1)$$

За значимое положительное или отрицательное влияние спутника принимали значения более «0,25» и «-0,25» соответственно. Установленный предел позволяет не учитывать влияние клеток различной морфологии в процессе измерения оптической плотности, а также исключает ложноположительную и ложноотрицательную оценку взаимодействия внутри ассоциации «метанотроф-метилотроф».

По итогам культивирования рост наблюдали во всех вариантах культивирования. Результаты оценки влияния метилотрофных культур на рост метанотрофной ассоциации, приведённые в Табл. 1., указывают на отсутствие выраженной родовой специфичности во взаимодействии между

рассматриваемыми группами микроорганизмов. Положительное влияние на значение оптической плотности суспензии оказал как один из метилотрофов р. *Methylobacterium*, так и относимая к семейству *Methylophilaceae* бактерия *Methylophilus*

methylophilus. Присутствие других представителей альфапротеобактериального семейства *Methylobacteriaceae* либо значительно не повлияло, либо негативно отразилось на росте метанооксиляющего изолята.

Таблица 1. Сравнение культивирования чистой культуры *Methylococcus* sp. и парных сообществ

Влияние метилотрофных спутников	+ <i>Methylobacterium</i> sp. (B-5603)	+ <i>Methylobacterium</i> sp. (изолят)	+ <i>Methylobacterium</i> sp. (изолят)	+ <i>Methylobacterium</i> sp. (изолят)	+ <i>Methylobacterium</i> sp. (изолят)
	0,273 ± 0,036	-0,109 ± 0,075	-0,342 ± 0,007	-0,035 ± 0,028	0,313 ± 0,021

Предпочтительное наличие *M. methylophilus* при выращивании бинарных сообществ с р. *Methylococcus* подтверждается сообщениями, в которых указывается на конкурентное вытеснение представителями данного рода иных метилотрофов в ходе высокопродуктивных процессов культивирования семейства *Methylococcaceae*, а также распространением данных бактерий в метанотрофных обогащённых сообществах [10-12]. Связь с МОБ других культур, взятых для эксперимента, изучена значительно хуже и нуждается в дальнейших исследованиях, рассматривающих как процессы взаимодействия на уровне трофических путей преобразования продуктов окисления метана, так и в рамках взаимного влияния на экспрессию генов внутри интерактома «метанотроф-метилотроф». Вероятно, снижение темпов роста связано с повышенной секрецией метанола в окружающую среду в присутствии спутника, что в условиях некомпенсированности роста активности ММО, приводит к снижению эффективности удельного прироста биомассы МОБ [13].

По результатам проведения светопольной микроскопии фиксированных и окрашенных раствором фуксина препаратов были получены микрофотографии сообществ, обладающих повышенной оптической плотностью (Рис. 1а и 1б). Изображения демонстрируют наличие устойчивых бинарных сообществ с преобладанием *Methylococcus* sp. и значимого числа метилотрофов обоих родов, имеющих характерную морфологию.

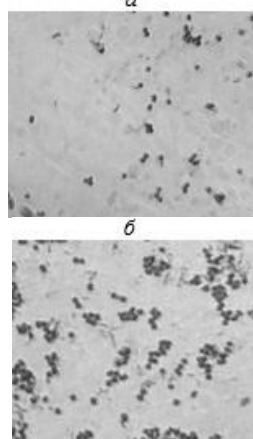


Рис. 1. Устойчивые парные ассоциации *Methylococcus* sp. а – с изолятом *M. methylophilus*; б – с *Methylobacterium* sp. (B-5603).

Дальнейшим этапом исследования было сравнение содержания доли белка в биомассе, получаемой в ходе культивирования чистой метанотрофной культуры, а также двойных синтетических сообществ. Образцы для аналитического исследования отбирали из лунок заключительного пассажа культивирования в стационарной фазе роста культуры. Определение содержания белковых веществ проводили модифицированным методом Лоури в расчёте на массу взятой навески абсолютно сухой биомассы, промытой от культуральной жидкости и гидролизованной в щелочных условиях [14]. Результаты анализа (Рис. 2), указывают на увеличение содержания белка в парном сообществе бактерий р. *Methylococcus* с *Methylobacterium* sp. B-5603 до 67,8%, что более, чем на 7%, превосходит значения для биомассы остальных парных ассоциаций и чистой культуры, не продемонстрировавших значительное отличие между собой по данному показателю.

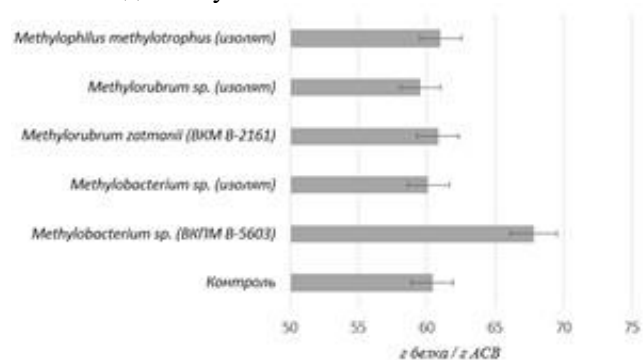


Рис. 2. Сравнение содержания белка в биомассе. Наблюдаемая разница при наличии *Methylobacterium* sp. B-5603 может быть объяснена специфическим ответом рассматриваемого метанотрофа, заключающимся в повышенном уровне синтеза метаномоноксигеназы МОБ в ответ на необходимость выделения части продуктов ассимиляции метана в культуральную среду, а также способностью ряда метилотрофов данного рода синтезировать значительное количество белка в клетках [15]. Однако, было установлено, что применение метана по сравнению с метанолом в качестве субстрата является более выгодным с экономической точки зрения в процессах получения белка одноклеточных организмов в контролируемых условиях [16]. Таким образом, совмещение двух

высокобелковых бактерий с выраженной синергией посредством образования трофических связей позволяет достичь показателей накопления биомассы и производства биологически активных веществ с добавленной стоимостью, невозможных при росте культур по отдельности, используя при этом наиболее подходящий источник углерода.

Заключение

В ходе культивирования парных ассоциаций метанотрофа р. *Methylococcus* с метилотрофными бактериями было обнаружено как выраженное положительное (*Methylobacterium* sp. В-5603 и *Methylophilus methylotrophus*), так и отрицательное влияние (*Methylobacterium* sp. В-2161) на накопление биомассы по сравнению с применением чистой культуры, что также указывает на необходимость подробного рассмотрения взаимного влияния конкретных представителей рассматриваемых групп микроорганизмов. Увеличение содержания белка в биомассе бинарных сообществ при использовании *Methylobacterium* sp. В-5603 в качестве спутника, наряду с наблюдаемой в ходе последовательных пересевов стабильностью образованных композиций «метанотроф-метилотроф», открывает широкие перспективы использования данных объектов в области получения сырья с высоким содержанием белка. Полученные результаты указывают на необходимость дальнейшей оптимизации состава ростовой среды и условий культивирования с целью увеличения выхода биомассы, а также поиска альтернативных сочетаний быстрорастущих культур, способных окислять метан и метанол.

Список литературы

1. Fenibo E. O. et al. Untapped talents: insight into the ecological significance of methanotrophs and its prospects //Science of The Total Environment. – 2023. – Т. 903. – С. 166145.
2. Bratosin B. C., Darjan S., Vodnar D. C. Single cell protein: A potential substitute in human and animal nutrition //Sustainability. – 2021. – Т. 13. – №. 16. – С. 9284.
3. Biswas A. et al. Methanotroph (*Methylococcus capsulatus*, Bath) bacteria meal as an alternative protein source for Japanese yellowtail, *Seriola quinqueradiata* //Aquaculture. – 2020. – Т. 529. – С. 735700.
4. Ho A. et al. Environmental applications of methanotrophs //Methanotrophs: Microbiology Fundamentals and Biotechnological Applications. – 2019. – С. 231-255.
5. Stock M. et al. Exploration and prediction of interactions between methanotrophs and heterotrophs

//Research in microbiology. – 2013. – Т. 164. – №. 10. – С. 1045-1054.

6. Ho A. et al. Biotic interactions in microbial communities as modulators of biogeochemical processes: methanotrophy as a model system //Frontiers in Microbiology. – 2016. – Т. 7. – С. 1285.

7. Rani V. et al. Synergistic interaction of methanotrophs and methylotrophs in regulating methane emission //Microbial technology for sustainable environment. – 2021. – С. 419-437.

8. Dedysh S. N., Dunfield P. F. Cultivation of methanotrophs //Hydrocarbon and lipid microbiology protocols: Isolation and cultivation. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014. – С. 231-247.

9. Rhee S. K., Awala S. I., Nguyen N. L. Enrichment and isolation of aerobic and anaerobic methanotrophs //Methanotrophs: Microbiology fundamentals and biotechnological applications. – 2019. – С. 39-69.

10. Hernandez M. E. et al. Oxygen availability is a major factor in determining the composition of microbial communities involved in methane oxidation //PeerJ. – 2015. – Т. 3. – С. e801

11. Yu Z. et al. Synthetic methane-consuming communities from a natural lake sediment //MBio. – 2019. – Т. 10. – №. 4. – С. 10.1128/mbio. 01072-19.

12. Yu Z., Beck D. A. C., Chistoserdova L. Natural selection in synthetic communities highlights the roles of *Methylococcaceae* and *Methylophilaceae* and suggests differential roles for alternative methanol dehydrogenases in methane consumption //Frontiers in microbiology. – 2017. – Т. 8. – С. 2392.

13. Avila-Nuñez G. et al. Methanol excretion by *Methylobacterium methanica* is induced by the supernatant of a methanotrophic consortium //Journal of Chemical Technology & Biotechnology. – 2024. – Т. 99. – №. 6. – С. 1356-1363.

14. Wada O. Z. et al. Evaluation of cell disruption methods for protein and coenzyme Q10 quantification in purple non-sulfur bacteria //Frontiers in Microbiology. – 2024. – Т. 15. – С. 1324099.

15. Gundupalli M. P. et al. Bacterial single cell protein (BSCP): a sustainable protein source from *Methylobacterium* species //Trends in Food Science & Technology. – 2024. – С. 104426.

16. Xu T. et al. Single cell protein production potential of enriched microbial populations from rice paddy soils and roots: Insights into protein yield enhancement by *Methylophilaceae* //Bioresource Technology. – 2025. – Т. 427. – С. 132397.

ДК 533.583.2

Леонов Э.М., Соловьев К.Д.

Оценка сорбционных свойств опоки Вольского месторождения по отношению к нефтепродуктам

Леонов Эдуард Михайлович – студент группы Э-41; edlnv1337@gmail.com.

Соловьев Константин Дмитриевич – студент группы МЭ-11; kostya.solovyov2012@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В статье рассмотрена возможность применения опоки Вольского месторождения в качестве сорбента для очистки сточных вод, содержащих нефть Барсуковского месторождения. Определена предельная статическая сорбционная емкость опоки по отношению, которая составляет 8,9 мг/г.

Ключевые слова: глины, дисперсный кремнезем, минеральные сорбенты, опока, сточные воды, нефтепродукты

Assessment of the sorption properties of the Volsky deposit opoka in relation to petroleum products

Leonov E.M.¹, Solovyov K.D.¹

¹ D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article examines the possibility of using opoka from the Volskoye deposit as a sorbent for the purification of wastewater containing petroleum from the Barsukovskoye deposit. The maximum static sorption capacity of the opoka for petroleum was determined to be 8.9 mg/g.

Key words: clays, dispersed silica, mineral sorbents, opoka, wastewater, petroleum products

Введение

В настоящее время загрязнение водных объектов нефтью и нефтепродуктами представляет собой одну из наиболее значимых экологических проблем. В последние десятилетия антропогенное воздействие на гидросферу значительно увеличивается в связи с ростом промышленного производства и увеличением нефтедобычи. Сорбционные методы очистки считаются одними из наиболее эффективных для очистки сточных вод от остаточных концентраций нефтепродуктов в воде. Данный метод исключает возможность вторичного загрязнения и позволяет удалять широкий спектр загрязняющих веществ до требуемых значений предельно допустимых концентраций [1].

В настоящее время очистка сточных вод от нефтепродуктов состоит из 4 стадий, механической очистки (нефтеловушки), физико-химической очистки (коагуляция, флокуляция), биологической очистки и доочистки с использованием фильтров с активированным углем [2].

В рамках данной работы изучена эффективность очистки модельного водного стока, загрязненного нефтепродуктами, при помощи минерального сорбента – опоки Вольского месторождения.

Опоки получили широкое географическое распространение на территории Европы и Центральной Азии, образуя меловые и палеогеновые толщи до 700 метров. Данный материал представляет собой осадочную горную породу, состоящую преимущественно из кремнезёма (до 92-98%) и глинистых включений [3].

Высокое содержание в исследуемом образце таких минералов, как кварц, тридимит, мусковит и иллит указывает на наличие значительного количества силикатов и алюмосиликатов в составе опоки, что позволяет сделать предположение о сорбционной способности материала.

Экспериментальная часть

Целью данной работы является оценка применимости опоки Вольского месторождения для очистки сточных вод от нефтепродуктов. В рамках данного исследования были проведены эксперименты на модельных растворах нефтепродуктов. Для приготовления модельных растворов использовали нефть Барсуковского месторождения.

Устойчивая эмульсия «масло в воде» была приготовлена путем поэтапного внесения нефти по каплям в дистиллированную воду при интенсивном перемешивании верхнеприводной лопастной мешалкой со скоростью 2000 оборотов в минуту. Перемешивание проводили в течение часа, для получения стабильной высокодисперсной эмульсии. Сразу после приготовления проводили отбор проб модельного раствора для приготовления водных вытяжек. Растворы меньших концентраций нефтепродуктов приготавливали путем разбавления начальной эмульсии до требуемого объема и повторного перемешивания эмульсии в течение получаса.

Исследуемый образец опоки предварительно измельчали в ступке, а после просеивали через сито с диаметром ячейки 2 мм.

Для определения величины адсорбции были приготовлены модельные суспензии в соответствии с ГОСТ 26423-85, путем внесения 0,1 грамма исследуемого материала в модельный раствор нефтепродуктов объемом 100 миллилитров (Т:Ж=1:1000). рН модельных растворов контролировали потенциометрически. Эксперименты проводили при комнатной температуре 25 °С.

Суспензии встряхивали на лабораторном шейкере в течение 2 часов. Далее растворы отфильтровывали от частиц сорбента методом вакуумного фильтрования с использованием фильтра Шотта.

Определение содержания нефтепродуктов до и после сорбции проводилось в соответствии с РД 52.24.476-2022. Результаты экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные данные по сорбции эмульсии нефтепродуктов из водного раствора

Начальные концентрации эмульсии нефтепродуктов в водном растворе (С _{исходное}), мг/дм ³	Концентрации эмульсии нефтепродуктов в водном растворе после проведения сорбции (С _{равновесная}), мг/дм ³	Величина адсорбции (А), мг/г
0,98	0,2	0,8
14,4	12	2,3
24,1	18,5	5,7
43,6	35,9	7,8
56,8	47,9	8,9
78,6	46,6	31,4
69,4	36,5	31,7

На основе полученных экспериментальных данных (таблица 1) была построена изотерма адсорбции в координатах $A=f(C)$ (рисунок 1).

Расчет величины адсорбции проводили по следующей формуле (1).

$$A = \frac{(C_1 - C_2) \cdot V}{m}, \text{ где (1)}$$

A – величина адсорбции, мг/г

C_1 – исходная концентрация нефтепродуктов в эмульсии, мг/дм³

C_2 – равновесная концентрация нефтепродуктов в эмульсии после проведения сорбции, мг/дм³

m – масса адсорбента, г

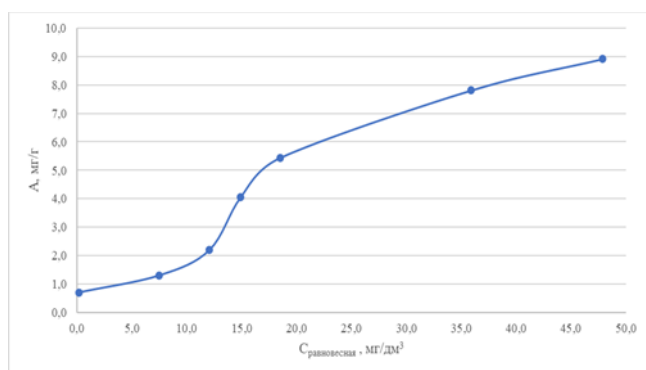


Рисунок 1. Изотерма адсорбции нефтепродуктов на опоке Вольского месторождения

На основании графика (рис. 1), можно сказать, что по классификации изотерм по Брунауэру данная изотерма относится к II типу [4]. Точка перегиба на графике соответствует началу формирования полимолекулярного слоя еще до полного заполнения монослоя. S-образная форма кривой указывает на протекание полимолекулярной адсорбции, вызванной слабым взаимодействием адсорбат-адсорбент, и сильным взаимодействием адсорбат-адсорбат, что характерно для сорбции органических неполярных соединений на мезопористых адсорбентах [5-9].

Определена максимальная величина адсорбции, равная 8,9 мг/г. Обработка полученных результатов при помощи линейной формы уравнения Ленгмюра с целью получения значения A_{∞} – предельной величины адсорбции и константы Ленгмюра не удалось провести с достаточной степенью линеаризации, что также объясняется наличием полимолекулярной адсорбции.

В области значений начальных концентраций эмульсии нефтепродуктов более 50 мг/дм³ механизм

сорбции меняется с сорбции растворенных в воде нефтепродуктов и высокодисперсных капель эмульсии на механизм прилипания крупных эмульсионных капель нефтепродуктов к частицам сорбента, по причине изменения дисперсионного состава раствора [10-14]. Это привело к значительному росту величины адсорбции в области высоких равновесных концентраций нефтепродуктов (таблица 1).

Таким образом, использование для расчетов линейной формы уравнения Ленгмюра приводит к значительному завышению результатов A_{∞} , и не позволяет достоверно оценить сорбционный потенциал материала по отношению к сорбции растворенных в воде нефтепродуктов.

Заключение

По результатам экспериментов была определена величина предельной емкости по нефтепродуктам для опоки Вольского месторождения равная 8,9 мг/г. Данная емкость была получена в условии модельных растворов нефтепродуктов для процесса сорбции, протекающей по механизму физической адсорбции с последующей полимолекулярной конденсацией в мезопористом поровом пространстве. На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод об эффективности применения опоки в качестве сорбента для глубокой очистки водных растворов от растворенных нефтепродуктов.

Авторы выражают благодарность научному руководителю д.т.н., профессор, декан факультета биотехнологии и промышленной экологии Кручининой Наталии Евгеньевне

Список литературы

1. Федорова Н. А. Анализ методов ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов // Вестник науки. – 2023. – Т. 2. – №. 11 (68). – С. 875-879.
2. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям от 23.12.2022 № 8-2022.
3. Смирнов П. В. Опоки: полиморфный состав, генезис и проблемы их изучения // Георесурсы. – 2024. – Т. 26. – №. 2. – С. 135-154.
4. Ткаченко С. И., Хоменко А. Ю. Определение удельной поверхности пористых материалов методами БЭТ и Арановича // М.: МФТИ. – 2014.
5. Гаврилова Н. Н., Назаров В. В. Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. – 2015.

6. Гальченко С. В., Чердакова А. С., Воробьева Е. В. Обоснование методики получения устойчивых модельных эмульсий нефтепродуктов, содержащихся в сточных водах //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18. – №. 2-2. – С. 318-321.

7. Веприкова Е. В. и др. Особенности очистки воды от нефтепродуктов с использованием нефтяных сорбентов, фильтрующих материалов и активных углей //Журнал сибирского федерального университета. Химия. – 2010. – Т. 3. – №. 3. – С. 285-304.

8. Власова О. С., Калашникова Д. В., Селезнева Н. А. Сорбция эмульгированных нефтепродуктов опокой //Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения. – 2018. – С. 71-73.

9. Грачева Н. В., Желтобрюхов В. Ф., Селезнева Н. А. Сорбция эмульгированных нефтепродуктов из сточных вод модифицированной опокой //Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2019. – №. 1. – С. 80-87.

10. Калюкова Е. Н., Иванская Н. Н. Адсорбционная способность некоторых природных

сорбентов по отношению к нефтепродуктам //Вестник научных конференций. – ООО Консалтинговая компания Юком, 2019. – №. 10-1. – С. 48-50.

11. Давыдова О. А. и др. Физико-химические аспекты загрязнения и очистки поверхностных вод от тяжелых металлов и нефтепродуктов природными сорбентами //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – №. 4-3. – С. 523-525.

12. Лебедев И. А., Кондратьев Е. В., Комарова Л. Ф. Минеральные сорбенты для очистки сточных вод от нефтепродуктов //Журнал прикладной химии. – 2010. – Т. 83. – №. 10. – С. 1737-1739.

13. Ануров С. А. и др. Влияние основных технологических факторов на адсорбцию нефтепродуктов и ПАВ глинистыми поглотителями //Химическая промышленность сегодня. – 2013. – №. 6. – С. 50-56.

14. Логинова М. Е. Применение адсорбционных моделей для определения характеристик реагентов при равновесных процессах //НефтеГазоХимия. – 2023. – №. 1. – С. 11-14.

УДК 577.15:579.22

Тетерина С.А., Романова М.В., Белодед А.В.

Скрининг термофильных штаммов бактерий сем. *Bacillaceae* — продуцентов внеклеточных термостабильных маннааз и оценка их субстратной специфичности

Тетерина Софья Андреевна, студентка 3 курса факультета биотехнологии и промышленной экологии; e-mail: sofa_teterina2004@mail.ru

Романова Мария Васильевна, аспирант, ассистент кафедры биотехнологии;

Белодед Андрей Васильевич, к.б.н., доцент кафедры биотехнологии;

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20

*В работе проведён скрининг пяти термофильных штаммов бактерий семейства *Bacillaceae* на способность продуцировать внеклеточные маннаазы на агаризованных и жидких питательных средах. Количественное определение активности маннааз проводили методом с ДНСК при использовании различных растительных камедей в качестве субстратов. По результатам исследований термофильный штамм Т4.2 продемонстрировал высокую способность к гидролизу маннано-содержащих полисахаридов, в особенности глюкоманнан конжаковой камеди и галактоманнан камеди рожкового дерева. При анализе продуктов гидролиза камедей методами капиллярного электрофореза и тонкослойной хроматографии были обнаружены олигосахариды различной длины, что позволило отнести изучаемые ферменты к эндоманназам. Полученные данные свидетельствуют о перспективности термофильного штамма Т4.2 как источника термостабильных внеклеточных маннааз для переработки растительного сырья и производства функциональных углеводов.*

*Ключевые слова: термофильные бактерии, *Bacillaceae*, внеклеточные маннаазы, ферментативная активность, маннанолигосахариды*

Screening of thermophilic strains of bacteria of the *bacillaceae* family producing extracellular thermostable mannanases with assessment of substrate specificity

Teterina S.A., Romanova M.V., Beloded A.V.

D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia.

*In this work five thermophilic strains of bacteria of the *Bacillaceae* family were screened for the ability to produce extracellular mannanases on agarized and liquid nutrient media. The quantitative determination of mannanase activity was carried out using the DNSA method and using various plant gums as substrates. According to the research results, the thermophilic strain T4.2 demonstrated a high ability to hydrolyze mannan-containing polysaccharides, especially glucomannan of konjac gum and galactomannan of carob gum. When analyzing the products of gum hydrolysis by capillary electrophoresis and thin-layer chromatography, oligosaccharides of various lengths were detected, which made it possible to classify the studied enzymes as endomannanases. The data obtained indicate the prospects of the thermophilic strain T4.2 as a source of thermostable extracellular mannanases for the processing of plant raw materials and the production of functional carbohydrates.*

*Keywords: thermophilic bacteria, *Bacillaceae*, extracellular mannanases, enzyme activity, mannanoligosaccharides*

Введение

β -Маннаазы представляют собой ферменты класса гидролаз, катализирующие гидролиз β -1,4-гликозидных связей в полисахаридах, входящих в состав растительных клеточных стенок. Клеточные стенки растений содержат гемицеллюлозу и целлюлозу — полисахариды, широко распространённые в природе. Основу гемицеллюлозы составляют маннаны, преимущественно представленные в семенах и эндосперме растений. Эти полисахариды состоят из остатков маннозы, соединённых β -1,4-гликозидными связями. В зависимости от мономерного состава маннаны подразделяются на незамещённые линейные маннаны, а также галактоманнаны, глюкоманнаны и галактоглюкоманнаны [1].

Камеди растительного происхождения часто применяются в качестве модельных субстратов для изучения активности маннааз. При этом их специфичность может варьироваться в зависимости от соотношения мономеров и разветвлённости гетероманнанов. Например, соотношение маннозы к галактозе в камеди рожкового дерева, камеди тары и

гуаровой камеди составляет соответственно 4:1, 3:1 и 2:1, а сами полисахариды представляют собой β -1,4-маннаны, замещённые по β -1,6-связи D-галактопиранозой, тогда как в конжаковой камеди соотношение маннозы к глюкозе составляет 1,6:1, а глюкоза включена в линейную цепь полисахарида.

Поскольку маннаны широко распространены в природе, маннаазы находят применение в различных отраслях, включая обесцвечивание красителей, отбеливание целлюлозы, улучшение свойств моющих средств, снижение вязкости пищевых продуктов (например, кофе), осветление фруктовых соков, а также в технологиях бурения нефтяных скважин [2]. Поскольку большинство указанных процессов осуществляется при повышенных температурах, особую ценность представляют термостабильные ферменты. В частности, термостойкие маннаазы предпочтительны для таких термоинтенсивных применений, как гранулирование кормов, осахаривание растительного сырья и процессы ферментации [3]. Перспективным направлением является использование маннааз для производства функциональных олигосахаридов, которые

оказывают модулирующее действие на полезную микрофлору кишечника. С учётом субстратной специфичности маннаназ, возможно получение как маннанолигосахаридов, так и галактоманнан- и глюкоманнанолигосахаридов, которые могут стать основой для получения новых пребиотиков [5]. Поэтому получение эффективных штаммов-продуцентов, синтезирующих β -маннаназы с повышенной термостабильностью, представляет значительный интерес для биотехнологии.

Целью данной работы являлось проведение скрининга термофильных штаммов бактерий сем. *Bacillaceae*, выделенных из почвенных образцов, на наличие внеклеточных маннаназ, и оценка субстратной специфичности полученных ферментов при использовании гетероманнанов камедей растительного происхождения.

Экспериментальная часть

В исследовании использовали термофильные штаммы бактерий ТЗ.1, ТЗ.2, ТЗ.3, Т4.1 и Т4.2, ранее выделенные на кафедре биотехнологии РХТУ им. Д. И. Менделеева из почвы, перегноя и компоста при 50 °С и предварительно отнесённые к семейству *Bacillaceae* по морфологическим и физиологическим характеристикам. В предыдущих исследованиях данные штаммы были охарактеризованы как продуценты внеклеточных протеолитических, амилолитических и целлюлолитических ферментов [4].

Скрининг на внеклеточную маннаназную активность штаммов бактерий проводили на твёрдой питательной среде следующего состава: триптон — 10 г/л, дрожжевой экстракт — 5 г/л, NaCl — 5 г/л, камедь рожкового дерева — 5 г/л, агар — 15 г/л. Посевы инкубировали при 50 °С в течение 48 ч. Для выявления гидролитической активности чашки обрабатывали 1% раствором Конго красного или раствором Люголя (0,01 М I_2/KI). Зоны просветления вокруг колоний указывали на гидролиз камеди и наличие внеклеточной маннаназной активности.

Культивирование штаммов бактерий проводили в колбах объёмом 250 мл, содержащих по 50 мл жидкой среды аналогичного состава, при 50 °С на орбитальном шейкере со скоростью вращения 150 об/мин в течение 24 ч. Культуральную жидкость центрифугировали (8000 об/мин, 15 мин), полученный супернатант использовали для определения ферментативной активности.

Маннаназную активность определяли по гидролизу камеди рожкового дерева (КРД) с образованием редуцирующих олигосахаридов, окисляющихся 3,5-динитросалициловой кислотой (ДНСК). В пробирки вносили по 0,5 мл 1 % раствора камеди и 50 мМ фосфатного буфера (pH 7,0), инкубировали при 50 °С (10 мин), затем добавляли супернатант культуры (до 1,0 мл) или дистиллированную воду (контроль), и выдерживали при 50 °С в течение 30 мин с периодическим перемешиванием. После реакции отбирали по 0,5 мл смеси, добавляли 1,0 мл цветного реагента на основе ДНСК, инкубировали на кипящей водяной бане в

течение 10 мин, далее пробирки охлаждали и доводили объём проб до 4,0 мл добавлением 2,5 мл дистиллированной воды. После тщательного перемешивания измеряли оптическую плотность проб при 540 нм на спектрофотометре КФК-300 («Альтаир», Россия), откалиброванном по холостой пробе (буфер:реактив:вода = 1:2:5) [4]. Количественное определение редуцирующих сахаров осуществляли по калибровочной кривой $D_{540} = f(C_{Man}, \text{мг/л})$, в качестве стандартов использовали эталонные растворы D-маннозы. Аналогичные анализы проводили с альтернативными субстратами (конжаковая, гуаровая, ксантановая камеди и камедь тары) для оценки субстратной специфичности ферментов.

Для получения концентрата внеклеточных ферментов культуральную жидкость центрифугировали в течение 15 мин при 8000 об/мин. Полученный супернатант осаждали сульфатом аммония $(NH_4)_2SO_4$ до степени насыщенности 80%, перемешивали в течение 1 часа и вновь центрифугировали в течение 15 мин при 8000 об/мин. Осадок ресуспендировали в фосфатно-солевом буфере (pH 7,4), после чего проводили диализ с использованием полупроницаемой целлюлозной мембраны с отсечением по молекулярной массе 3 кДа против аналогичного буфера в течение 16 ч при 4 °С с регулярной заменой раствора. Очищенный концентрат подвергали ультрафильтрации при помощи центрифужных фильтров Amicon Ultra 4 (Merck Millipore, США) с отсечением по молекулярной массе 10 кДа.

Качественный анализ и олигосахаридов, полученных в ходе гидролиза камедей маннаназми, проводили методом капиллярного электрофореза (КЭФ) и тонкослойной хроматографии (ТСХ). В исследовании использовали систему для КЭФ КАПЕЛЬ-105М (Люмэкс, Россия) с кварцевым капилляром длиной 75 см и внутренним диаметром 50 мкм. Перед анализом пробы подвергали ультрафильтрации для удаления остаточных высокомолекулярных соединений с помощью центрифужных фильтров Amicon Ultra 4 с отсечением по молекулярной массе 3 кДа. В качестве фонового электролита использовали 0,5 мМ раствор цетилтриметиламмония бромид (ЦТАБ), 7 мМ сорбата калия и 50 мМ NaOH. Непрямое фотометрическое определение углеводов проводили при 20 °С и длине волны 230 нм. Для проверки отсутствия пиков моносахаридов в пробы вносили стандартные растворы моносахаридов — глюкозы, маннозы и галактозы.

ТСХ проводили на пластинках с силикагелем марки Silufol (Kavalier, Czech Republic), в качестве подвижной фазы использовали систему этилацетат-уксусная кислота-вода (6:3:2). Пробы с олигосахаридами и стандартные растворы маннозы, галактозы и глюкозы (5 г/л) наносили на пластинку в количестве 5 мкл. Для визуализации веществ пластинки обрызгивали 5% раствором анисового альдегида в смеси этанол, концентрированная серная

кислота и ледяная уксусная кислота (9:0,5:0.1), затем пластинки сушили при комнатной температуре и нагревали при 110°C в течение 5 минут.

Результаты скрининга термофильных штаммов бактерий на продукцию внеклеточных маннаназ, а также количественное определение маннаназной активности культуральной жидкости термофильных бактерий по отношению к камеди рожкового дерева представлены на рис. 1 и в табл. 1.

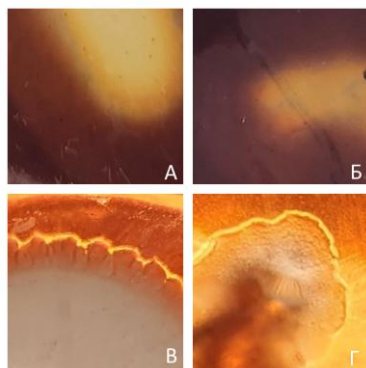


Рисунок 1. Тест на маннаназную активность на агаризованных средах: А – Т4.1, р-р Люголя, Б – Т4.2, р-р Люголя, В – Т4.1, Конго красный, Г – Т4.2, Конго красный.

Таблица 1. Сравнение маннаназной активности термофильных штаммов бактерий при росте на твердых и жидких средах с камедью рожкового дерева

Штамм	Диаметр зоны гидролиза КРД на агаризованных средах, мм	Маннаназная активность КЖ, ед./мл
T3.1	6	3,89
T3.2	9	9,44
T3.3	5	2,04
T4.1	13	18,24
T4.2	15	31,67

На основании результатов табл. 1 для дальнейших исследований субстратной специфичности ферментов был выбран штамм Т4.2, показавший высокую маннаназную активность. Для проведения

анализа проводили концентрирование культуральной жидкости штамма Т4.2 спустя 24 часа роста на жидкой среде с 5 г/л КРД. Гидролиз камедей проводили путем внесения 1 мл концентрата ферментов штамма Т4.2 к 10 мл камеди (5 г/л) в 50 мМ цитратном буфере (рН 6,0) и инкубации в течение 4 часов при 50°C и перемешивании 150 об/мин. При определении маннаназной активности по окончании гидролиза камедей было выявлено, что исследуемые маннаназы обладают наибольшей субстратной специфичностью по отношению к конжаковой камеди (табл. 2).

Таблица 2. Ферментативная активность маннаназ, выделенных из штамма Т4.2, в отношении различных полисахаридных субстратов при 50°C и рН 6,0

Субстрат	Активность, ед./мл
Камедь рожкового дерева	158,89
Гуаровая камедь	16,06
Конжаковая камедь	188,29
Камедь тары	123,70
Ксантановая камедь	н/о*

* - не обнаружено

Высокая субстратная специфичность маннаназ термофильного штамма Т4.2 была отмечена также при использовании КРД и камеди тары, которые характеризуются низкой степенью замещения основной цепи β-галактопиранозой по сравнению с гуаровой камедью. В ходе исследований не было зафиксировано проявление активности маннаназ при использовании в качестве субстрата ксантановой камеди, что, по-видимому, объясняется её составом – помимо маннозы она содержит глюкозу и глюкуроновую кислоту, а также пироватные и ацетатные группы.

При анализе электрофореграмм и хроматограмм полученных продуктов гидролиза (рис. 2) были обнаружены олигосахариды различной степени полимеризации, при этом в гидролизатах отсутствовали мономеры – манноза, галактоза или глюкоза.

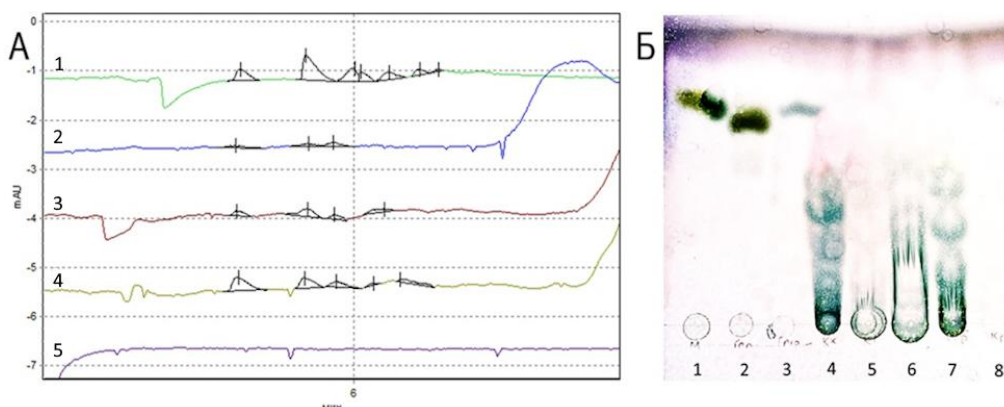


Рисунок 2. А. Электрофореграмма продуктов гидролиза камедей маннаназами штамма Т4.2: 1 – конжаковая камедь, 2 – гуаровая камедь, 3 – камедь тары, 4 – КРД, 5 – ксантановая камедь. Б. Хроматограмма продуктов гидролиза камедей маннаназами штамма Т4.2: 1 – Манноза, 2 – Галактоза, 3 – Глюкоза, 4 – Конжаковая камедь, 5 – Гуаровая камедь, 6 – Камедь тары, 7 – КРД, 8 – Ксантановая камедь.

Полученные данные согласуются с результатами определения активности методом с ДНСК – значимое количество олигосахаридов было зафиксировано в случае использования в качестве субстратов конжаковой камеди и КРД, показавшие высокое сродство к маннаназам (табл. 2). Результаты свидетельствуют о том, что маннаназы термофильного Т4.2 относятся к эндоферментам, поскольку в ходе ферментативного гидролиза высвобождались только олигосахариды.

Заключение

В ходе работы был проведён скрининг пяти термофильных штаммов бактерий семейства *Bacillaceae* на способность продуцировать внеклеточные маннаназы. По результатам первичного анализа был выделен штамм Т4.2, продемонстрировавший наибольшую ферментативную активность в отношении маннансодержащих полисахаридов. Наибольшая активность ферментов наблюдалась при использовании в качестве субстратов глюкоманнана конжаковой камеди и галактоманнана камеди рожкового дерева, что указывает на высокое сродство маннаназ к данным соединениям. Методами капиллярного электрофореза и тонкослойной хроматографии установлено, что ферменты штамма Т4.2 относятся к эндоманнаназам: в продуктах гидролиза присутствовали исключительно олигосахариды различной степени полимеризации, тогда как мономеры (манноза, галактоза, глюкоза) не выявлены.

Полученные данные свидетельствуют о высоком биотехнологическом потенциале термофильного штамма Т4.2 как источника термостабильных внеклеточных маннаназ для переработки растительного сырья и получения функциональных углеводов.

В дальнейшем исследования могут быть направлены на более глубокую характеристику ферментативной системы штамма Т4.2, включая изучение оптимальных условий действия маннаназ

(рН, температуры, ионной силы), устойчивости к термоинактивации, определение молекулярной массы ферментов, исследование кинетических параметров, а также клонирование и экспрессию соответствующих генов. Такие исследования будут способствовать изучению способов применения ферментов штамма Т4.2 в различных отраслях биотехнологии, включая производство пребиотиков и кормовых добавок.

Список литературы

1. Wang C. et al. Biochemical characterization of a thermophilic β -mannanase from *Talaromyces leycettanus* JCM12802 with high specific activity //Applied microbiology and biotechnology. – 2015. – Т. 99. – С. 1217-1228.
2. Romanova M. V. et al. Thermophilic Strain *Bacillus subtilis* Kb. 12. Gl. 35 as a Potential Producer of Mannanases for Obtaining Prebiotic Short-Chain Mannan Oligosaccharides //Microbiology. – 2024. – Т. 93. – №. Suppl 1. – С. S62-S66.
3. Tan S. et al. Thermostability modification of β -mannanase from *Aspergillus niger* via flexibility modification engineering //Frontiers in Microbiology. – 2023. – Т. 14. – С. 1119232.
4. Romanova M. V. et al. A thermophilic L-lactic acid producer of high optical purity: isolation and identification //Foods and Raw materials. – 2024. – Т. 12. – №. 1. – С. 101-109. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-1-591>
5. Mary P. R. et al. Structural diversity and prebiotic potential of short chain β -manno-oligosaccharides generated from guar gum by endo- β -mannanase (ManB-1601) //Carbohydrate Research. – 2019. – Т. 486. – С. 107822. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carres.2019.107822>
6. Мурзина Е. Д. Основы технологии получения биомассы *Halobacterium salinarum* на ферментативных гидролизатах зерновых. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М., РХТУ, 2019. – 145 с.

УДК 504.75

Трофимова В.Р., Долгов А.А., Мурзина Е.Д.

Влияние питательной среды на скорость биodeградации полиэтиленовых пленок низкой плотности

Трофимова Виктория Романовна – студентка 4 курса бакалавриата кафедры промышленной экологии;
 Долгов Александр Александрович – студент 4 курса бакалавриата кафедры промышленной экологии;
 Мурзина Екатерина Дмитриевна – доцент кафедры промышленной экологии факультета биотехнологии и промышленной экологии; katrin840@mail.ru

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9

Проведена сравнительная оценка способности микроорганизмов (*Bacillus subtilis*, *Rhodotorula rubra*, *Aspergillus niger*, *Trichoderma viride*) к биodeградации пленок полиэтилена низкой плотности (LDPE) в средах с разной доступностью углерода. Проанализированы значения эффективности биodeградации пластика. Установлено, что при условии активного роста культур в питательных средах богатых источником углерода (LB, Чапек) деструкции LDPE не наблюдается (потеря массы $\leq 2\%$). Однако, при культивировании штаммов на минеральной среде (LCFBM), где в качестве источника углерода выступал только полимер, наблюдалась активная биodeградация образцов (до 12.3% за 60 дней).

Ключевые слова: низкоплотный полиэтилен (LDPE), биodeградация, микроорганизмы.

The effect of the nutrient medium on the biodegradation rate of low-density polyethylene films

Trofimova V.R., Dolgov A.A., Murzina E.D.

D. Mendelev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

A comparative assessment of the ability of microorganisms (*Bacillus subtilis*, *Rhodotorula rubra*, *Aspergillus niger*, *Trichoderma viride*) to biodegrade low-density polyethylene (LDPE) films in media with different carbon availability has been carried out. The values of the efficiency of plastic biodegradation are analyzed. It was found that under the condition of active growth of microorganisms on nutrient media rich in a carbon source (LB, Capek), HDPE degradation is not observed (weight loss $< 2\%$). However, when cultivating strains on a mineral medium (LCFBM), where only the polymer was the carbon source, active biodegradation of the polymer was observed (up to 12.3% in 60 days).

Key words: low-density polyethylene (LDPE), biodegradation, microorganisms.

Введение

Глобальное загрязнение окружающей среды пластиком стало одной из наиболее острых экологических проблем XXI века. Ежегодно в мире производится около 400 млн тонн пластиковых отходов, из которых лишь 9% подвергаются переработке, а остальные накапливаются в экосистеме [1]. Пластик, обладая высокой устойчивостью к деградации, сохраняется в природе сотни лет, распадаясь на микропластик, который проникает в пищевые цепи, угрожая биоразнообразию и здоровью человека. Традиционные методы утилизации, такие как захоронение на полигонах, сжигание и механическая переработка, демонстрируют значительные экологические недостатки. Захоронение приводит к долговременному загрязнению почвы и грунтовых вод, а сжигание сопровождается выбросом токсичных соединений, включая диоксины и тяжелые металлы. Механическая переработка, хотя и более предпочтительна, ограничена сложностью сортировки смешанных полимеров и постепенным ухудшением качества материала после каждого цикла [2].

Сейчас актуальным направлением является поиск экологически безопасных альтернатив, среди которых особое внимание уделяется биологическому разложению пластиков. Исследования ученых подтверждают возможность различных природных штаммов бактерий и грибов разлагать синтетические

полимеры [3]. Например, бактерия *Ideonella sakaiensis* выделяет ферменты PET-гидролазу и MHET-азу, расщепляя полиэтилентерефталат (ПЭТ) до терефталевой кислоты и этиленгликоля [4]. Грибы *Aspergillus tubingensis* и *Fusarium solani* эффективно деградируют полиуретан [5], а сообщество культур *Pseudomonas aeruginosa* и *Bacillus cereus* демонстрируют активность в отношении полиэтилена [6].

Использование микроорганизмов безусловно положительно влияет на процесс разложения пластиковых материалов за счет минимизации образования токсичных побочных продуктов [3]. Но ключевыми вызовами остаются низкая скорость биodeградации и необходимость оптимизации условий культивирования различных штаммов. Например, активность *Rhodotorula rubra* существенно зависит от pH среды [7], а *Trichoderma viride* требует предварительной обработки пластика ультрафиолетом для усиления гидрофильности поверхности [8]. Исследование метаболических путей, генетическая модификация штаммов [9] и разработка биореакторов для крупномасштабной утилизации открывают перспективы для создания устойчивых технологий, способных смягчить пластиковый кризис. Таким образом, биоразложение представляет собой многообещающее направление эффективной деструкции сложных синтетических полимеров [9, 10].

Экспериментальная часть

В данном исследовании была поставлена задача сравнить способность различных микроорганизмов — бактерий *Bacillus subtilis* [1,2] и дрожжей *Rhodotorula rubra* [3], грибов *Aspergillus niger* [1, 4] и *Trichoderma viride* [5] — к деструкции полиэтилена низкой плотности (LDPE) при культивировании в питательных средах богатых углеродом и в средах с дефицитом углерода. Эксперимент основывался на гипотезе, что наличие легкодоступных источников углерода (глюкозы в LB-среде и сахарозы в среде Чапека) подавляет синтез ферментов, необходимых для разрушения пластика [4,6], тогда как в минеральной среде LCFBM, где полимер выступает единственным источником углерода, микроорганизмы адаптируются и активируют механизмы биодegradации [1, 2, 3, 10].

Для проведения эксперимента использовали пленки LDPE толщиной 0.1 мм. Образцы промывали в стерилизации 95% этанолом, чтобы исключить влияние поверхностных загрязнений. В качестве биодеструкторов были взяты штаммы микроорганизмов — *Bacillus subtilis*, *Rhodotorula rubra*, *Aspergillus niger* и *Trichoderma viride*. Культивирование проводили в трех типах сред: LB, Чапека, минеральная среда LCFBM. Единственным источником углерода в минеральной среде служил образец полиэтилена. Состав сред представлен в таблице 1. Для исключения погрешности, связанной с механическим разрушением полимерного материала в питательной среде, были поставлены контрольные группы, которые включали образцы пластика в стерильных средах без микроорганизмов. Культивирование проводили при температуре 28–30°C в течение 60 дней. Опыт проводили в трех повторностях.

Таблица 1. Состав сред

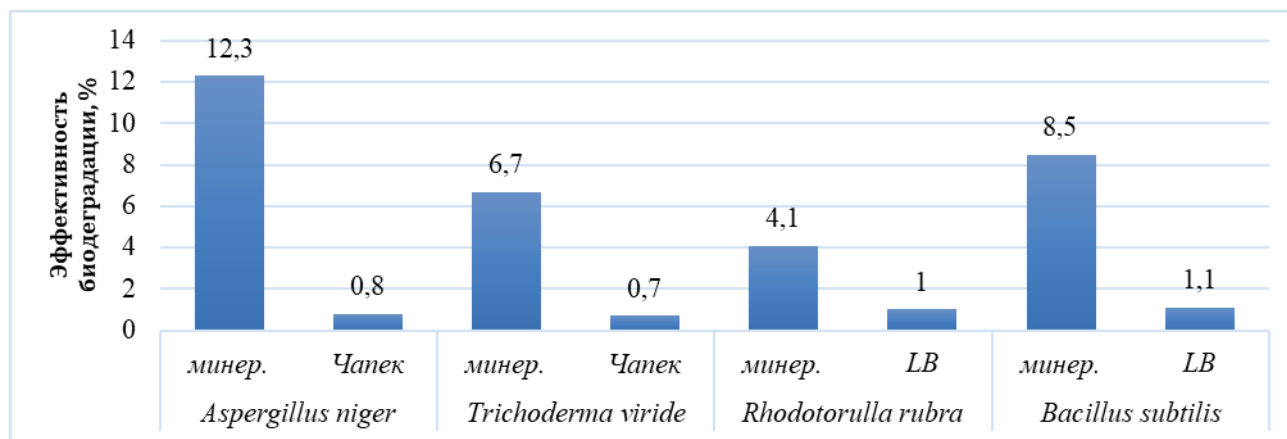
Наименование среды	Реактив	Концентрация, г/л
LB	Глюкоза	20
	Пептон	10
	Дрожжевой экстракт	5
	NaCl	2
Среда Чапека	Сахароза	30
	NaNO ₃	3
	KH ₂ PO ₄	1
	MgSO ₄ •7H ₂ O	0,5
	KCl	0,5
	FeSO ₄ •7H ₂ O	0,01
Минеральная среда LCFBM	NH ₄ NO ₃	1
	KH ₂ PO ₄	0,7
	K ₂ HPO ₄ •3H ₂ O	0,917
	FeSO ₄ •7H ₂ O	0,002
	NaCl	0,005
	MgSO ₄ •7H ₂ O	0,7
	ZnSO ₄ •7H ₂ O	0,002
	MnSO ₄ •H ₂ O	0,001

Результаты эксперимента подтвердили первоначальную гипотезу. В средах LB и Чапека наблюдался активный рост всех исследуемых

микроорганизмов, однако деградация LDPE оказалась минимальной — потеря массы не превышала 2%. Согласно фундаментальным исследованиям [6, 9], это объясняется механизмом катаболитной репрессии: присутствие легкодоступных источников углерода, таких как глюкоза и сахароза, подавляет экспрессию генов, кодирующих ферменты, необходимые для деградации сложных полимеров, таких как LDPE. Данные литературы [1, 4, 9] показывают, что в таких условиях синтез ключевых для деструкции пластика ферментов, таких как липазы и оксидоредуктазы, резко снижается или полностью отсутствует, что согласуется с наблюдаемой нами низкой потерей массы.

В отличие от этого, в среде LCFBM, где микроорганизмы сталкивались с дефицитом легкодоступного углерода и образцы полимера выступали единственным его источником, наблюдалась постепенная адаптация. После 3-дневного культивирования *Bacillus subtilis* и *Aspergillus niger* начали проявлять признаки деградации пластика. К 60-му дню потеря массы LDPE составила 8.5% для *Bacillus subtilis* и 12.3% для *Aspergillus niger*. Литературные данные [1, 2, 9] свидетельствуют, что в подобных стрессовых условиях указанные микроорганизмы активируют синтез специфических гидролитических ферментов. Так, в работах [1, 2] указано, что *Bacillus subtilis* в ответ на дефицит углерода усиливает продукцию внеклеточных липаз, способных атаковать эфирные связи в полимерах. Аналогично, в исследованиях [8, 9] подтверждается, что *Aspergillus niger* при выращивании на пластике, как единственном источнике углерода, продуцирует комплекс оксидоредуктаз (например, лакказы и пероксидазы), которые окисляют полимерные цепи LDPE, инициируя их распад. Пиковая активность липаз у *Bacillus subtilis* в аналогичных условиях, согласно [1, 2], достигает значений порядка 0.4-0.5 Ед/мл к 30-му дню, а оксидоредуктаз у *Aspergillus niger* — 0.7-0.9 Ед/мл к 45-му дню, что хорошо коррелирует с наблюдаемой нами динамикой потери массы пластика.

Культуры *Rhodotorula rubra* и *Trichoderma viride* показали более низкую эффективность в LCFBM (потеря массы 4.1% и 6.7% соответственно). Этот результат согласуется с данными литературы, указывающими на их относительно узкую субстратную специфичность. Например, исследования [3, 7] показывают, что дрожжи *Rhodotorula rubra* обладают высокой активностью оксидоредуктаз, но преимущественно в отношении полистирола, а не LDPE. Работы [5, 8] подтверждают эффективность *Trichoderma viride* в деградации сложных полиэфиров (полиуретана, ПЭТ) за счет кератиназ и эстераз, но его активность в отношении полиолефинов, таких как LDPE, обычно ниже, что и наблюдалось в нашем эксперименте. На гистограмме 1 представлены значения эффективности биодegradации пластиковых образцов в разных средах.



Гистограмма 1. Эффективность биодegradации

Заключение

Было отмечено, что эффективная биодegradация LDPE возможна лишь в условиях, где пластик становится единственным доступным источником углерода, что вынуждает микроорганизмы активировать специфические ферментативные системы, такие как липазы и оксидоредуктазы, в соответствии с данными [1, 2, 7, 10]. Напротив, присутствие легкодоступных сахаров (глюкоза, сахароза) полностью блокирует этот процесс через механизм катаболитной репрессии [4, 6, 10]. Среди исследованных штаммов *Aspergillus niger* показал наибольший потенциал для дegradации LDPE. Согласно литературным данным [7, 10], именно данный микроорганизм способен формировать биопленки на поверхности пластика и продуцировать широкий спектр внеклеточных оксидоредуктаз. В дальнейшем планируется сократить время адаптации культур, а также оценить возможность применения сообщества микроорганизмов для биодegradации полиэтилена низкой плотности.

Список литературы

1. Plastics – the Facts 2023: An analysis of European plastics production, demand and waste data / Plastics Europe. – 2023. – URL: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2023/> (дата обращения: 28.05.2025).
2. Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made // Science Advances. – 2017. – Vol. 3, № 7. – e1700782. – DOI: 10.1126/sciadv.1700782.
3. Shah A. A., Hasan F., Hameed A., Ahmed S. Biological degradation of plastics: A comprehensive review // Biotechnology Advances. – 2008. – Vol. 26, № 3. – P. 246–265. – DOI: 10.1016/j.biotechadv.2007.12.005.
4. Yoshida S., Hiraga K., Takehana T. et al. A bacterium that degrades and assimilates polyethylene terephthalate // Science. – 2016. – Vol. 351, № 6278. – P. 1196–1199. – DOI: 10.1126/science.aad6359.

5. Khan S., Nadir S., Zia Ullah M. et al. Biodegradation of polyester polyurethane by *Aspergillus tubingensis* // Environmental Technology. – 2017. – Vol. 38, № 13–14. – P. 1599–1604. – DOI: 10.1080/09593330.2017.1323954.

6. Skariyachan S., Patil A. A., Shankar A. et al. Enhanced polymer degradation of polyethylene and polypropylene by novel thermophilic consortia of *Brevibacillus* sps. and *Aneurinibacillus* sp. screened from waste management landfills and sewage treatment plants // Polymer Degradation and Stability. – 2018. – Vol. 149. – P. 52–68. – DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2018.01.018.

7. Santo M., Weitsman R., Sivan A. The role of the copper-binding enzyme – laccase – in the biodegradation of polyethylene by the actinomycete *Rhodococcus ruber* // International Biodeterioration & Biodegradation. – 2013. – Vol. 84. – P. 204–210. – DOI: 10.1016/j.ibiod.2012.03.001.

8. Khan S., Nadir S., Iqbal S. et al. Biodegradation of polyester polyurethane by *Trichoderma viride* and pre-treatment with UV // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2021. – Vol. 18. – P. 3863–3874. – DOI: 10.1007/s13762-020-03100-5.

9. Gajendiran A., Krishnamoorthy S., Abraham J. Microbial degradation of low-density polyethylene (LDPE) by *Bacillus subtilis* and *Aspergillus niger* isolated from waste disposal sites // Journal of Environmental Science and Technology. – 2016. – Vol. 9, № 6. – P. 467–476. – DOI: 10.3923/jest.2016.467.476.

10. Auta H. S., Emenike C. U., Fauziah S. H. Screening of *Bacillus* strains isolated from mangrove ecosystems in Peninsular Malaysia for microplastic degradation // Environmental Pollution. – 2017. – Vol. 231, Pt 2. – P. 1552–1559. – DOI: 10.1016/j.envpol.2017.09.043.

УДК 502.3/.7

Федоров Е.А.

Обезвоживание осадка сточных вод мясообрабатывающей промышленности

Федоров Егор Александрович – бакалавр 5 курса; egor_fedorov_1998@mail.ru.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В рамках проделанной работы изучен процесс интенсификации влагоотдачи и очистки фугата от взвешенных веществ с применением природных сорбентов и коагулянта в поле центробежной силы. В качестве коагулянта был применен водный раствор тетрахлорида титана $TiCl_4$ наряду с природными сорбентами – палыгорскитовой и бентонитовой глинами, глиной Стешевского месторождения, аргиллит, осадочная горная порода опока. Эффективность эксперимента оценивалась по показателю влагоотдачи и величине оптической плотности, определяющей количество взвешенных частиц. Полученные данные показывают, что внесение в осадок сточных вод мясоперерабатывающего производства природных сорбентов эффективно влияет на процессы влагоотдачи и очистки фугата от взвешенных веществ и могут существенно уменьшить объемы осадка сточных вод, вывозимых на полигоны для хранения и захоронения.

Ключевые слова: глина, аргиллит, влагоотдача, коагулянт, механическое обезвоживание, центрифугирование.

Dewatering of sewage sludge from the meat processing industry

Fedorov E.A.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

As part of the work done, the process of intensification of moisture loss and purification of fugate from suspended solids using natural sorbents and coagulant in the field of centrifugal force was studied. An aqueous solution of titanium tetrachloride $TiCl_4$ and natural sorbents, palygorskite and bentonite clays, clay from the Steshevsky deposit, mudstone, and sedimentary rock from Opoka, was used as a coagulant. The effectiveness of the experiment was assessed by the moisture loss index and the optical density, which determines the number of suspended particles. The data obtained show that the introduction of natural sorbents into the sewage sludge of meat processing plants effectively affects the processes of moisture removal and purification of fugate from suspended solids and can significantly reduce the volume of sewage sludge exported to landfills for storage and burial.

Key words: clay, mudstone, moisture loss, coagulant, mechanical dewatering, centrifugation.

Введение

Современный этап развития человечества и рост объемов производств ведет к увеличению объемов потребляемой воды, что, в свою очередь, увеличивает объемы сточных вод. Очистка сточных вод от различных поллютантов является одним из важнейших направлений в рациональном использовании природных ресурсов и переработки сырья.

Выбор метода очистки сточных вод напрямую зависит от типа производства. Традиционно все процессы очистки воды разделяют на: механические (центрифугирование, отстаивание и др.), химические (окисление, нейтрализация и др.), биологические (аэробные и анаэробные), физико-химические (коагуляция, флотация и др.) и комбинированные.

В процессе работы предприятий образуются осадки сточных вод и водоподготовки, сложность утилизация которых несет за собой экологические риски и требует создания новых методов обработки. Внедряемые технологии кондиционирования осадков должны быть не только эффективными, но экономически обоснованными, а главное реализовывать основную цель – минимизацию негативного воздействия на окружающую природную среду.

С ростом урбанизации, освоения земель и увеличения объемов сельского хозяйства возрастает стоимость земель, что приводит к росту отчуждаемых земель под иловые площадки и полигоны. Использование сооружений накопления и захоронения осадков приведет к значительным

капитальным и эксплуатационным затратам, а также требует применения специальных ставок и плат за негативное воздействие на окружающую среду.

Сточные воды мясоперерабатывающей промышленности представляют собой полидисперсную и многокомпонентную систему, образующуюся при мойке и вымачивании мясного сырья, при душевой отмывке колбас, в агрегатах их термической обработки, при мытье оборудования, тары и пола. Загрязнения присутствуют в стоках во всех видах дисперсного состояния: растворенном, коллоидном, эмульгированном [1]. Они содержат частицы жира, мяса, крови, белков, небольшие количества нитрита, селитры и соли. Кроме того, в сточные воды в больших количествах поступают поваренная соль, нитраты, моющие средства.

Объемы образования осадка флотационной очистки сточных вод пищевой промышленности в России по данным отчета ТП-2 (отходы) Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор) за 2024 год составили 21118,18 тыс. тонн, а поступление отходов из других хозяйствующих субъектов 106934,39 тыс. тонн. Большая часть отходов отправлена на обезвреживание и утилизацию, а 3750 тыс. тонн передано для захоронения другим хозяйственным субъектам; 715 тыс. тонн размещены на эксплуатируемых объектах самих производств.

Целью данной работы является разработка технологии обезвоживания осадков процесса флотационной очистки сточных вод

мясоперерабатывающей промышленности. Основной задачей исследования является изучение влияния различных минеральных добавок на эффективность процесса влагоотдачи осадка сточных вод и очистку фугата от поллютантов.

Материалы и методы исследования

Объектом исследований является светло-серый, вязкотекучий, дурно пахнущий осадок с влажностью 98% со стадии физико-химической очистки сточной воды мясоперерабатывающего производства (коагуляция/флокуляция+напорная флотация), плотность варьируется от 1,009 до 1,03 г/см³, содержание взвешенных частиц от 700 до 1200 мг/дм³.

Для модификации структуры осадка с целью увеличения влагоотдачи был применен ряд природных минеральных добавок – палыгорскитовая и бентонитовая глины, глина Стешевского месторождения, сцементированный глинистый аргиллит, микрозернистая микропористая кремнёвая осадочная горная порода опока [2]. Вскрышные породы не нашли широкого применения и накапливаются ежегодно.

Палыгорскит – гидроксид силикат магния и алюминия из группы слоисто-цепочных силикатов. Данная глина содержит примерно 61% SiO₂, 7% Al₂O₃, 15% MgO, 1% Fe₂O₃ и 30% H₂O и имеет кристаллическую структуру и высокой гидрофильностью. Кроме того, палыгорскит формирует жёсткий скелет на фильтрующей поверхности, препятствует слипанию частиц осадка и их деформации.

Глина Стешевского месторождения схожа по составу с палыгорскитом. В данной глине меньше SiO₂ (от 45 до 50%), но больше Al₂O₃ (от 20 до 23%) и Fe₂O₃ (от 12 до 16%).

Бентониты – это тонкодисперсные и плотные глинистые породы, жирные на ощупь, хорошо разбухающие при гидратации. Сорбционная способность данной породы основывается на их способности к ионному обмену. В основном бентонит состоит из монтмориллонита – Al₂[Si₄O₁₀](OH)₂·nH₂O.

Опока – микропористая кремнистая осадочная горная порода. В состав опоки входит до 97% микрозернистого водного аморфного кремнезема с включениями глины, песка, глауконита и др. Для этой породы характерна большая пористость и гигроскопичность.

Аргиллит – твердая порода, являющаяся продуктом дегидратации, спрессовывания и перекристаллизации при диагенезе и эпигенезе. Данные сцементированные глинистые частицы отличаются от глин своей высокой прочностью и неспособностью размокать в воде.

Основываясь на том, что эффективность коагулянта тем выше, чем выше валентность коагулирующего иона для дополнительной модификации был использован водный раствор тетрахлорида титана TiCl₄ [3,4]. Титаносодержащие коагулянты были исследованы на сточной воде

спиртовой промышленности, содержащей в себе большое количество растворенных органических веществ [5].

Обезвоживание проводили на центрифуге марки ОПн-8 (Россия). На основе ряда предварительных экспериментов была определена эффективная скорость центрифугирования (3000 мин-1) и время равное 5 минутам.

Для проведения эксперимента брали осадок объемом 20 мл и взвешивали, после вносили добавки в виде глин, аргиллита, опоки и водного раствора тетрахлорида титана TiCl₄. Опытным путем установили эффективную дозу коагулянта – 5 мг/дм³. При совместном использовании коагулянта и добавок в виде глин, аргиллита и опоки – коагулянт вносили после природных сорбентов. Природные глины использовали в дозах от 5 г/дм³ до 25 г/дм³.

По окончании центрифугирования фугат сливали в цилиндр для фиксации объема с последующим определением оптической плотности на приборе КФК-3 при длине волны $\lambda = 640$ нм. На основе данных оптической плотности определяли содержание взвешенных веществ, а степень обезвоживания осадка определяли гравиметрическим методом.

Эффективность эксперимента оценивали по показателю влагоотдачи и величине оптической плотности, определяющей количество взвешенных частиц.

Результаты и их обсуждение

Внесение в осадок сточных вод перед механическим обезвоживанием палыгорскитовой и бентонитовой глин, сцементированного глинистого аргиллита, микрозернистой микропористой кремнёвой осадочной горной породы не оказывает существенного влияния на процесс влагоотдачи. В холостой пробе показатель влагоотдачи составил 64,2%. С постепенным увеличением доз с 5 до 22,5 г/л показатель влагоотдачи возрастает и достигает 69% у бентонита, 65,5% у палыгорскита, 66,3% у опоки и 67,9% у аргиллита.

Влияние добавок на содержание взвешенных веществ в фугате выражено более ярко. Наибольшее снижение содержания взвешенных веществ наблюдается при использовании аргиллита – степень очистки 42,8% и составила 506,2 мг/дм³. Эффективность очистки фугата для других образцов составила для бентонита - 39,2% (547,1 мг/дм³), палыгорскита - 32,1% (604,3 мг/дм³), и опоки - 40% (547,2 мг/дм³). Все данные указаны при добавлении максимальной дозы в 22,5 г/л.

Модификация структуры осадка добавками с участием коагулянта на основе соли титана положительно влияет на показатель влагоотдачи и степень очистки от взвешенных частиц. В пробе без добавок содержание взвешенных частиц составило 960,8 мг/дм³ а влагоотдача 59,2%. Наибольший влияние при максимальной дозе 25 г/л показал аргиллит – содержание взвешенных веществ уменьшилось на 97% до значения 28,1 мг/дм³, влагоотдача возросла до 64,2%. Палыгорскит и опока на очистку фугата от взвешенных веществ повлияли

менее эффективно – 78,8% и 85,6% соответственно. Но на объём фугата и влагоотдачу не повлияли. При добавлении бентонита очистка фугата от взвешенных веществ составила 75,4%, влагоотдача выросла до 62,9%.

Четыре образца глины Стешевского месторождения дополнительно модифицировали температурами в 200, 400, 450 и 500 °С и внесли в осадок при участии коагулянта. В пробе без добавок содержание взвешенных частиц так же составило 960,8 мг/дм³ а влагоотдача 59,2%. Наибольший влияние при дозе 20 г/л показали образцы с термической обработкой в 200 и 400 °С – содержание взвешенных веществ уменьшилось на 95,7 и 97,8% до значения 41,1 и 50,3 мг/дм³, влагоотдача возросла до 61,9 и 62,1% соответственно. Следующие образцы с термической обработкой в 450 и 500 °С на очистку фугата от взвешенных веществ повлияли менее эффективно – 94,2 и 91,6% до значений 55,1 и 80,3 мг/дм³ соответственно. На объём фугата и влагоотдачу не повлияли.

Как положительный факт можно отметить то, что при сравнении результатов проб, где добавили только TiCl₄, с опытами при совместном добавлении аргиллита и глины Стешевского месторождения с участием коагулянта, влагоотдача и объём фугата, при условии его высокой очистки от взвешенных веществ, растут. Аргиллит повлиял на эти показатели максимально эффективно: влагоотдача выросла на 5,2%, а объём фугата на 7,8%. Глина Стешевского месторождения повысила влагоотдачу на 2,9%, а объём фугата на 5,3%.

Модификация структуры осадка перед механическим обезвоживанием путем внесения природных сорбентов и коагулянта на основе соли титана преобразует вязкотекучий, дурно пахнущий осадок сточных вод в осветленный фугат без запаха и шлам с плотной структурой.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что внесение в осадок сточных вод мясоперерабатывающего производства природных сорбентов, а именно аргиллита и глины Стешевского месторождения эффективно влияют на процессы влагоотдачи и очистки фугата от взвешенных веществ и могут существенно уменьшить объёмы осадка сточных вод, вывозимых на полигоны для хранения и захоронения.

Внедрение на предприятия производственных центрифуг потребует капитальных вложений. Но, несмотря на это, обезвоживание осадка сточных вод в поле центробежной силы является перспективным методом, поскольку требует относительно меньшие площади для размещения оборудования и прост в использовании. Более того, в случаях сезонного увеличения нагрузок легко включается в работу.

Несмотря на то, что эффективность других природных сорбентов ниже, это не исключает перспективы их использования для интенсификации влагоотдачи и очистки фугата от взвешенных веществ.

Важным в исследовании является еще и то, что внесение водного раствора тетрахлорида титана TiCl₄ при очистке осадка сточных вод, вызывает повышенный интерес [6] в связи с показанной эффективностью. Применение данного коагулянта в совокупности с природными сорбентами может снизить реагентные затраты.

Список литературы

1. Воронов, Ю. В. Водоотведение и очистка сточных вод: учебник / Ю. В. Воронов [и др.] – изд. 5-е, доп. и перераб. – М.: Академия, 2016. – 702 с.
2. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость [Текст] / С. Грег, К. Синг. – М.: Мир. – 1984. – 310 с.
3. Kuzin, E. N. Titanium-containing coagulants for foundry wastewater treatment / E. N. Kuzin, N. E. Kruchinina // CIS Iron and Steel Review. – 2020. – Vol. 20. – P. 66-69.
4. Кручинина, Н. Е. Использование коагулянтов на основе хлоридов титана и кремния в процессах очистки фильтрата полигона твердых коммунальных отходов / Н. Е. Кручинина, Е. Н. Кузин, С. В. Азопков // Химическая промышленность сегодня. – 2017. – № 8. – С. 36-40.
5. Башмакова О.В., Керселян К.С., Кузин Е.Н., Кручинина Н.Е. Очистка сточных вод спиртовой промышленности комплексными коагулянтами // Успехи в химии и химической технологии. – 2020.
6. Кузин Е. Н. Кручинина Н. Е. Исследование процесса гидролиза и химической активности водных растворов TiCl₄ // Неорганические материалы. – 2019. – Т. 55, № 8. – С. 885-889.

УДК 661.183.7

Хвостова А.И., Нистратов А.В.

Разработка гидрофобных минерально-углеродных адсорбентов для улавливания паров бензола

Хвостова Анастасия Игоревна – студент 1 курса магистратуры кафедры промышленной экологии; xvastova2002@mail.ru

Нистратов Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной экологии.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»; nistratov.a.v@muctr.ru

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9

В статье рассмотрен процесс модификации крупного силикагеля крупнопористого крошкой шинной резины при различных условиях пиролиза. Получены кинетические кривые адсорбции паров воды и бензола из потока. На основе полученных данных выделены наилучшие условия пиролиза.

Ключевые слова: силикагель, крошка шинной резины, адсорбция, бензол

Development of hydrophobic mineral-carbon adsorbents for benzene vapor capture

Khvostova A.I., Nistratov A.V.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Russian Federation

The article considers the process of modification of coarse silica gel with coarse-pored tire rubber crumbs under various pyrolysis conditions. Kinetic curves of adsorption of water vapor and benzene from the stream are obtained. Based on the data obtained, the best pyrolysis conditions are identified.

Keywords: silica gel, tire rubber crumb, adsorption, benzene

Введение

В настоящее время наблюдается интенсивное развитие промышленности, автотранспорта и различных аспектов человеческой деятельности, что приводит к загрязнению атмосферы Земли. Таким образом, возникает необходимость в принятии конкретных мер для защиты и очистки воздушного пространства.

Ароматические углеводороды, в частности бензол, представляют значительную угрозу для живой природы. Бензол классифицируется как канцероген и мутаген. Его отличительной чертой является высокая растворимость в биологических жирах и липидах [1]. Относится к 2 классу опасности, максимальная разовая концентрация бензола в воздухе равна 0,3 мг/м³ [2]. Бензол и его производные оказывают резорбтивное действие и способны накапливаться в костном мозге, а также вызывать повреждения печени и почек, что может привести к развитию лейкемии [1].

Адсорбционная очистка газовых выбросов в атмосферу представляет собой один из эффективных способов борьбы с загрязнением окружающей среды [3]. Она позволяет улавливать и удалять вредные вещества из выбросов, такие как летучие органические соединения. Адсорбция существенно уменьшает выбросы вредных веществ в атмосферу, что положительно сказывается на качестве воздуха. Кроме того, данный метод демонстрирует высокую эффективность при низких концентрациях загрязнителей и предоставляет возможность рекуперации извлекаемых веществ [4].

Экспериментальная часть

В качестве испытуемых адсорбентов используется силикагель марки КСК и экспериментальные адсорбенты, которые получены пиролизом со скоростью 2,5-10 °С/мин, температурой выдержки – 400-600 °С, временем выдержки – 0,5-2

часа, в соотношении 1:1 силикагеля марки КСК и измельченной шинной резины с фракцией 1-3 мм (далее КСК+ШР).

В таблице 1 представлены результаты определения основных характеристик минерально-углеродных адсорбентов при различных условиях пиролиза.

Сравнивая результаты показателей модифицированных адсорбентов с исходным высушенным силикагелем, можем отметить, что значительно понижается объем сорбирующих пор по воде. Соответственно, показатель их гидрофобности выше, чем таковой высушенного силикагеля марки КСК. На основе максимальных показателей были выделены несколько адсорбентов, которые использовались в исследовании кинетики адсорбции паров бензола и воды: адсорбенты КСК+ШР с временем выдержки 1 час, скоростью нагревания 5-10 °С/мин, температурой 500-600 °С. На рисунке 1 представлена кинетика адсорбции паров бензола из насыщенного осушенного потока минерально-углеродными адсорбентами (МУА) на основе силикагеля КСК.

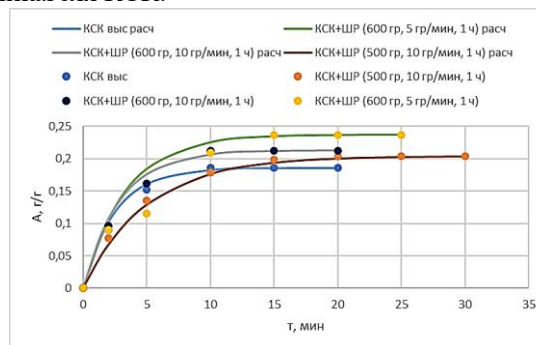


Рис. 1. Кинетика адсорбции паров бензола минерально-углеродными адсорбентами на основе силикагеля КСК (17 °С, P/Ps = 1, влажность 40%, удельный расход смеси 2 л/мин*см²)

Таблица 1. Основные показатели пористой структуры адсорбентов.

Компоненты сырья 1:1	Скорость пиролиза (°С/мин) и время выдержки (час)	Предельная температура пиролиза, °С	Выход адсорбента от массы силикагеля, %	Объем сорбирующих пор, (см ³ /г)			Суммарный объем пор по воде, см ³ /г	Показатель гидрофобности целевого продукта С ₆ Н ₆ /Н ₂ О
				Н ₂ О	ССl ₄	С ₆ Н ₆		
КСК+ШР	5 1	400	108,2	0,29	0,752	0,754	0,77	2,6
КСК+ШР	5 1	500	96,8	0,29	0,883	0,92	0,92	3,13
КСК+ШР	10 0,5	500	96,6	0,39	0,89	0,91	0,91	2,33
КСК+ШР	2,5 1	600	97	0,279	0,872	0,909	0,88	3,26
КСК+ШР	10 2	500	97	0,282	0,893	0,924	0,92	3,28
КСК+ШР	5 1	600	96	0,271	0,854	0,899	0,91	3,32
КСК+ШР	10 1	600	96,5	0,244	0,717	0,948	0,92	3,89
КСК+ШР	10 1	500	97,1	0,235	0,921	0,919	0,93	3,91
КСК	-	-	-	0,48	0,93	0,95	1,09	1,99

График демонстрирует, что адсорбенты, синтезированные с использованием крошки шинной резины, обладают адсорбционной емкостью, превышающей значения исходного высушенного КСК, при этом процесс насыщения завершается за 15 минут. Наилучшие результаты среди исследованных адсорбентов показал МУА на основе силикагеля, полученный при пиролизе при температуре 600 °С, с продолжительностью 1 час и скоростью нагрева 5 °С/мин. Адсорбционная емкость этого адсорбента составляет 0,237 г/г.

На рисунке 2 представлена кинетика адсорбции паров воды теми же МУА на основе силикагеля в тех же условиях.

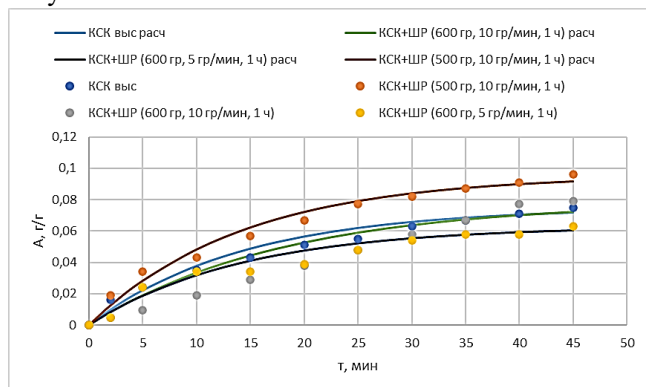


Рис. 2. Кинетика адсорбции паров воды минерально-углеродными адсорбентами на основе силикагеля КСК (17 °С, P/Ps = 1, влажность 40%, удельный расход смеси 2 л/мин*см²)

Образцы КСК+ШР поглощают пары воды почти так же, как и КСК, и не достигают состояния

насыщения за 45 минут. Однако уровень насыщения парами воды через 15 минут оказывается ниже, чем насыщение парами бензола, что указывает на возможность их использования для очистки влажных газов. Наименьшую скорость поглощения влаги демонстрирует МУА на основе силикагеля с режимом пиролиза: температура 600 °С, время обработки 1 час, скорость нагрева 5 °С/мин.

Для образца с наилучшими значениями кинетики адсорбции паров бензола и адсорбции паров воды (КСК+ШР 600°С, 5°С/мин, 1 час выдержки) была проведена адсорбция паров бензола во влажном потоке (100%). Для этого ко входу установки последовательно были подключены барботеры с водой и бензолом. На рисунке 3 представлен график кинетики адсорбции паров бензола во влажном потоке.

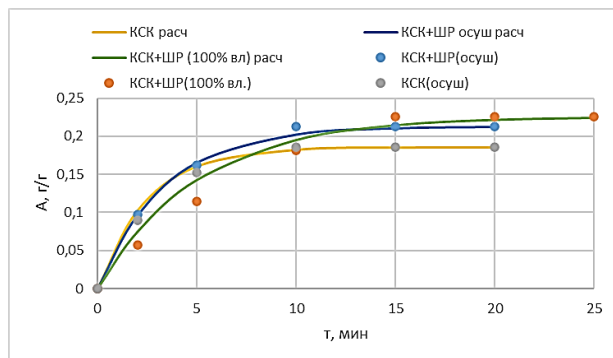


Рис. 3. Кинетика адсорбции паров бензола во влажном потоке минерально-углеродными адсорбентами на основе силикагеля КСК (17 °С, P/Ps = 1, влажность 100%, удельный расход смеси 2 л/мин*см²)

Образец КСК+ШР при 100%-ной влажности демонстрирует более продолжительный процесс адсорбции и медленное поглощение паров по сравнению с осушенным бензолсодержащим потоком. При этом уровень адсорбции составляет 0,24 г/г, что немного превышает значение адсорбции этого же образца с осушенным потоком, равное 0,22 г/г. Это указывает на то, что наряду с поглощением паров бензола происходит также незначительная адсорбция паров воды. Различия в скорости и ёмкости адсорбции остальных образцов малы.

В заключение была также исследована возможность циклического использования минерально-углеродного адсорбента на основе силикагеля (КСК+ШР 600°C, 5°C/мин, 1 час выдержки). На рисунке 4 представлен цикл адсорбция-десорбция.

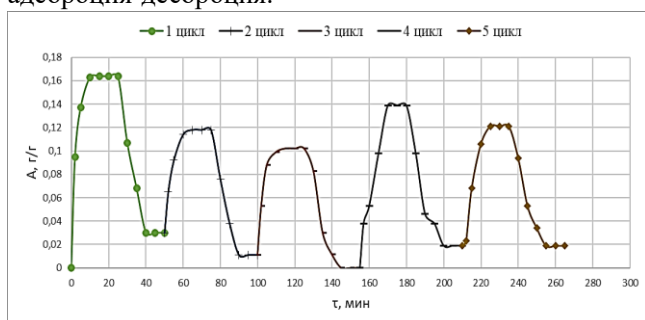


Рис. 4. Циклическая адсорбция паров бензола на основе КСК+ШР (22 °C, $P/P_s = 1$, влажность 28%, удельный расход смеси 2 л/мин*см², $\Delta t = 100-115^\circ\text{C}$)

График демонстрирует возможность применения данного адсорбента в циклической адсорбции. Десорбция происходит почти полностью до исходного уровня А г/г, что свидетельствует о высокой степени регенерации адсорбента. Тем не менее, в ходе пяти циклов отмечается снижение адсорбционной ёмкости на 25%, что указывает на необходимость проведения дополнительных исследований этого процесса.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования демонстрируют перспективность использования минерально-углеродных адсорбентов на основе силикагеля КСК и измельченной шинной резины для адсорбции паров бензола. Модификация силикагеля методом пиролиза с резиновым отходом в различных режимах позволяет целенаправленно изменять характеристики пористой структуры, повышая

гидрофобность и улучшая адсорбционную способность по отношению к органическим соединениям, таким как бензол. Адсорбенты, полученные при оптимальных условиях пиролиза (температура 600 °C, время выдержки 1 час, скорость нагрева 5 °C/мин), показали наилучшие результаты по адсорбции паров бензола как в осушенном, так и во влажном потоке, превосходя по своим характеристикам исходный силикагель КСК.

Полученные данные свидетельствуют о возможности создания эффективных адсорбентов для очистки газовых выбросов от бензола. Важно отметить, что использование отходов шинной промышленности в качестве компонента адсорбента не только улучшает характеристики продукта, но и способствует решению экологических проблем, связанных с утилизацией шин.

Проведенное исследование циклической адсорбции паров бензола на минерально-углеродном адсорбенте на основе силикагеля (КСК+ШР) демонстрирует перспективность его применения в процессах очистки газовых выбросов. Возможность практически полной десорбции и возвращения адсорбента к исходному уровню адсорбционной способности является важным преимуществом. Циклическое использование адсорбента дает возможность рекуперации бензола.

Список литературы

- Воронов М.В., Коваленко В.В., Лызлова М.В., Мельник Г.И., Трунькин Д.С., Шуварилова Т.П. Исследование содержания бензола в бензинах методами ик-спектроскопии // Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина. – 2020. – Том. 3 – С. 41-44.
- СанПин 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" от 28.01.2021 №2 (с изменениями на 30 декабря 2022 года) // URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 27.05.2025)
- Николаева Л.А., Голубчиков М.А. Адсорбционная очистка промышленных сточных вод от нефтепродуктов модифицированным карбонатным шламом. Монография. – Казань: КГЭУ, 2018 – 100 с.
- Кормина, Л. А. Технологии очистки газовых выбросов [Электронный ресурс]: учебное пособие. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2019. – 263 с.

УДК 542.06+577.1

Хромова И.И., Красноштанова А.А.

Получение липосом, нагруженных белками, для пероральной доставки

Хромова Инга Ильинична – студентка 3 курса бакалавриата кафедры биотехнологии; email: ingakhromova04@gmail.com

Красноштанова Алла Альбертовна – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры биотехнологии; email: aak28@yandex.ru.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химикотехнологический университет имени Д.И. Менделеева», Москва, Россия; 125480, ул. Героев Панфиловцев, дом 20.

В статье рассмотрены способы получения липосом на основе соевого и яичного лецитина. В качестве объекта включения был использован белок альбумин. Определена емкость двух видов липосом по яичному альбумину. Исследовано высвобождение альбумина из липосом двух видов в модельных средах, соответствующих различным отделам ЖКТ. Установлено, что большая часть альбумина высвобождается в тонком кишечнике. Ключевые слова: альбумин, белок, липосомы, везикулы.

Liposomes as protein carriers for oral delivery

Khromova.I.I.¹, Krasnoshtanova A.A.¹,

¹ Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russian Federation

The article discusses ways to produce liposomes based on soy and egg lecithin. The albumin protein was used as the inclusion object. The capacity of two types of liposomes for egg albumin was determined. The release of albumin from liposomes of two types in model media corresponding to different parts of the gastrointestinal tract was studied. It has been established that most of the albumin is released in the small intestine.

Key words: albumin, protein, liposomes, vesicles.

Введение

Липосомы — полые частицы, содержимое которых ограничено липидной мембраной. Относятся к большому семейству везикулярных (пузырьковых) структур, образованных амфифильными молекулами, и состоят из одного или нескольких липидных бислоев, окружающих водный объем.

Для получения липосом чаще всего используют лецитины различного происхождения, например, соевый и яичный. Соевый лецитин представляет собой смесь фосфолипидов, в основном фосфатидилхолина (ФХ). Соевый лецитин также содержит фосфатидилэтаноламин (ФЭ), фосфатидилинозитол (ФИ) и жирные кислоты, триглицериды и углеводы.

Яичный лецитин представляет собой смесь фосфолипидов, из которых по процентному содержанию доминирует фосфатидилхолин (ФХ). В отличие от соевого лецитина, яичный лецитин обычно содержит больше насыщенных жирных кислот. Также в нем присутствуют другие фосфолипиды, такие как, сфингомиелин, а также жирные кислоты.

В качестве объекта исследования в работе был использован альбумин, который относится к группе глобулярных белков, являющихся наиболее распространенными белками плазмы крови у млекопитающих. Альбумин состоит из одной полипептидной цепи, содержащей около 585 аминокислотных остатков. Он имеет молекулярную массу около 66,5 кДа. Его структура характеризуется высокой стабильностью и способностью обратимо связывать различные вещества [1]. Альбумин является основным компонентом, определяющим онкотическое давление плазмы крови, связывает и транспортирует в крови многие биологически

активные вещества, например, жирные кислоты, билирубин, гормоны, а также катионы металлов. Кроме того, альбумин обладает буферными свойствами и способствует поддержанию pH крови.

Известно, что при пероральном введении белки в значительной степени разрушаются в желудке, как под действием кислой среды, так и под действием фермента пепсина. Поэтому для доставки белка без деструкции в тонкий кишечник необходимо включение его в защитные капсулы, например, липосомы. Использование липосом в комбинации с белком позволяет объединить преимущества обеих систем: биосовместимость и способность липосом инкапсулировать гидрофильные и гидрофобные агенты, а также уникальные свойства альбумина, такие как: длительная циркуляция в кровотоке, таргетинг к специфическим тканям (например, за счет взаимодействия с рецепторами gp60) и стабилизация терапевтических молекул. Инкапсуляция альбумина в липосомы или его иммобилизация на их поверхности может повышать устойчивость белка к протеолизу, контролировать высвобождение в целевых участках и снижать системную токсичность.

Целью данной работы явилось получение липосом на основе соевого и яичного лецитина, нагруженных яичным лиофильным альбумином, и исследование динамики их высвобождения в среде ЖКТ.

В качестве объектов исследования использовали соевый лецитин с содержанием фосфолипидов 98,6%, производства компании Ювикс-фарм и яичный лецитин с содержанием фосфолипидов от 70% до 80%, производства компании NaturesPlus, а также альбумин яичный с содержанием основного вещества не менее 99% производства АО «Птицефабрика Роскар» (РФ).

Липосомы получали инъекционным методом [1]. Дзета-потенциал полученных липосом и их размер определяли методом динамического светорассеяния [6]. Концентрацию белка определяли микробиуретовым методом [5].

Моделирование отделов ЖКТ проводили согласно Международному стандартизированному протоколу [7].

На первом этапе работы подбирали концентрацию яичного и соевого лецитина, при которой возможно получение липосом требуемого

размера (3-5 мкм) и со значением абсолютной величины дзета-потенциала более 30 мВ. При этом оптимальные значения дзета-потенциала для стабильности в растворе составляют -30–50 мВ – липосомы с таким потенциалом обладают высокой коллоидной стабильностью (по модулю >30 мВ агрегация маловероятна) [2]. Липосомы диаметром 3–5 мкм хорошо подходят макрофагального захвата – такие частицы эффективно поглощаются иммунными клетками, что полезно для вакцин и иммунотерапии [3]. Полученные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1. Изменение размера и ζ -потенциала липосом

Соевый лецитин		Яичный лецитин	
$ \zeta\text{-потенциал} $, мВ	Размер, мкм	$ \zeta\text{-потенциал} $, мВ	Размер, мкм
32±2	8,3±0,4	36±2	36±2
31±1	8,2±0,4	45±2	5,2±0,3
36±2	7,5±0,4	36±2	5,4±0,3
38±2	5,8±0,3	40±2	6,1±0,3
35±2	6,7±0,3	42±2	5,3±0,3
32±2	5,4±0,3	38±2	5,8±0,3

По полученным данным были выбраны липосомы на основе соевого и яичного лецитина с ζ -потенциалом 32±2, размером 5,4±0,3 и 36±2 и 5,4±0,3 соответственно.

На следующем этапе работы исследовали влияние концентрации альбумина на степень его включения в липосомы. Полученные данные приведены на рис. 1.

Таким образом, для включения в липосомы наилучшей концентрацией альбумина является 0,06 мг/мл для яичного лецитина, а для соевого – 0,03 мг/мл. При указанных концентрациях альбумина степень его включения составляет 95% и 99% соответственно.

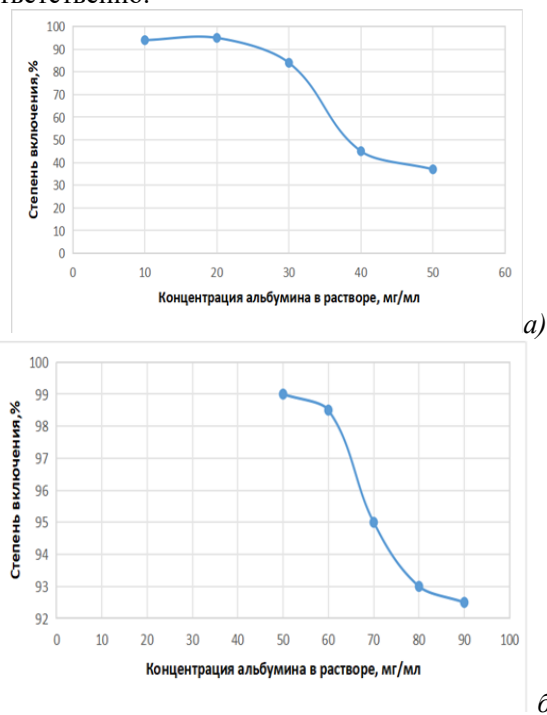


Рис. 1. Зависимость степени включения альбумина в липосомы от начальной концентрации альбумина в растворе: а) соевый лецитин, б) яичный лецитин

На следующем этапе работы изучали динамику высвобождения альбумина из липосом на основе яичного и соевого лецитина. Полученные данные приведены на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что из липосом на основе соевого лецитина в условиях ротовой полости высвобождается 20% белка, 17% высвобождается в среде желудка, в условиях среды кишечника – 24%. Суммарная степень высвобождения составила 61%. Из липосом на основе яичного лецитина в условиях ротовой полости высвобождается 9% белка, желудка – 22%, кишечника – 35%. Суммарная степень высвобождения составила – 66%.

Таким образом, для обоих типов липосом наибольшая степень высвобождения наблюдается в среде тонкого кишечника, однако в среде желудка также высвобождается сопоставимое с данными для тонкого кишечника количество белка. Загрузка белков в липосомы с последующим высвобождением преимущественно в кишечнике важна по нескольким ключевым причинам:

1. Защита от деградации в желудке. В желудке кислая среда (рН ~1.5–3) и пищеварительные ферменты (пепсин) разрушают большинство белков. Липосомы, состоящие из фосфолипидных мембран, устойчивы к кислоте и ферментам, защищая белок от преждевременной деградации.

2. Оптимизация всасывания. Кишечник — основное место абсорбции многих биологически активных веществ. Белки, высвобожденные в кишечнике, могут взаимодействовать с энтероцитами (клетками стенки кишечника), что улучшает их усвоение. Кроме того, при этом удастся избежать первого прохождения через печень, если липосомы поглощаются через лимфатические пути (например, через М-клетки пейеровых бляшек).

3. Минимизация побочных эффектов. Если белок начнет высвобождаться в желудке, это может вызвать

раздражение или иммунный ответ не в целевой зоне. Кишечник более безопасен для адресной доставки. Поэтому дальнейшие исследования будут направлены на поиск путей стабилизации липосом, нагруженных белком [4].

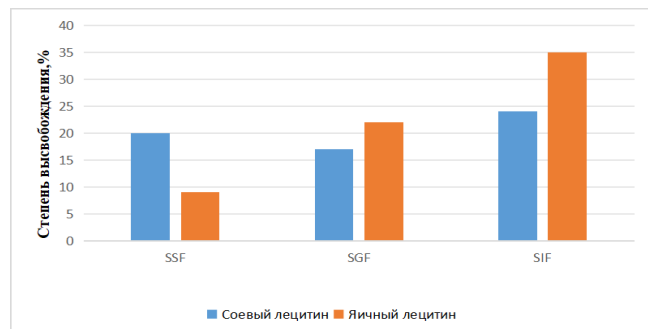


Рис. 2. Степень высвобождения альбумина в модели ЖКТ. SSF (*Simulated Salivary Fluid*) – модельная слюнная жидкость, отдел: ротовая полость. SGF (*Simulated Gastric Fluid*) – модельная желудочная жидкость, отдел: желудок. SIF (*Simulated Intestinal Fluid*) – модельная кишечная жидкость, отдел: тонкий кишечник

Заключение

1. Определены концентрации альбумина, обеспечивающие его полное включение в липосомы на основе соевого и яичного лецитина, которые составили соответственно 0,03 г/л и 0,06 г/л.

2. Изучена динамика высвобождения альбумина из липосом в средах, соответствующих отделам ЖКТ человека. Установлено, что большая часть белка высвобождается в среде тонкого кишечника (24-35%).

Однако достаточно высокие значения степени высвобождения альбумина в среде желудка (17-22%) требует поиска путей стабилизации полученных липосом.

Список литературы

1. Адзериho И. Э. и др. Оценка физико-химических свойств систем доставки лекарственных средств на основе липосом. – 2021. – С. 21.
2. Каркищенко В. Н. и др. Формирование, характеристика и *in vivo* тестирование липосомированных антиидиотипических антител к производным морфина //Биомедицина. – 2021. – Т. 17. – №. 4. – С. 8-17.
3. Кролевец А. А. и др. Молекулярная архитектура наноструктурированного биопага-д //Провинциальные научные записки. – 2021. – №. 1. – С. 68-78.
4. Литовский И., Гордиенко А. Желчнокаменная болезнь, холециститы и некоторые ассоциированные с ними заболевания (вопросы патогенеза, диагностики, лечения). – Litres, 2022.
5. Полякова Е. Д. Изучение липосом на основе соевого лецитина как средств адресной доставки нуклеотидов //проблемы и перспективы разработки и внедрения передовых. – 2023. – С. 27.
6. Семёнова М. Г. Физико-химический анализ роли структуры биологически активных липидов и биополимеров в формировании и функциональности их комплексов.
7. Xavier M. et al. From mouth to gut: microfluidic *in vitro* simulation of human gastro-intestinal digestion and intestinal permeability //Analyst. – 2023. – Т. 148. – №. 14. – С. 3193-3203.

УДК 628.349.094.3

Шлыкова А.Ю., Иванцова Н.А.

Сравнительное исследование методов окисления для очистки сернисто-щелочных сточных вод

Шлыкова Анастасия Юрьевна – студент группы Э-41; 211559@muctr.ru

Иванцова Наталья Андреевна – к.х.н., доцент кафедры промышленной экологии, ivantsova.n.a@muctr.ru

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В статье рассмотрены окислительные методы, используемые для очистки сернисто-щелочных сточных вод нефтегазохимического предприятия, такие как: электрохимическое и фотокаталитическое окисление и озонирование с H_2O_2 . По полученным результатам видно, что наибольшая эффективность достигается при применении озонирования в присутствии пероксида водорода и достигает 70 %. Также в этом случае соблюдается материальный баланс по сульфатам и сульфидам.

Ключевые слова: окисление, сернисто-щелочной сток (СЩС), очистка, сравнение

Comparative study of oxidation methods for the treatment of sulfur-alkaline wastewater

Shlykova A.Y., Ivantsova N.A.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article discusses oxidative methods used to purify sulfur-alkaline wastewater from an oil and gas chemical enterprise, such as electrochemical and photocatalytic oxidation and ozonation with H_2O_2 . According to the results obtained, the highest efficiency is achieved when using ozonation with the addition of hydrogen peroxide and reaches 70%. Also, in this case, the material balance of sulfate and sulfide is maintained.

Key words: oxidation, sulfurous-alkaline runoff, purification, comparison

Введение

В настоящее время загрязнение водных объектов является одним из остро стоящих вопросов современности. Однако в результате деятельности человека образуется большое количество загрязненных сточных вод, очистку которых сложно, с технологической точки зрения, и дорого проводить. Данные стоки могут содержать широкий спектр загрязняющих веществ.

Нефтехимическая, металлургическая, целлюлозно-бумажная и другие отрасли промышленности являются источниками сернисто-щелочных сточных вод, содержащих сульфиды и сероводород. Загрязнение стоков этими сернистыми соединениями, характерное для современного промышленного производства и хозяйственной деятельности, представляет серьезную проблему. Эти вещества ухудшают качество воды и создают угрозу для окружающей среды и здоровья человека из-за своей токсичности и неприятного запаха. Ярким примером таких сточных вод можно привести сточные воды нефтеперерабатывающих предприятий. Данная промышленность является источником образования высокотоксичных сернисто-щелочных стоков (СЩС). Сточные воды образуются в результате процесса очистки газов пиролиза от сероводорода и диоксида углерода при производстве низших олефинов, а также при щелочной обработке сжиженных газов, бензиновых и керосиновых фракций в процессе нефтепереработки из рефлюксных резервуаров. Состав этих стоков сложен и включает в себя как органические, так и неорганические компоненты, например, нефтепродукты, механические примеси, а также различные соли натрия: сульфидные, меркаптидные и карбонатные [1-3]. Всё это указывает на высокую токсичность сточных вод для окружающей среды, поэтому их сброс в поверхностные и подземные воды невозможен [4].

Ввиду такого сложного состава стоки необходимо очищать отдельно от других, поэтому некоторые предприятия создают локальные очистные сооружения для СЩС. Однако традиционные методы в данном случае требуют больших затрат и не характеризуются высокими степенями очистки [1,5]. Это говорит о том, что необходимо разрабатывать более эффективные технологии очистки сернисто-щелочных сточных вод (СЩСВ).

На сегодняшний день при очистке сточных вод большой популярностью пользуются передовые окислительные процессы (AOPs – Advanced Oxidation Processes). В их основе лежит образование гидроксил-радикалов, которые обладают высокой реакционной способностью. Поэтому данные процессы являются эффективными при деструкции некоторых загрязняющих веществ. В этой работе рассматриваются следующие процессы: электрохимическое и фотокаталитическое окисление и озонирование с добавлением пероксида водорода. Все они относятся к AOPs [6, 7].

Процессы окисления, преобразующие сернистые соединения в менее токсичные сульфаты, являются перспективными и эффективными способами их удаления. Химические, биологические и электрохимические методы окисления лидируют в этой области. Однако, выбор оптимального метода требует компромисса между его эффективностью, стоимостью, экологическими последствиями и технической сложностью.

В связи с этим в данной работе проводится сравнительное исследование некоторых методов окисления, используемых для очистки сернисто-щелочных сточных вод. В рамках исследования проводится анализ особенностей, преимуществ и ограничений методов озонирования, фото- и электроокисления с целью определения оптимальных

условий их применения для достижения максимальной степени очистки (по показателю ХПК) и эффективности перевода сульфидов в сульфаты.

Экспериментальная часть

Исследование проводилось на примере реального разбавленного сернисто-щелочного стока (СЩС) нефтегазохимического предприятия. Исходные значения стока: ХПК – 1070 мгО/л, сульфиды – 434 мг/л, сульфаты – 96 мг/л, pH – 11,3.

В ходе первого эксперимента было проведено электрохимическое окисление СЩС. Электролиз проводили на электродах Ti/Pt в гальваностатическом режиме с использованием источника постоянного тока DAZHENG PS-305D (Китай) при постоянном перемешивании. Схема установки приведена в работе [8]. Объем раствора – 150 мл, плотность тока – 1800 А/м², время обработки раствора – 30 минут.

На втором этапе производили фотохимическое окисление стока с использованием катализатора – Degussa P25. Это фотокатализатор со смешанной фазой, состоящей из анатазной и рутиловой фаз. Он является наиболее распространенным коммерческим катализатором на основе диоксида титана для различных применений при ультрафиолетовом облучении [9].

Исследование по фотоокислению проводили на лабораторной установке квазипараллельного пучка (НПО «Мелитта» Россия). Раствор помещали под источник излучения и облучали при непрерывном перемешивании. Подробная схема установки приведена в работе [10]. Объем раствора – 100 мл, масса фотокатализатора Degussa P25 – 0,02 г, время облучения – 30 минут.

Третий этап исследования – озонирования с добавлением пероксида водорода. Схема установки приведена в работе [11]. Объем стока – 100 мл, объем добавки – пероксида водорода (3 %) – 2 мл, время обработки раствора – 30 минут.

Перед и после проведения вышеописанных опытов были определены следующие данные: химическое потребление кислорода (ХПК), концентрация сульфидов и сульфатов. По полученным значениям

ХПК была оценена эффективность очистки сернисто-щелочных стоков (СЩС) по формуле (1):

$$\Xi = ((\text{ХПК}_1 - \text{ХПК}_2) / \text{ХПК}_1) * 100 \% (1)$$

где Ξ – эффективность очистки; ХПК_1 – ХПК исходного СЩС; ХПК_2 – ХПК обработанного СЩС.

На рисунке 1 представлена сравнительная диаграмма эффективности очистки сернисто-щелочных стоков (СЩС) по значениям ХПК. По полученным данным видно, что наибольшая степень очистки достигается при применении озонирования с добавкой пероксида водорода (3 %) и составляет 70 %. Комбинированное воздействие пероксида водорода и озона в слабощелочной среде за счёт синергии двух мощных окислителей обеспечивает быструю и полную деструкцию сернистых соединений даже в сложных условиях щелочности и загрязнённости. Это делает данный метод вероятно более предпочтительным по сравнению с электроокислением и фотокатализом в очистке сернисто-щелочных сточных вод.

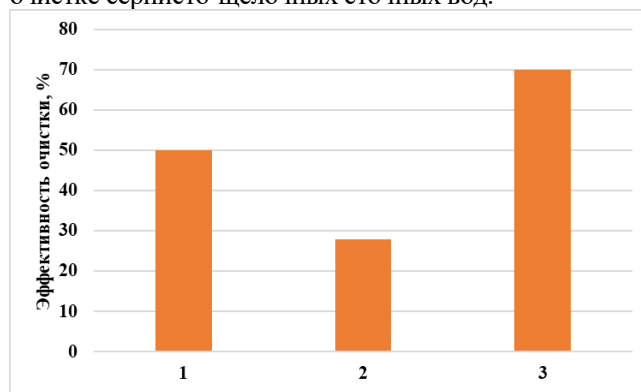


Рис. 1. Диаграмма значений эффективности очистки сернисто-щелочных сточных вод по ХПК (где 1 – электроокисление; 2 – фотокаталитическое окисление; 3 – озонирование с добавлением H₂O₂)

Также был произведен анализ сточной воды по значениям концентрации сульфидов и сульфатов до и после обработки. В таблицах 1 и 2 приведены значения в какое количество раз увеличились/уменьшились концентрации сульфатов/сульфидов соответственно.

Таблица 1. Увеличение концентрации сульфатов в СЩС после обработки различными методами

Метод окисления	Увеличение концентрации сульфатов, кол-во раз
Электрохимия	13
Фотокатализ	1,5
Озонирование	13

Таблица 2. Уменьшение концентрации сульфидов в СЩС после обработки различными методами

Метод окисления	Уменьшение концентрации сульфидов, кол-во раз
Электрохимия	2
Фотокатализ	1,2
Озонирование	13

По полученным данным (табл. 1 и 2) можно сделать вывод, что наиболее эффективным методом окисления сернисто-щелочных стоков (СЩС) является озонирование с добавкой H₂O₂, так как в этом случае достигается наибольшая эффективность очистки загрязнённых вод и составляет 70 %. К тому же только в этом процессе соблюдается материальный баланс по

сере, что может свидетельствовать о полном переводе сульфидов в сульфаты. Это может достигаться благодаря образования большего количества гидроксил-радикалов, обладающих высоким значением окислительного потенциала. Также хорошие результаты по значениям ХПК достигаются при электрохимической очистке стока – 50 %, однако

материальный баланс не сходится. Можно предположить, что сера в сульфидах переходит в иную форму, отличную от сульфатов. К сожалению, фотокаталитический процесс, вероятно, не подходит для очистки таких стоков, так как показывает низкие значения эффективности по ХПК.

Заключение

Таким образом, было доказано, что усовершенствованные окислительные процессы (AOPs) являются перспективными в очистке сточных вод нефтегазохимических предприятий. В целом изученные окислительные методы, способны удалять сернистые соединения из сточных вод. Однако эффективность и скорость процесса зависят от выбранного метода и условий его применения.

Установлено, что озонирование превосходит электроокисление и фотокатализ благодаря своей большей универсальности и надежности. Оно эффективно работает в широком диапазоне условий и нечувствительно к различным загрязнениям. Кроме того, озонирование является более экологичным и экономичным решением, так как минимизирует образование вредных побочных продуктов и требует менее сложного оборудования.

В дальнейших исследованиях необходим поиск оптимальных условий протекания процессов. Выбор оптимального метода удаления сернистых соединений зависит от конкретных характеристик сточных вод, требуемой степени очистки и экономических возможностей предприятия. Часто наиболее эффективным решением является комбинирование нескольких методов для достижения максимальной эффективности и минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

Список литературы

1. Будник В.А., Бобровский Р.И., Бабкин Д.Е. Комплексные методы очистки сернисто-щелочных сточных вод нефтеперерабатывающих производств // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2019. - № 5. – С. 58-85.
2. Корепанова Е.В., Чиркова Ю.Н. Очистка сточных вод нефтеперерабатывающих заводов // Научный журнал. – 2022. - № 3 (65). – С. 11-13.

3. Мурзакова А.Р. и др. К очистке промышленных сернисто-щелочных стоков нефтеперерабатывающих предприятий // Башкирский химический журнал. – 2007. – Т. 14. - № 2. – С.58.
4. Фесенко Л.Н., Черкесов А.Ю., Игнатенко С.И. Физико-химические и экологические аспекты технологии очистки сернисто-щелочных стоков с пиролизных установок // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2013. - № 5. – С. 44-48.
5. Бадиков А.Д. и др. Поиск путей очистки сернисто-щелочных стоков нефтеперерабатывающих предприятий // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2005. - № 2. – С.24.
6. Deng Y., Zhao R. Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment // Current Pollution Reports. – 2015. – V. 1. – P. 167-176.
7. Sarantseva A. A, Ivantsova N. A, Kuzin E. N. Investigation of the Process of Oxidative Degradation of Phenol by Sodium Ferrate Solutions // Russian Journal of General Chemistry – 2023. – V. 93. – №. 13. – P. 3454–3459.
8. Kuznetsov V.V. et al. Study of the Process of Electrochemical Oxidation of Active Pharmaceutical Substances on the Example of Nitrofurazone ((2E)-2-[(5-Nitro-2furyl) methylene] hydrazine Carboxamide) // Water. – 2023. – V. 15. – N. 19. – P. 3370.
9. Das A. et al. Photocatalytic performance analysis of Degussa P25 under various laboratory conditions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – V. 377. – P. 012101.
10. Шлыкова А.Ю. и др. Кинетика деструкции метиленового синего под воздействием импульсной ксеноновой лампы // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2024. - № 3. – С. 136-145.
11. Чурина А.А., Иванцова Н.А. Озонирование водных растворов двухатомных фенолов // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. – 2022. Т. XXXVI. - № 12. – С. 181-183.

УДК 677.08

Юмашева Ю.Ю., Петров А.С., Тихонова И.О.

Комплексный подход к переработке текстильных отходов

Юмашева Юлия Юрьевна – студент группы МЭ-11; yuyumashewa@yandex.ru.

Петров Андрей Сергеевич - студент группы МЭ-11;

Тихонова Ирина Олеговна – к.т.н., доцент кафедры промышленной экологии;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В статье рассмотрены современные методы переработки текстильных отходов, включая механические, физические и химические и биологические способы. Рассмотрены перспективы применения указанных технологий для различных категорий текстильных отходов. Приведен успешный опыт внедрения данных технологических решений на предприятиях России и зарубежных стран. Особое внимание уделено необходимости совершенствования системы сепарации и первичной подготовки текстильного вторсырья в условиях российской экономики.

Ключевые слова: текстильные отходы, регенерированное волокно, утилизация, переработка.

An integrated approach to the processing of textile waste

Yumasheva Y.Y., Petrov A.S., Tikhonova I.O.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article discusses modern methods of processing textile waste, including mechanical, physical, chemical and biological methods. The prospects of using these technologies for various categories of textile waste are considered.

The successful experience of implementing these technological solutions at enterprises in Russia and abroad is presented. Special attention is paid to the need to improve the system of separation and primary preparation of textile recyclables in the Russian economy. Keywords: textile waste, regenerated fiber, recycling, recycling.

Введение

Современное производство, ориентированное на массовое потребление, неизбежно сопровождается ростом объема отходов. Особую тревогу вызывает ситуация с текстильными отходами: согласно экспертным оценкам, их ежегодный мировой объем, включая нераспроданную одежду, достигает 92 миллионов тонн, а к 2030 году эта цифра может вырасти до 134 миллионов тонн [1]. В России проблема также приобретает значительные масштабы: на текстильные отходы приходится до 5% всех образующихся твердых коммунальных отходов, что составляет 2,3 миллиона тонн из общего объема 47 миллионов тонн. Однако на данный момент времени в России мощности по переработке текстиля ограничены 25 тысячами тонн в год, что явно недостаточно для решения проблемы. В этих условиях переход к экономике замкнутого цикла требует не только поиска инновационных методов переработки, но и совершенствования существующих технологий, а также создания всеобщей структуры сортировки вторичного сырья для увеличения доли перерабатываемых отходов.

Основная часть

В настоящее время существует несколько вариантов переработки текстильных отходов. Выбор метода утилизации зависит от типа утилизируемого сырья и конечной цели утилизации. Все методы утилизации текстильных отходов можно разделить на четыре группы: физические; механические; химические; биологические.

Однако в любом из выбранных методов перед дальнейшей переработкой текстильные отходы проходят через ряд подготовительных операций, в ходе которых производится первичная обработка отходов.

В ходе предварительной обработки первым этапом осуществляется дезинфекция поступающих отходов в специальных камерах. На данном этапе с помощью обработки паром, ультрафиолетовым или инфракрасным излучением [2] уничтожаются паразиты и бактерии.

Дезинфицированные отходы далее проходят стадию сортировки. Сортировка производится по виду волокон и по их цвету. Обычно данный этап осуществляется вручную, автоматизация данного процесса пока не имеет широкого распространения. Одним из возможных методов автоматизации данного процесса является ближняя инфракрасная спектроскопия [3], которая позволяет не только различить волокна чистого состава, но и определить компонентный состав смеси в ткани.

На следующем этапе подготовки стирка, которая определяется уровнем загрязнения материала. Текстильные изделия с небольшими загрязнениями стирают водой. Для тканей с сильными загрязнениями применяется химическая обработка с использованием специализированных моющих средств.

Технологический цикл переработки включает этап сушки, критически важный для обеспечения качества вторичного сырья. Удаление влаги не только препятствует развитию микрофлоры, но и существенно снижает объем материала, упрощая его дальнейшее использование. Для этих целей задействуются либо конвейерные сушильные системы, либо мобильные теплогенераторы.

Финальным этапом подготовительной обработки выступает удаление фурнитуры. Определение состава фурнитурных элементов и их отделения от текстильного полотна требует значительных трудозатрат и составляет наиболее сложную часть

производственного цикла. В настоящий момент данный процесс производится вручную. Некоторая отделяемая фурнитура (алюминиевая и пластиковая) может быть направлена на переработку для повторного использования.

Обязательной стадией для любого из выбранных вариантов переработки текстильных отходов будет являться механическая обработка, после которой могут применяться физические, химические или биологические методы [4]. Метод механической утилизации представляет собой операции резки исходных отходов, позволяющие разделить исходные волокна, сохраняя при этом структуру и свойства исходных тканей. Подобная переработка подходит для всех видов поступающих отходов, имеющих в составе как однородные, так и смесовые волокна. Однако если в первом случае удастся изготовить вторичную пряжу путем добавления к первичному сырью в количестве 20-90% [5,6], то во втором — это проблематично из-за нестабильности параметров исходного материала. Текстильные отходы, отличающиеся по цвету и химическому составу можно использовать для получения регенерированного волокна, используемого для создания утеплителей и мебельных наполнителей [7].

Измельчение происходит на специальных резательных машинах, таких как шредер и гильотинная резка [8]. При выборе аппарата для измельчения главным критерием является необходимый размер получаемых отрезков. Например, гильотинная резка позволяет получать более равномерные куски ткани с возможностью регулирования их размеров, в то время как шредеры подобной регулировкой не обладают.

Разволокнение проводится на специальных чесальных машинах при прохождении клочков ткани через чесальные валы, оснащенные сеткой. На выходе из аппарата поступающая ткань превращается в ватоподобную смесь волокон. Последняя стадия представляет собой скрепление полученных волокон в новое тканное полотно или утеплительный материал. Ткань из вторичных волокон получают с использованием прядильных аппаратов [9] — пневматические и кольцевые прялки. Утеплительный материал, например ватин [10,11], получают путем прошивания нитями, термоскреплением или иглопробиванием.

В России механическая переработка осуществляется на таких предприятиях как «Втор-Ком», «Ивтехно» [12,13]. Основной продукцией данных предприятий являются ватные изделия и широкий спектр нетканых материалов технического и бытового назначения.

В основе методов физической утилизации лежат воздействия, приводящие к изменению исходного агрегатного состояния с сохранением химической структуры, например, плавление утилизируемых отходов с дальнейшим формированием вторичных волокон из расплава. Физические методы могут быть применены для синтетических полимерных тканей: полиамидных, полипропиленовых и полиэфирных

[14]. Однако для некоторых волокон есть ограничение в получении вторичной продукции, например, волокна эластана при повторном прядении теряют первоначальные свойства, в связи с чем из таких отходов можно получать только твердые формы (бруски).

Полученные физическим методом волокна находят применение в изготовлении различных изделий, включая геотекстиль, ковровые покрытия, звукопоглощающие элементы, обивку салонов автомобилей, а также фильтрующие и сорбирующие материалы [15]. Крупные волокнистые фракции используются при производстве утепляющих материалов для одежды и в роли наполнителя. Несмотря на технологическую перспективность данного метода для переработки полиэфиров, его промышленное внедрение сдерживается высокой стоимостью очистки от примесей.

Химическая утилизация представляет собой способ переработки, при котором на отходы происходит воздействие специального химического реагента. При использовании данного метода отходы в зависимости от их состава растворяют с получением вторичных волокон, или модифицируют и деполимеризуют.

Для переработки целлюлозосодержащих волокон, например, лиоцелла и вискозы, возможно применение экстракции с использованием специальных ионных жидкостей, таких как N-метилморфолин-N-оксид (ММО), хлорид 1-бутил-3-метилимидазолия, дитилфосфат 1-этил-3-метилимидазолия или хлорид 1-аллил-3-метилимидазолия [16]. Из полученного раствора извлекают вторичные волокна. На отечественном рынке аналогичные технологии планирует применять АО «Краслесинвест» [17].

Отходы, состоящие из полимерных материалов, таких как ПЭТФ или полиамид, подвергают химическим реакциям, приводящим к получению их мономеров, которые затем вновь используют для синтеза тканей [18]. Данный метод утилизации характеризуется значительным энергопотреблением и необходимостью применения специализированного технологического оснащения. В то же время его достоинством выступает способность перерабатывать низкосортные текстильные отходы за счет многоступенчатой очистки с применением химических реагентов.

Биологические методы переработки могут быть использованы для текстильных отходов, состоящих из натуральных тканей. Существуют два таких процесса: ферментация и анаэробное сбраживание.

Ферментация представляет собой процесс, при котором микроорганизмы (например, *Zymomonas mobilis*, *Aspergillus niger*, *Saccharomyces cerevisiae*) в процессе своей жизнедеятельности последовательно переводят целлюлозу в сахар, который в свою очередь преобразуют в этанол, который может быть использован в качестве альтернативного топлива.

Анаэробное брожение представляет собой процесс утилизации волокон, состоящих в основном

из целлюлозы, с получением биогаза, основным компонентом которого является метан.

Заключение

Выбор метода утилизации текстильных отходов зависит от состава перерабатываемого вторсырья, технологических возможностей утилизатора, и целей проведения утилизации. Наиболее распространенным на данный момент является физический метод, благодаря довольно простой технологии и меньшей требовательности к сортировке. Другим довольно перспективным методом является химическая экстракция натуральных тканей, входе которой можно получать качественные вторичные волокна. Физические методы хоть и имеют довольно простую технологию, на данный момент времени не могут получить широкого распространения из-за высоких затрат на удаление загрязняющих примесей. Химические процессы деполимеризации полимерсодержащих тканей технологически сложны и требуют больших энергетических затрат. Биологические методы требуют от отходов высокого содержания целлюлозы и безвозвратно извлекают отходы из цикла, переводя их в биотопливо.

Для российских условий особую значимость приобретает развитие централизованной системы сбора, классификации и подготовки текстильных отходов к дальнейшей переработке, что станет основой для стабильного обеспечения перерабатывающих мощностей необходимыми объемами сырья.

Список литературы

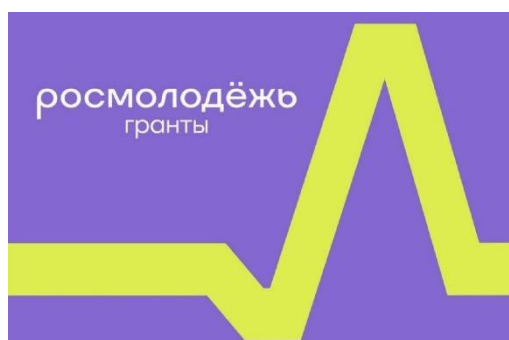
1. Курденкова А. В. и др. Прогнозирование разрывной нагрузки нетканых агротекстильных материалов после действия естественной светопогоды в зависимости от времени действия искусственной инсоляции // Известия высших учебных заведений: Технология текстильной промышленности. – 2023. – №. 3 (405). – С. 95-100.
2. Шарипова Р. Г., Гирфанова Л. Р. Перспективы вторичного использования и переработки текстильных отходов в Республике Башкортостан // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика. – 2019. – №. 4 (30). – С. 41-49.
3. Зулунов Р. М., Каюмов А. М. Идентификация и сортировка текстиля для автоматизированной обработки с помощью ближней инфракрасной спектроскопии // Universum: технические науки. – 2024. – Т. 1. – №. 3 (120). – С. 38-41.
4. Азанова А. А., Хисамиева Л. Г. Технологии переработки текстильных отходов: проблемы и перспективы // Известия высших учебных заведений: Технология текстильной промышленности. – 2023. – №. 3 (405). – С. 257.
5. Ellen MacArthur Foundation A new textiles economy: redesigning fashion's future [Электронный ресурс]: URL: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/a-new-textiles-economy> (Дата обращения: 30.04.2025)

6. Ташменов Р. С., Мырхалыков Ж. У., Калдыбаев Р. Т. Исследование состава очищенных отходов для производства пряжи пневмомеханического способа прядения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013. – №. 6. – С. 74.
7. El Wazna M. et al. Thermo physical characterization of sustainable insulation materials made from textile waste // Journal of Building Engineering. – 2017. – Т. 12. – С. 196-201.
8. Шарипова Р. Г., Гирфанова Л. Р. Перспективы вторичного использования и переработки текстильных отходов в Республике Башкортостан // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика. – 2019. – №. 4 (30). – С. 41-49.
9. Герасимович Е. М. Проблемы и перспективы вторичной переработки отходов текстильной промышленности // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2016. – №. 5-1. – С. 79-82.
10. Патент № 2 296 838 С2 Российская Федерация, МПКЕ04В 1/62. Экологически приемлемый изоляционный материал и способ его производства: № 2002120454/03: заявл. 27.01.2004: опубл. 10.04.2007
11. Патент № 93 036 485 А Российская Федерация, МПК D04H 1/46. Нетканый материал: № 93036485/12: заявл. 13.07.1993: опубл. 10.09.1995
12. АО Втор-Ком: [Электронный ресурс]. URL: <https://vtor-kom.ru/?ysclid=m2i0b918nn132850030> (Дата обращения: 02.05.2025)
13. ИВТЕХНО: [Электронный ресурс]. – URL: <https://iv-teh.ru/> (Дата обращения: 02.05.2025)
14. Клинков А. С., Беляев П. С., Соколов М. В. Утилизация и вторичная переработка полимерных материалов. – Тамбов: Изд-во ТГТУ - 2012.
15. Федорова, Т. А. Получение сырьевых ресурсов в переработке текстильных материалов / Т. А. Федорова, А. Е. Гаврилова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2023. – № 6(408). – С. 5-10.
16. Singhal S., Agarwal S., Singhal N. Chemical recycling of waste clothes: a smarter approach to sustainable development // Environmental Science and Pollution Research. – 2023. – Т. 30. – №. 19. – С. 54448-54469.
17. АО «Краслесинвест»: [Электронные ресурсы]. – URL: <https://www.kraslesinvest.ru/> (Дата обращения: 02.05.2025)
18. Левашова В. И., Шаяхметов А. И. Пути химической переработки полиэтилентерефталата /. «Наука XXI века: новый подход»: Материалы IX молодежной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 8-9 апреля 2014 года, г. Санкт-Петербург. – 2014. – С. 58.

**Российский химико-
технологический
университет
имени Д.И. Менделеева**



При поддержке



**Федерального агентства
по делам молодѣжи
(Росмолодѣжь)**

Научное издание

УСПЕХИ В ХИМИИ И ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Том XXXIX

№ 10 (292)

Компьютерная верстка: Верхососова А.И.
Текст репродуцирован с оригиналов авторов

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

Совет молодых ученых и специалистов (СМУС)

Адрес университета: 125047, г. Москва,

Миусская пл., д. 9