

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Ивановский государственный химико-технологический университет»

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

**«ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ДЕСТРУКЦИИ ЦЕФТРИАКСОНА В
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ»**

Выполнила:

ученица 10А класса,

МБОУ «Гимназия имени

А.Н. Островского»

Дроздова Лолита Романовна

Руководитель:

асс. каф. пром. экологии ИГХТУ

Извекова Анна Алексеевна

Иваново 2025

Оглавление

Введение.....	3
1. Литературный обзор	5
1.1. Зарождение антибиотиков	5
1.2. История возникновения цефтриаксона.....	7
1.3. Цефтриаксон как препарат.....	8
1.3.1. Фармакодинамика	9
1.3.2. Фармакокинетика.....	10
2. Экспериментальная часть.....	12
2.1. Экспериментальная установка.....	12
2.2. Эффективность очистки сточных вод от цефтриаксона	13
2.3. Биотестирование	14
Выводы.....	16
Список литературы	18

Введение

Глобальное загрязнение гидросферы и, как результат, уменьшение доступности пресной воды для потребления – это одна из серьезных экологических задач нынешнего времени.

Мы все чаще сталкиваемся с растущей проблемой загрязнения водоемов фармацевтическими соединениями, особенно опасны антибиотики. Масштабное попадание антибиотиков в водоемы по всему миру, достигающее ежегодно около 8500 тонн, делает проблему загрязнения окружающей среды ими крайне актуальной. Попадая в окружающую среду через сточные воды, они способствуют развитию устойчивости у патогенных микроорганизмов, что представляет серьезную угрозу для экосистем и здоровья человека. Это негативно сказалось на эффективности лечения людей в период Covid-19.

Ученые исследовали лишь малую долю существующих вирусов (около 6 тыс. из 100 млн) и 13% всех бактерий. В период неопределенности, связанной с лечением COVID-19, врачи начали применять азитромицин, антибиотик из группы макролидов, известный своим широким противомикробным действием. Это привело к возникновению глобальной проблемы XXI века – антибиотикорезистентности микроорганизмов.

Лекарственная устойчивость является серьезной глобальной проблемой, приводящей к 700 тысячам смертей ежегодно, причем 230 тысяч из них связаны с туберкулезом. Врачи сталкиваются с трудностями в лечении инфекций, передаваемых половым путем, а также заболеваний дыхательной и мочевыделительной систем. Если текущая ситуация не изменится, к 2030 году резистентность к противомикробным препаратам может унести жизни 2,4 миллиона человек в странах с высоким уровнем дохода.

Проблема антибиотикорезистентности бактерий имеет серьезные последствия для пациентов: они вынуждены проходить более длительное стационарное лечение, сталкиваются с повышенным риском летального исхода и развитием побочных эффектов. Все это приводит к существенным финансовым затратам для системы здравоохранения.

Одним из наиболее широко используемых антибиотиков является цефтриаксон - третий поколения цефалоспоринов, применяемый для лечения тяжёлых бактериальных инфекций. Вследствие неполного метаболизма в организме и несовершенства систем очистки сточных вод цефтриаксон накапливается в водной среде.

Ввиду этого разработка новых технологических решений для ликвидации антибиотиков в водной среде и очистки сточных вод от них становится важной задачей. Эти решения должны отвечать современным стандартам: быть легкодоступными, удобными в эксплуатации, экологически безопасными и экономически оправданными [6].

Современное общество активно внедряет инновационные технологии, и одной из таких передовых разработок является технология, основанная на

применении низкотемпературной атмосферной плазмы. Области применения холодной плазмы постоянно расширяются, охватывая такие важные направления, как химическая промышленность, инновационные материалы, экология, медицина, микроэлектроника, оптика, электроника. Обработка материалов в условиях атмосферного плазменного разряда имеет ряд существенных преимуществ: она не требует больших вакуумных систем, позволяет работать с широким спектром материалов, отличается оперативностью и универсальностью, а также является более экономичной по сравнению с вакуумно-плазменным оборудованием.

Традиционные методы очистки воды часто не обеспечивают полного разрушения антибиотиков. Одним из перспективных способов очистки сточных вод является использование низкотемпературной плазмы, в частности диэлектрического барьерного разряда (ДБР), который производит высокоактивные частицы (гидроксильные радикалы, атомарный кислород), способные разлагать сложные органические молекулы.

Данный проект направлен на изучение особенностей процесса деструкции цефтриаксона в водных растворах под действием диэлектрического барьерного разряда. Полученные данные позволят оценить потенциал плазменных технологий для очищения водной среды от антибиотика и сформировать теоретический материал для разработки новых экологически безопасных методов очистки.

Цель исследования:

Исследование процесса деструкции антибиотика Цефтриаксона в диэлектрическом барьерном разряде с целью оценки эффективности метода и перспектив его практического применения для очистки сточных вод от фармацевтических препаратов.

Задачи исследования:

1. Познакомиться с методикой спектрофотометрического анализа жидкости перед обработкой и после нее.
2. Освоить принципы работы установки диэлектрического барьерного разряда и научиться проводить эксперименты по обработке жидкостей данным методом.
3. Провести серию опытов по разрушению антибиотика цефтриаксона в водном растворе под воздействием диэлектрического барьерного разряда.
4. Сравнить эффективность разных режимов обработки и выбрать оптимальный режим для достижения максимальной степени разложения цефтриаксона.
5. Сделать выводы о целесообразности использования данного метода для очистки сточных вод от остатков фармацевтических препаратов.

Методы исследования:

Задачей этого исследования является анализ результативности очистки сточных вод от цефтриаксона с использованием плазмы диэлектрического барьерного разряда. Проект включает в себя обзор литературы, сборку

экспериментальной установки, проведение серии экспериментов, анализ показаний и сравнение выявленных результатов. Для мониторинга концентрации цефтриаксона и оценки степени его удаления будет использоваться спектрофотометрический анализ.

Ожидаемые результаты:

1. Установление эффективности очистки сточных вод от цефтриаксона при использовании плазмы диэлектрического барьерного разряда;

2. Экспериментальное установление деструкции цефтриаксона под действием диэлектрического барьерного разряда (ДБР) в различных режимах;

3. Разработка базы данных по кинетике, продуктам и энергозатратам процесса, которая станет ключевой для моделирования и внедрения эффективных систем очистки сточных вод на фармацевтических организациях и в медицинских учреждениях.

В рамках данного исследования проводится оценка качества процесса деструкции цефтриаксона в диэлектрическом барьерном разряде в сточных водах. Полученные данные могут стать фундаментом для получения новых, более эффективных стратегий очистки и уменьшение антропогенного воздействия на экосистему. Помимо того, результаты исследования имеют значение для промышленных субъектов и государственных учреждений, вовлеченных в процесс водоочистки.

1. Литературный обзор

1.1. Зарождение антибиотиков

Мечников отмечал, что «в процессе борьбы друг с другом микробы вырабатывают специфические вещества как орудия защиты и нападения». Сегодняшние антибиотики созданы благодаря метаболической активности бактерий, плесней и актиномицетов. Эти соединения оказывают разрушительное воздействие или подавляют развитие патогенных микробов. Еще в конце XIX века профессор В.А. Манассеин зафиксировал антибактериальные свойства плесени пенициллиум, а А.Г. Полотебнов эффективно использовал ее для терапии гнойных повреждений и сифилитических поражений. Абу Али Ибн Сина (Авиценна), знаменитый арабский врач, также советовал использовать плесень при гнойных инфекциях.

Эра антибиотиков в современном значении этого слова наступила с замечательного открытия- пенициллина Александром Флемингом. В 1929 г. английский ученый Александр Флеминг опубликовал статью, принесшую ему всемирную популярность: он сообщил о новом, выделенном из колоний плесени, веществе, которое назвал пенициллином. С этого момента и начинается «биография» антибиотиков, которые по праву считаются

«лекарством века». Однако, А. Флеминг не сообщил о виде плесени, из которой он выделил пенициллин. Уточнение сделал известный миколог Шарль Вестлинг. Но этот пенициллин, открытый Флемингом, имел ряд недостатков. В жидком состоянии он быстро терял свою активность. Из-за слабой концентрации его приходилось вводить в больших количествах, что было очень болезненно. Пенициллин Флеминга содержал в себе также много побочных и далеко не безразличных белковых веществ, попавших из бульона, на котором выращивалась плесень пенициллиум. В результате всего этого использование пенициллина для лечения больных затормозилось на несколько лет. Только в 1939 г. врачи медицинской школы Оксфордского университета приступили к изучению возможности лечения пенициллином инфекционных болезней. Г. Флори, Б. Хайн, Б. Чейн и другие специалисты составили план подробного клинического испытания пенициллина. Летом 1940 года первые белые мыши, экспериментально зараженные стрептококками в лабораториях Оксфордского университета, были спасены от смерти благодаря пенициллину. Полученные результаты помогли клиницистам проверить пенициллин на людях.

Зарождение производства антибиотиков связано с исследованиями Н.А. Красильникова, начатыми в конце 1930-х годов и посвященными актиномицетам, а также с последующими работами З.В. Ермольевой, Г.Ф. Гаузе и других ученых, которые изучали антибактериальные свойства почвенных микроорганизмов. Важным этапом стало получение отечественного пенициллина в 1942 году в лаборатории З.В. Ермольевой. Всемирное признание и широкое применение пенициллина предвещали собой революционный прорыв в медицине, положив начало эре антибиотиков и стимулировав активный поиск новых антибактериальных препаратов.

С. Ваксман впервые ввел термин «антибиотик», подразумевая под этим химическое вещество, образуемое микроорганизмами, обладающее способностью подавлять рост или даже разрушать бактерии и другие микроорганизмы. Со временем данное понятие получило более широкое толкование.

Были синтезированы таблетки феноксиметилпенициллина для перорального применения. Данный препарат успешно прошел доклинические и клинические исследования. Его ключевым преимуществом является устойчивость к кислой среде желудочного сока, что стало определяющим фактором для его успешного производства и использования.

Появились жидкие формы антибиотиков, представленные в виде суспензий. Они завоевали популярность в педиатрии благодаря сочетанию высокой терапевтической активности с привлекательным запахом и сладким вкусом. Это делает их эффективным средством для борьбы с различными детскими заболеваниями. Удобство применения, в частности, возможность

дозирования в виде капель, позволяет использовать их даже для новорожденных [1].

1.2. История возникновения цефтриаксона

Открытие цефалоспориновых антибиотиков, произошедшее в середине XX века, подобно открытию пенициллина, было обусловлено случайностью. Итальянский профессор, занимавшийся изучением микрофлоры морской воды в месте выброса сточных вод в Университете города Кальяри (Сардиния), Джузеппе Бротцу в 1945 году выделил штамм *Cephalosporium acremonium*. Он обнаружил, что данный микроорганизм способен синтезировать вещество, эффективно подавляющее рост множества бактерий. Клинические испытания продемонстрировали значительное улучшение состояния пациентов с тифом при введении этого вещества. Значительный вклад в последующие исследования и первые успехи в разработке цефалоспоринов внесли английские ученые Ньютон Г.Г. и Абрахам Е.П. [2, 3].

На первых этапах, в течение нескольких лет были идентифицированы различные соединения, такие как цефалоспорин Р и цефалоспорин N. Однако детальный анализ выявил, что они не являются основными источниками широкого антимикробного эффекта, производимого *Cephalosporium acremonium*. Прорыв наступил в 1953 году с выделением цефалоспорина С. Дальнейшие исследования подтвердили его высокую антимикробную активность и, что особенно важно, устойчивость к воздействию пенициллиназы, вырабатываемой стафилококками.

Возможность создания новых полусинтетических соединений в группе цефалоспоринов возникла после выделения в 1962 году в чистом виде 7-аминоцефалоспороновой кислоты-ключевого компонента этих антибиотиков. Вслед за этим в 1964 году компании Эли Лилли удалось синтезировать первый представитель цефалоспоринов - цефалотин.

Классификация цефалоспоринов по поколениям основана на различиях в их антибактериальном воздействии. Современная система делит эти препараты следующим образом:

✓ Цефалоспорины первого поколения преимущественно эффективны против грамположительных бактерий, таких как стрептококки и стафилококки, часто вызывающие обширные гнойные заболевания, болезни органов дыхания и мочевыводящей системы. Для борьбы с ними наиболее часто применяют цефазолин (кефзол) и цефалексин (кефлекс, цеполекс).

✓ Цефалоспорины второго поколения (цефуроксим, цефамандол, цефаклор) воздействуют на грамположительные, грамотрицательные микроорганизмы и анаэробные бактерии. Их используют при инфекциях легких, кожи и мягких тканей, а также при серьезных состояниях, включая перитонит и сепсис. Эти препараты способны проникать через гемато-

энцефалический барьер, в костную ткань и синовиальную жидкость, что позволяет применять их для лечения остеомиелита и артрита.

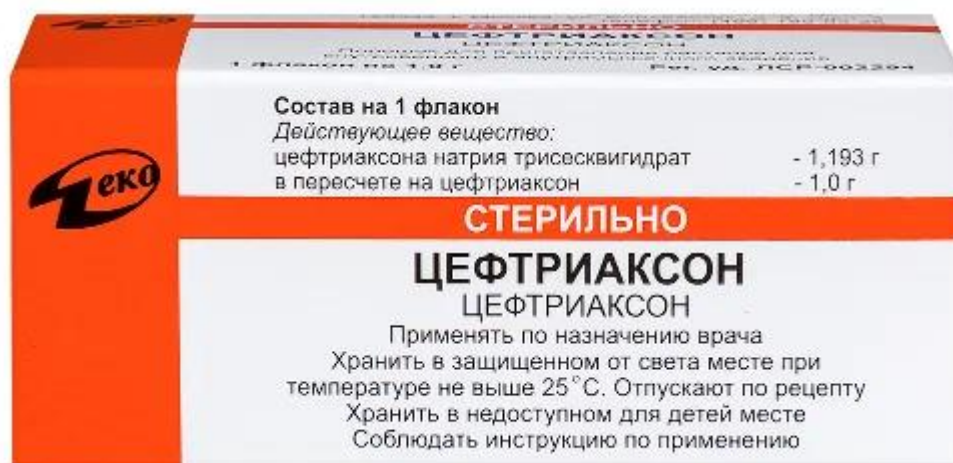
✓ Цефалоспорины третьего поколения (цефотаксим (клафоран), цефтриаксон, цефиксим, цефоперазон) демонстрируют повышенную активность против грамотрицательной флоры и устойчивость к цефалоспориназе. Благодаря им стало возможным лечение гонореи и многих хирургических инфекций, вызванных синегнойной палочкой и протеем. Они применяются при тяжелых бронхолегочных и урогенитальных инфекциях, миокардите, сепсисе, болезнях суставов и кожных заболеваниях.

✓ Цефалоспорины четвертого поколения (цефпиром (кейтен)) характеризуются высокой активностью против как грамположительных, так и грамотрицательных микроорганизмов, включая протей и синегнойную палочку.

✓ Цефалоспорины пятого поколения появились относительно недавно. В настоящее время цефтобипрол, основной представитель этого класса, используется исключительно для внутривенного введения. Это антибиотик широкого спектра действия, способный уничтожить даже метициллин-резистентные стафилококки, которые часто являются причиной внутрибольничных инфекций. Устойчивость к цефтобипролу, возникающая вследствие случайных мутаций в лабораторных условиях, встречается редко.

Цефалоспорины - это антибиотики, обладающие высокой антибактериальной активностью, но их применение может вызывать множество побочных эффектов. Чаще проявляются аллергические реакции (сыпь, зуд, крапивница, бронхоспазм, синдромы Стивенса-Джонсона и Лайелла, анафилактический шок), а также рвота, желтуха, образование камней в желчном пузыре и почках, нефрит и повышение креатинина/мочевины.

1.3. Цефтриаксон как препарат



Цефтриаксон (6R-бальфа, 7бета(Z)-7-2-амино-4-тиазолил(метоксиимино)ацетил амино-8-оксо-3-(1,2,5,6-тетрагидро-2-метил-

5,6-диоксо-1,2,4-триазин-3-ил)тиометил-5-тиа-1-азабицикло 4.2.0 окт-2-ен-2-карбоновая кислота (в виде динатриевойсоли)) — антибиотик цефалоспоринового ряда широкого спектра действия.

Молярная масса цефтриаксона натрия ($C_{18}H_{16}N_8Na_2O_7S_3$) - 598 г/моль.

Препарат содержит 3,6 моль или 83 мг натрия на 1 г.

Цефтриаксон 0,05 ммоль/л Навеска 0,003 г/л	Цефтриаксон 0,1 ммоль/л Навеска 0,00598 г/л	Цефтриаксон 0,2 ммоль/л Навеска 0,01196 г/л
--	---	---

0,05 ммоль/л = 2,99 мг/л

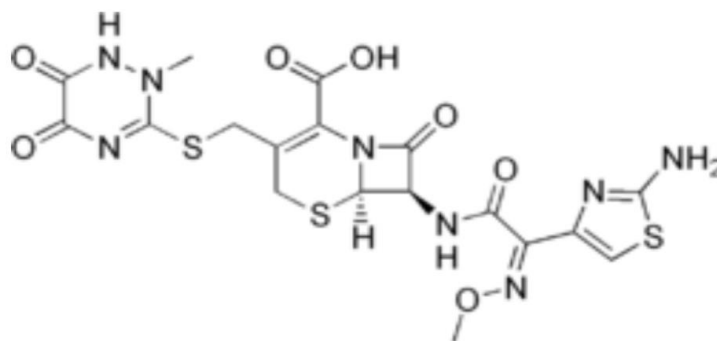
0,1 ммоль/л = 59,8 мг/л

0,2 ммоль/л = 119,6 мг/л

Торговое название: Цефтриаксон.

Международное непатентованное название: Цефтриаксон.

Структурная формула:



Фармакологическая группа: цефалоспорины [4].

Лекарственная форма: порошок для приготовления раствора для внутривенного и внутримышечного введения 1 г: фл. 1 шт.

1.3.1. Фармакодинамика

Полусинтетический цефалоспориновый антибиотик III поколения широкого спектра действия.

Бактерицидная активность цефтриаксона обусловлена подавлением синтеза клеточных мембран. Препарат отличается большой устойчивостью к действию бета-лактамаз (пенициллиназы и цефалоспориназы) грамположительных и грамотрицательных микроорганизмов.

Цефтриаксон активен в отношении грамотрицательных аэробных микроорганизмов: *Enterobacter aerogenes*, *Enterobacter cloacae*, *Escherichia coli*, *Haemophilus influenzae* (в т.ч. штаммы, устойчивые к ампициллину), *Haemophilus parainfluenzae*, *Klebsiella* spp. (в т.ч. *Klebsiella pneumoniae*), *Neisseria gonorrhoeae* (в т.ч. штаммы, образующие и не образующие пенициллиназу), *Neisseria meningitidis*, *Proteus mirabilis*, *Proteus vulgaris*, *Morganella morganii*, *Serratia marcescens*, *Citrobacter freundii*, *Citrobacter diversus*, *Providencia* spp., *Salmonella* spp., *Shigella* spp., *Acinetobacter calcoaceticus*.

Ряд штаммов вышеперечисленных микроорганизмов, которые проявляют устойчивость к другим антибиотикам, таким как пенициллины, цефалоспорины, аминогликозиды, чувствительны к цефтриаксону.

Отдельные штаммы *Pseudomonas aeruginosa* также чувствительны к препарату.

Препарат активен в отношении грамположительных аэробных микроорганизмов: *Staphylococcus aureus* (в т.ч. штаммы, образующие пенициллиназу), *Staphylococcus epidermidis* (стафилококки, устойчивые к метициллину, проявляют устойчивость ко всем цефалоспорином, включая цефтриаксон), *Streptococcus pyogenes* (бета-гемолитические стрептококки группы А), *Streptococcus agalactiae* (стрептококки группы В), *Streptococcus pneumoniae*; анаэробных микроорганизмов: *Bacteroides* spp., *Clostridium* spp. (за исключением *Clostridium difficile*).

1.3.2. Фармакокинетика

Всасывание: при в/м введении цефтриаксон хорошо абсорбируется из места введения и достигает высоких концентраций в сыворотке. Биодоступность препарата - 100 %.

Средняя концентрация в плазме достигается через 2-3 ч после инъекции. При повторном в/м или в/в введении в дозах 0.5-2.0 г с интервалом 12-24 ч происходит накопление цефтриаксона в концентрации, которая на 15-36% превышает концентрацию, достигаемую при однократном введении.

Распределение: при введении в дозе от 0.15 до 3.0 г V_d - от 5.78 до 13.5 л.

Цефтриаксон обратимо связывается с белками плазмы крови.

Выведение: при введении в дозе от 0.15 до 3.0 г $T_{1/2}$ составляет от 5.8 до 8.7 ч; плазменный клиренс - 0.58-1.45 л/ч, почечный клиренс - 0.32-0.73 л/ч.

От 33% до 67% препарата выводится в неизменном виде почками, остальная часть экскретируется с желчью в кишечник, где биотрансформируется в неактивный метаболит.

Фармакокинетика в особых клинических случаях:

У новорожденных и у детей при воспалении мозговой оболочки цефтриаксон проникает в ликвор, при этом в случае бактериального менингита в среднем 17% от концентрации препарата в плазме диффундирует в спинномозговую жидкость, что примерно в 4 раза больше, чем при асептическом менингите. Через 24 ч после в/в введения цефтриаксона в дозе 50- 100 мг/кг массы тела концентрации в спинномозговой жидкости превышают 1.4 мг/л. У взрослых больных менингитом через 2- 24 ч после введения дозы 50 мг/кг массы тела, концентрации цефтриаксона в спинномозговой жидкости во много раз превосходят минимальные подавляющие концентрации для самых распространенных возбудителей менингита [5].

Цефтриаксон - антибиотик третьего поколения группы цефалоспоринов широкого спектра действия. Применяется внутривенно или внутримышечно

для лечения бактериальных инфекций различных органов и систем, включая инфекции дыхательных путей, мочевыводящих путей, кожи, мягких тканей, костей и суставов, а также сепсис и менингит. Эффективен против многих грамположительных и грамотрицательных бактерий. Около 40-65% цефтриаксона выделяется с мочой в неизменном виде.

2. Экспериментальная часть

2.1. Экспериментальная установка

Для очистки модельных водных растворов с органическими загрязнителями применялась лабораторная установка, которая реализовывала диэлектрический барьерный разряд (ДБР).

Реактор длиной 45 см, представляет собой коаксиальную систему, состоящую из внешней пирексовой трубки диаметром 12 мм, являющейся диэлектрическим барьером разряда внутреннего электрода из алюминиевого сплава диаметром 10 мм. Внешним электродом являлась алюминиевая фольга, равномерно нанесенная на наружную поверхность стеклянной трубки. Размер разрядной зоны составлял 12 см. На внутренний электрод была нанесена гидрофильная стеклоткань толщиной 1 мм, с помощью которой обеспечивался пленочный режим течения модельного раствора в системе. Для создания плазмы использовался разряд с током 0,8 мА и напряжением 15 кВ. В качестве рабочего газа применялся кислород, подаваемый со скоростью 3 см³/с. Раствор проходил через зону разряда в течение 1,5- 6,0 секунд, при этом его объемный расход составлял от 0,04 до 0,3 мл/с. Выделяющийся озон по трубке выходил на улицу.

Схема реактора ДБР с коаксиальным расположением электродов (рис. 1):

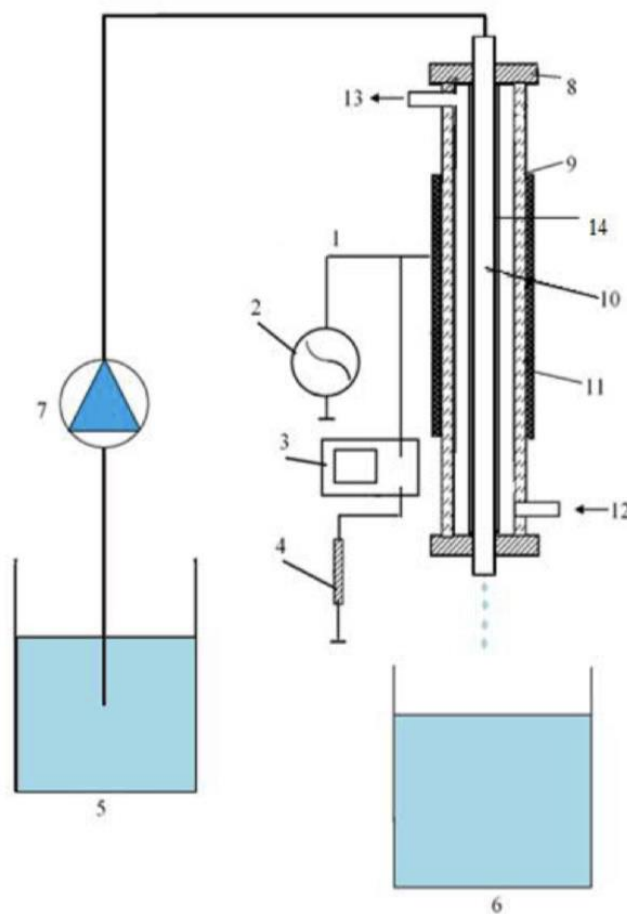


Рис. 1. Реактор ДБР с коаксиальным расположением электродов: 1- реактор; 2 - источник напряжения; 3 - осциллограф GW Instek GDS-2072; 4 - сопротивление (100 Ом); 5 - емкость с модельным раствором; 6 - емкость для раствора, прошедшего обработку; 7 - перистальтический насос; 8- втулки из фторопласта; 9 - диэлектрик (пирексное стекло); 10 - внутренний электрод; 11 - внешний электрод; 12 - вход газа; 13 - выход газа; 14 - гидрофобный материал [7].

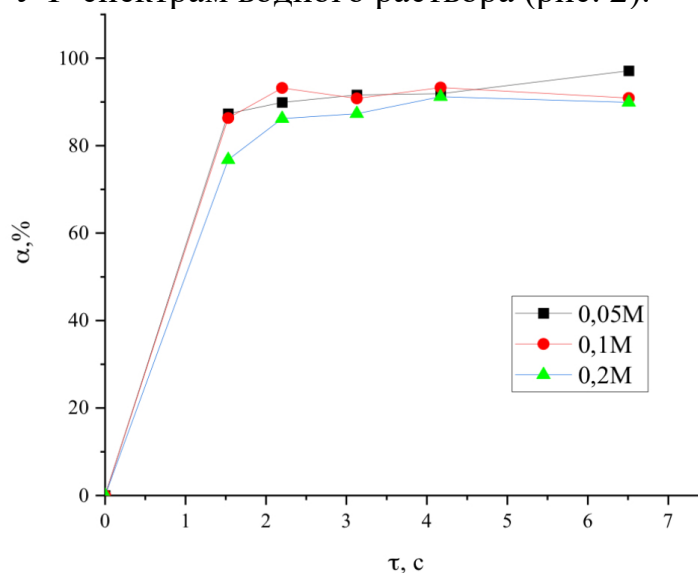
2.2. Эффективность очистки сточных вод от цефтриаксона

Объектом исследования являлись водные растворы цефтриаксона с концентрацией от 0,05 ммоль/л, 0,1 ммоль/л и 0,2 ммоль/л. Для их приготовления готовили раствор с концентрацией 2 ммоль/л (0,1196 г цефтриаксона добавили в 1 литр воды и тщательно перемешали). Чтобы получить раствор с концентрации 0,2 ммоль/л к раствору с концентрацией 2 ммоль/л (100 мл) добавили 900 мл воды; 0,1 ммоль/л - к 50 мл добавили 950 мл, 0,05 ммоль/л - к 25 мл добавили 975 мл.

Эксперимент проводили с разными значениями расхода плазмообразующего газа (в нашем случае кислорода).

Изменение концентрации и эффективность очистки контролировалось спектрофотометрическим методом с помощью спектрофотометра UNICO. Результаты брали на длине волны 270 нм.

Степень разложения цефтриаксона в ДБР при определении его концентрации по УФ-спектрам водного раствора (рис. 2):



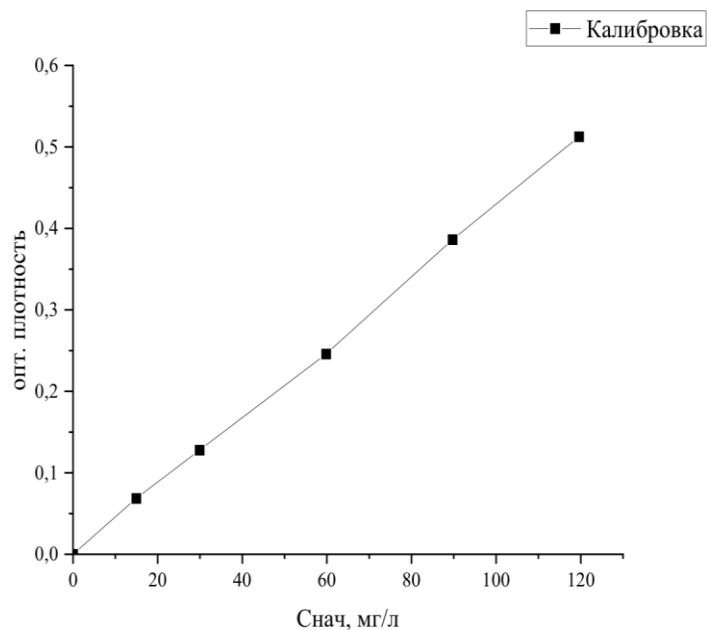


Рис. 2. Степень разложения цефтриаксона в ДБР

По результатам можно сделать вывод, что ДБР хорошо разрушает сложные и устойчивые органические соединения, такие как антибиотики. Кроме того, нами доказано, что увеличение времени контакта раствора с зоной разряда положительно влияет на степень разложения препарата. Так, при увеличении времени контакта от 1,5 секунд до 6,5 секунд степень разложения увеличилась с 76,8% до 97%.

2.3. Биотестирование

Предназначение и область применения:

Данная инструкция определяет порядок оценки острой смертельной токсичности сточных, поверхностных и подземных вод, донных отложений (полученных путем водной экстракции), буровых растворов, а также водных растворов отдельных химических соединений и их композиций.

Принцип метода:

Метод предполагает оценку токсичности воды путем сравнения выживаемости рыб, помещенных в тестируемую и контрольную среду.

В рамках кратковременного биотестирования, проводимого до 96 часов, оценивается острое токсическое воздействие воды на рыб путем наблюдения за их выживаемостью.

Выживаемость в данном случае характеризуется средним числом тест-объектов, которые остались живы в тестируемой воде или в контрольной среде в течение установленного времени. Токсичность определяется гибелью половины или более рыб в тестируемой воде в течение 96 часов по сравнению с контрольной группой.

Хроническое токсическое действие воды на рыб оценивается с помощью длительного биотестирования, продолжающегося до 30 суток. Критерием оценки является выживаемость рыб в течение этого периода. Признаком токсичности воды является заметное уменьшение

продолжительности жизни рыб по сравнению с теми, что находятся в контрольной воде.

В качестве тест- объектов используют рыб, которые часто применяются в международных и национальных стандартах для биотестирования воды, такие как гуппи (*Poecilia reticulata* Peters) или данио (*Brachudanio rerio* HamiltonBuchanan).

В нашей работе в качестве тест-организмов (биотестов) мы использовали *Poecilia Reticu-lata* Peters (пресноводные аквариумные рыбы гуппи).

Гуппи - это один из наиболее часто встречающихся видов рыб, которых содержат в аквариумах. В дикой природе эти тропические обитатели водоемов играют значимую роль в поддержании экологического баланса, активно уничтожая личинок mosкитов и комаров.

Систематическое положение:

Тип: Chordata

Класс: Piscet

Отряд: Cuprinodontiformes

Семейство: Poecilidae

Род: *Poecilia*

Вид: *Poecilia reticulatus* Peters [8].

Фото биотестирования:

Приготовленные пробы объёмом 100 мл наливали в стеклянные стаканчики. В первом находился раствор цефтриаксона (концентрация 0,2 ммоль/л), во втором- раствор цефтриаксона после обработки в ДБР (концентрация 0,2 ммоль/л). В каждый из опытных и контрольных сосудов помещали по 10 экземпляров гуппи, возраст которых составляет пару дней. Продолжительность биотестирования составляла 96 ч. Во время биотестирования рыб не кормили.

Результат и вывод:

Ни одна рыбка не умерла за 4 дня, значит раствор до и после обработки не проявляет токсичности ни в острых, ни в хронических тестах на рыбках гуппи (рис. 3). Важно отметить, что несмотря на отсутствие токсичности исследуемого антибиотика по тесту на рыбках гуппи, особую озабоченность вызывают его возможные метаболиты. Исследованием продуктов деструкции цефтриаксона мы будем заниматься далее.

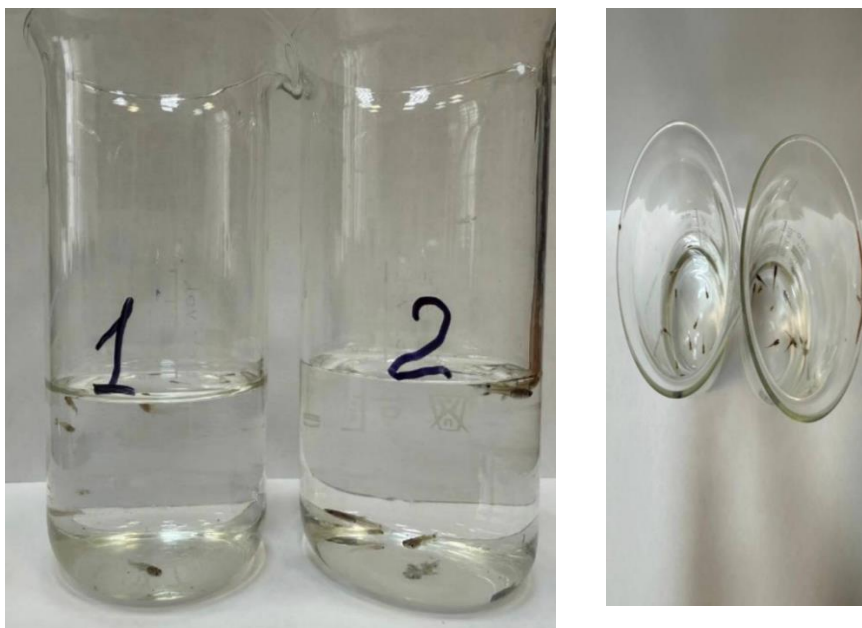


Рис. 3. Оценка токсичности воды с применением тест-организмов рыб группы (*Poecilia Reticulata* Peters)

Все вышеперечисленные эксперименты проводились в Ивановском государственном химико-технологическом университете с 24 июня 2025 года по 5 ноября 2025 года.

Выводы

Проведённое исследование процесса деструкции антибиотика цефтриаксона в водных растворах под действием диэлектрического барьерного разряда (ДБР) подтверждает высокий потенциал плазменных технологий в решении актуальной экологической проблемы очищения сточных вод от антибиотиков. Также он не требует введения химических реагентов, работает при нормальных условиях и способен разрушать устойчивые фармацевтические соединения до менее токсичных или до метаболитов.

Анализ литературных данных и экспериментальных методик показал, что традиционные установки очистки сточных вод малоэффективны в разложении таких сложных органических соединений, как цефтриаксон, который, попадая в водную среду, способствует развитию антибиотикорезистентности и негативно влияет на экосистемы. Методы, основанные на применении низкотемпературной плазмы, в частности ДБР, представляют собой развивающуюся область, поскольку обеспечивают генерирование высокорезакционных частиц в первую очередь гидроксильных радикалов и атомарного кислорода, которые способны разрушать прочные химические связи, включая β -лактамное кольцо, лежащее в основе антибактериальной активности цефалоспоринов. Именно поэтому процесс

деструкции цефтриаксона в реакторе ДБР протекает достаточно эффективно (степень разложения достигает 97%).

Экспериментальная часть проекта, включающая спектрофотометрический анализ, позволила проследить снижение концентрации цефтриаксона в растворе в зависимости от времени обработки. Установлено, что эффективность процесса возрастает с увеличением времени воздействия: при увеличении от 1,5 до 6,5 с увеличивается с 76,8 до 97%.

Биотестирование показало, что раствор до и после обработки не обладает острой и хронической токсичностью. Можно сделать вывод, что цефтриаксон и его метаболиты безопасны. Так как мы не знаем, какие именно продукты деструкции цефтриаксона получились, то будем заниматься их исследованием.

Полученные данные помогают разобраться в понимании механизмов плазмохимической деструкции β -лактамовых антибиотиков и могут быть использованы при создании действенных технологий дезактивации фармацевтических загрязнителей. Также они подтверждают целесообразность дальнейшего изучения и внедрения плазменных технологий в системы очистки сточных вод, особенно в медицинских и фармацевтических учреждениях, где наблюдается высокая концентрация антибиотиков. Данный метод может стать важным элементом комплексных технологий водоочистки, направленных на защиту водных ресурсов и профилактику развития антибиотикорезистентности.

Список литературы

1. Горелова Л.Е. Антибиотики. Враги или друзья? (страницы истории). РМЖ. – 2009. –Т. 15. – С. 1006-1008.
2. Шаронина, Н.В. Ветеринарная фармакология : учебное пособие для студентов факультета ветеринарной медицины и биотехнологии по специальности "Ветеринария" / Н. В. Шаронина. - Ульяновск : УлГАУ. – 2020. – С. 128. - Текст : электронный // Электронная библиотека Ульяновского ГАУ: [сайт]. - URL: <http://lib.ugsha.ru:8080/handle/123456789/24293>.
3. Шаронина Н.В. Организация учебных занятий по дисциплине «Токсикологическая химия» / Н.В.Шаронина/ / Инновационные технологии в высшем образовании. Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава академии. –2016. – С. 137-139.
4. Цефтриаксон (Ceftriaxonum) описание. [сайт] URL: <https://www.rlsnet.ru/active-substance/ceftriakson-286> - Текст: электронный.
5. Цефтриаксон (Ceftriaxone) инструкция по применению. [сайт] URL: https://www.vidal.ru/drugs/ceftriaxone_14795 - Текст: электронный.
6. Тимофеева С. С., Гудилова О. С. Антибиотики в окружающей среде: состояние и проблемы // XXI век. Техносферная безопасность. – 2021.– Т. 6. –№ . 3. – С. 251–265.
7. Научные основы процессов деструкции высокотоксичных соединений в диэлектрическом барьерном разряде. [сайт] URL: https://www.isuct.ru/sites/default/files/department/ighu/dissertacionnye-sovety/files/gushchin_andrey_andreevich-16112021/dissertaciya_gushchin_itog.pdf?ysclid=mer6j56xhv600247481 -Текст: электронный.
8. Рахманин Ю.А., Ческис А.Б. (руководители разработки), Еськов А.П., Кирьянова Л.А., Михайлова Р.И., Плитман С.И., Роговец А.И., Тулакина Н.В., Русанова Н.А., Донерьян Л.Г., Пожаров А.В. Исследование качества воды методом биотестирования. Методические рекомендации по применению методов биотестирования для оценки качества воды в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения. – 1995. – С. 51.