

УДК 544.526.2: 628.316.12

ГУИНА Е. М., магистр гр. МЭ-11, ВЕТРОВА М. А., ассистент
Научный руководитель ИВАНЦОВА Н.А., к.х.н., доцент
(РХТУ им. Д.И. Менделеева)
г. Москва

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ В ПРИСУТСТВИИ НИТРИДА УГЛЕРОДА КАК НАИЛУЧШЕЙ ДОСТУПНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В России остро стоит проблема загрязнения поверхностных и грунтовых вод вследствие антропогенного воздействия. В соответствии с Указом Президента РФ №309 от 07.05.2024, одной из ключевых задач для достижения национальной цели «Экологическое благополучие» является двукратное сокращение объема неочищенных стоков, поступающих в основные водные объекты, к 2036 году [1].

За последние два десятка лет в сточных водах всё чаще обнаруживают самые разнообразные лекарственные препараты (ЛП), что связано с активным развитием фармацевтической индустрии и недостаточной информированностью населения о правилах обращения с медикаментами. Основными источниками загрязнения природных объектов фармацевтическими препаратами выступают медицинские учреждения и фармацевтические предприятия. Также значительную роль играет утилизация лекарственных препаратов населением – через системы коммунальной канализации и с твердыми бытовыми отходами. Трудности с контролем загрязнения воды ЛП связаны как минимум с двумя проблемами: слабым надзором за сточными водами и отсутствием системы сбора просроченных лекарств. Все эти проблемы ведут к тому, что трудноразлагаемые ЛП попадают на очистные сооружения, которые не имеют технологической и технической возможности их обезвредить или перевести в безопасные формы. Более того, значительная часть загрязняющих веществ попадает в окружающую среду напрямую. Непрерывное поступление ЛП в объекты окружающей среды может привести к выработке резистентности у отдельных представителей микробиологических сообществ, что не исключает возникновения новой эпидемии [2-4].

Для обеспечения чистоты водных ресурсов необходимо разработать методики контроля содержания активных фармацевтических субстанций, сформировать правила для их утилизации и ввести расширенную ответственность производителей, которая требует внедрения инновационных методов, обеспечивающих полное разложение ЛП до сброса сточных вод с очистных сооружений в водоемы [5].

В настоящее время развивается концепция применения наилучших доступных технологий (НДТ), которая подразумевает экологичность, ресурсоэффективность и малоотходность. Под данные критерии попадает фотокаталитическое окисление, которое является одним из видов перспективных окислительных про-

цессов. Суть данного метода заключается в интенсификации разложения загрязняющих веществ под действием света при помощи катализаторов. Экологичность заключается в том, что в процессе не используются опасные реагенты, а загрязняющие вещества эффективно разлагаются, не образуя токсичные вторичные загрязнения. Катализатор не расходуется в процессе окисления, его можно регенерировать и использовать повторно, что обеспечивает ресурсосбережение и малоотходность. Выбор фотокатализатора должен соответствовать данной концепции, поэтому в качестве катализатора более широко используется графитоподобный нитрид углерода $g-C_3N_4$, так как он не содержит тяжелые металлы, химически стабилен, имеет узкую запрещенную зону ($\sim 2,4-2,6$ эВ), что снижает энергопотребление и синтезируется из доступных реагентов (например, меламина).

Таким образом, целью данной работы является обоснование применения фотокаталитического окисления с использованием нитрида углерода для деструкции водных растворов нитрофура и тетрациклина.

Первым этапом исследования была оценка эффективности прямого фотолиза и фотокаталитического окисления ЛП на примере тетрациклина и нитрофура с концентрациями 5 мг/л. Окисление проводили в стационарной установке с расположенным внутри источником УФ-излучения – ртутной лампой низкого давления (РЛНД) [6]. Для прямого фотолиза 100 мл водного раствора ЛП помещали в химический стакан и ставили под источник УФ-излучения. Фотокаталитическое окисление проводили подобным образом, но к раствору добавляли 0,1 грамма катализатора нитрида углерода, полученного из меламина по технологии, описанной в [7]. Получившиеся растворы облучали в течение 60 минут. Эффективность окисления оценивали по снижению оптической плотности растворов (рис. 1).

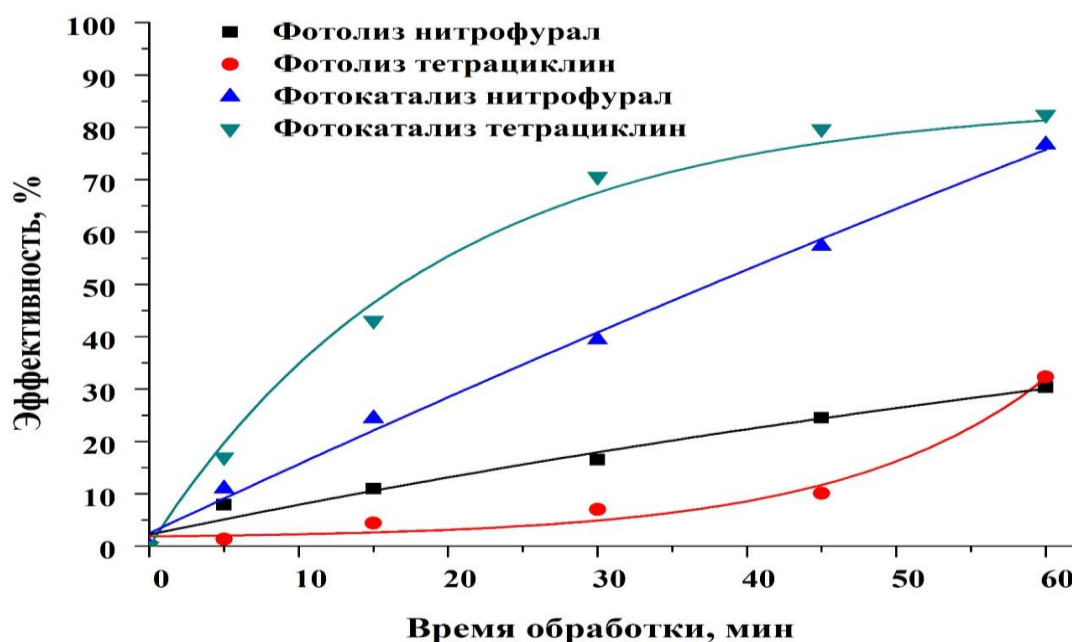


Рисунок 1. Зависимость эффективности фото- фотокаталитического окисления ЛП от времени облучения РЛНД

Из представленного графика (рис. 1) видно, что при прямом фотолизе по истечении 60 минут значения эффективности окисления для нитрофура и тетрациклина достигают сопоставимых значений (30 и 32 % соответственно). Однако для нитрофура наблюдается постепенный рост эффективности на всем участке, тогда как у тетрациклина происходит резкое повышение после 30 минут обработки. В случае фотокаталитического окисления наибольшая эффективность деструкции фиксируется у тетрациклина – 82%; помимо этого, процесс характеризуется резким скачком в первые 30 минут эксперимента. Кривая, описывающая кинетику процесса для фотокаталитического окисления нитрофура, также имеет экстенсивный рост, и сам процесс проходит эффективнее прямого фотолиза – 77%. Полученные данные подтверждают эффективность использования фотокатализа для окисления рассмотренных лекарственных препаратов с помощью катализатора нитрид углерода. Наблюдаемые расхождения в кинетике и степени окисления указывают на особенности молекулярного строения органических молекул ЛП, которые определяют разную реакционную способность.

По экспериментальным исследованиям [7, 8], выполненным на кафедре промышленной экологии, а также по полученным данным (рис. 1), предложена локальная блок-схема очистки ЛП (рис. 2) с использованием одного из блоков фотокаталитического окисления в присутствии нитрида углерода ($g-C_3N_4$). Исходный сток, содержащий ЛП, поступает в резервуар-накопитель для выравнивания концентрации загрязнителей. В УФ-реакторе под действием квантов света и в присутствии катализатора происходит генерация активных радикалов, обеспечивающих деструкцию молекул ЛП. Отработанная суспензия поступает на блок ультрафильтрации, где происходит отделение очищенной воды от катализатора $g-C_3N_4$. Отделенный катализатор в виде концентрата возвращается в смеситель для регенерации и повторного использования, что минимизирует его эксплуатационный расход.



Рисунок 2. Блок-схема внедрения фотокаталитического модуля в существующую систему очистки сточных вод

Для того, чтобы технология была признана «наилучшей доступной», она должна быть не только химически эффективной, но и технологически реализуемой и экономически оправданной. Использование систем

суспензионного типа с последующей мембранной технологией (ультрафильтрацией) позволяет легко масштабировать процесс до промышленных объемов. Циркуляционный контур рекуперации $g-C_3N_4$ минимизирует эксплуатационные затраты на реагенты, что является ключевым требованием к НДТ. Локальное применение фотокаталитического модуля непосредственно на фармацевтическом производстве предотвращает попадание антибиотиков в городские сточные воды и экосистемы.

Список литературы:

1. Сайт президента России: официальный сайт. – Москва. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542> (дата обращения 07.04.2026). – Текст: электронный.
2. Петрухина А. Н., Ларионов Е. А., Ларионова В. М. Лекарственные препараты как потенциальные загрязнители водной среды // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2023. – №12-3 (87). – С. 16-19.
3. Masedo H. E., Lener B., Nisell J. A. et al. Antibiotics in the global riverine system derived from human consumption // PNAS Nexus. – 2025. – Vol. 4, No. 4. – DOI: 10.1093/pnasnexus/pgaf096.
4. Wilkinson J. L., Boxall A. B. A., Marchant R. A. et al. Pharmaceutical pollution of the world's rivers // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2022. – Vol. 119, No. 8. – DOI: 10.1073/pnas.2113947119
5. Пукемо М. М., Кадысева А. А. Влияние противовирусных препаратов в сточных водах медицинских учреждений на эффективность работы канализационных очистных сооружений // Водоснабжение и санитарная техника. – 2026. – №3. – С. 36-44. – DOI: 10.35776/VST.2026.03.05.
6. Шлыкова А.Ю., Дубровина В.Н., Кулебякина А.И., Иванцова Н.А. Кинетика деструкции метиленового синего под воздействием импульсной ксеноновой лампы // Известия ТулГУ. Естественные науки. – 2024. – Вып. 3. – С. 136-145.
7. Ветрова М. А., Иванцова Н. А., Дубровина В. Н., Курбатов А. Ю. Исследование эффективности катализаторов на основе нитрида углерода для очистки воды от компонента биоцида // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2024. – № 6 (321). – С. 49-55
8. Иванцова Н. А., Ветрова М. А. Применение графитоподобного нитрида углерода в фотоокислении лекарственных препаратов // Сборник научных трудов международного научно-технического симпозиума, посвящённого 110-летию со дня рождения Л.А. Костандова (ISTS «EESTE-2025»). – Т.2. – Ч.2. – 2025. – С. 29-33.