

УДК 628.336.3

ФОКША Е.А., студент гр. ТБ-21М (НИУ МИЭТ)
Научный руководитель ПОПОВА Н.В., к.т.н., доцент (НИУ МИЭТ)
г. Москва

**ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИИ ОБРАЩЕНИЯ С ОСАДКАМИ ГОРОДСКИХ
ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ, ЗАГРЯЗНЕННЫМИ
МИКРОПЛАСТИКОМ**

Современные городские очистные сооружения (ОС) способны эффективно удалять микропластик (МП) из сточных вод, особенно при использовании мембранных биореакторов, но концентрируют его в образующемся осадке [1], что вызывает обеспокоенность по поводу вторичного загрязнения окружающей среды при утилизации образующегося осадка. Ежегодно в России по разным оценкам образуется от 1,37 до 3,5 млн тонн осадков сточных вод (ОСВ) в пересчете на сухое вещество [2-3], при этом концентрация МП в них может достигать 3-240 частиц/г сухого вещества [4].

В соответствии с наилучшими доступными технологиями (НДТ), описанными в [5], приоритетной задачей является не просто утилизация, а максимальное ресурсное использование осадков. Однако традиционные методы утилизации ОСВ в РФ – складирование на полигонах и специальных иловых площадках – не только не соответствуют НДТ, но и приводят к вторичному загрязнению окружающей среды микропластиком и выбросам парниковых газов (ПГ): это выбросы метана (CH_4), образующегося при анаэробном разложении органической фракции осадков на полигонах, потенциал глобального потепления которого в 28 превышает аналогичный показатель для диоксида углерода (CO_2) на столетнем горизонте; выбросы CO_2 от работы транспорта при перевозке больших объемов осадков на полигоны; косвенные энергетические выбросы, связанные с затратами электроэнергии на обезвоживание осадков без последующего использования содержащейся в них энергии.

В иерархии НДТ предпочтительным вариантом обращения с ОСВ является использование переработанного осадка в сельском хозяйстве; наиболее перспективными методами подготовки осадков к такому использованию являются компостирование и переработка дигестата, получаемого после анаэробного сбраживания. Но такое применение сопряжено с риском накопления МП в почвах и дальнейшей миграции по трофическим цепям. В связи с этим разработка и анализ безопасных, ресурсо- и энергоэффективных технологий обращения с осадком, загрязненным МП, в рамках концепции НДТ являются актуальной научно-практической задачей. Особое значение приобретают технологии, обеспечивающие: деструкцию или иммобилизацию микропластика; максимальное извлечение и утилизацию содержащихся в осадке ресурсов (органики, питательных элементов, энергии); минимизацию образования вторичных отходов и выбросов парниковых газов.

Для осадков, загрязненных микропластиком, термические способы утилизации с последующей иммобилизацией золы в строительные материалы представляются наиболее оптимальным решением. Причем среди различных методов термической обработки (пиролиза (нагрев до 400-600°C в бескислородной среде), газификации (процесс при 700-900°C в условиях недостатка кислорода), адиабатического (при 850-900°C) и сверхадиабатического сжигания (при температурах 1100-1300°C)) именно сверхадиабатическое сжигание является наиболее предпочтительным, обеспечивает гарантированно полное разрушение микропластика и предотвращает образование токсичных продуктов неполного сгорания, таких как диоксины, за счет поддержания стабильного высокотемпературного режима (1100-1300°C) с рециркуляцией дымовых газов, что соответствует наивысшим критериям экологической безопасности в рамках НДТ.

Для выбора оптимальной технологии обращения с осадком, загрязненным микропластиком, была проведена комплексная оценка жизненного цикла (LCA) в соответствии с требованиями [6]. Все расчеты выполнялись на функциональную единицу: 1 тонну сухого вещества (СВ) исходного осадка. Исследование охватило различные технологические схемы — от традиционных до наилучших доступных и перспективных методов подготовки осадка к сверхадиабатическому сжиганию.

Методы расчета включали:

1. LCA-анализ — оценку воздействия на всех стадиях жизненного цикла;
2. Материальный баланс рассчитывался на основе закона сохранения массы для каждого технологического этапа. Для расчетов приняты следующие исходные данные: производительность — 1000 кг сухого вещества осадка в сутки; влажность исходного осадка — 95-97%; содержание органических веществ — 60-70%; зольность — 30-40%;
3. Энергетический баланс определялся на основе теплоты сгорания компонентов осадка, энергозатрат на технологические процессы, выхода энергии от утилизации продуктов;
4. Расчет углеродного следа проводился по методике [7] с учетом: прямых выбросов CO₂ от сжигания; косвенных выбросов от энергопотребления; предотвращенных выбросов метана (CH₄) при отказе от захоронения осадков; секвестрированного углерода в продуктах; предотвращенных выбросов за счет замещения ископаемого топлива.

По результатам проведенного анализа была выбрана оптимальная технологическая схема: Уплотнение → Термогидролиз → Анаэробное сбраживание → Кондиционирование → Обезвоживание → Сушка → Гранулирование/брикетирование.

Данная схема продемонстрировала наилучшие показатели по следующим критериям:

- материальный баланс показал, что при переработке 1000 кг СВ осадка с исходной влажностью 95-97% после уплотнения объем сокращается на

50-70%. Термогидролиз при параметрах 160-180°C и 6-8 бар обеспечивает увеличение выхода биогаза на последующей стадии на 35-50%. Анаэробное сбраживание позволяет получить 350-450 м³ биогаза с содержанием метана 58-65%. После кондиционирования и обезвоживания влажность осадка снижается до 72-78%, сушка обеспечивает получение продукта с влажностью 10-15%, а заключительное гранулирование/брикетирование позволяет получить товарный продукт в виде топливных гранул или брикетов с насыпной плотностью 600-800 кг/м³ и теплотворной способностью 12-15 МДж/кг, пригодный для транспортировки и использования в качестве альтернативного топлива;

– энергетический баланс выявил положительное сальдо: при энергозатратах 300-455 кВт·ч/т СВ производится 1400-2000 кВт·ч/т СВ электроэнергии и 5000-7000 МДж тепловой энергии;

– углеродный след предложенной технологической схемы отрицательный и составляет -12,1 т CO₂-экв/т СВ, что обусловлено предотвращением выбросов метана при захоронении осадков и замещением ископаемого топлива.

Выбор данной схемы обусловлен ее соответствием принципам цикличной экономики и способностью обеспечивать максимальное извлечение ресурсов при минимальном воздействии на окружающую среду. Особую актуальность этим технологиям придает сложившаяся практическая ситуация в РФ: крупные и средние очистные сооружения, особенно в мегаполисах, столкнулись с критическим исчерпанием ресурса иловых полей. Собственных площадей для размещения осадков не остается, а транспортировка и захоронение на сторонних полигонах становятся экономически нецелесообразными из-за высоких транспортных расходов и часто отсутствия доступных мощностей для приема таких объемов отходов.

Дополнительным экономическим стимулом для перехода на современные технологии утилизации является значительное снижение платы за выбросы парниковых газов. При переходе от захоронения осадков к их термической переработке предотвращаются выбросы метана, что позволяет сократить платежи за выбросы парниковых газов на 60-80%.

Предварительная экономическая оценка показала рациональность дифференцированного подхода к утилизации осадков в зависимости от мощности очистных сооружений:

– для крупных ОС (производительностью свыше 100 000 м³/сутки) экономически целесообразно сжигание на месте с рекуперацией энергии, что позволяет максимизировать энергетическую эффективность и минимизировать транспортные расходы;

– для средних ОС (производительностью 20 000 – 100 000 м³/сутки) оптимальным решением является производство топливных брикетов с последующей транспортировкой на сторонние предприятия (цементные заводы, ТЭЦ), что обеспечивает снижение капитальных затрат и эффективное использование существующей инфраструктуры.

Проведенное исследование обладает комплексной ценностью, охватывающей методологические, прикладные, экономические и экологические аспекты проблемы утилизации осадков сточных вод, загрязненных микропластиком.

Результаты исследования представляют ценность для промышленно развитых регионов с высокой плотностью населения и ограниченными возможностями для захоронения отходов, где проблема утилизации осадков ОС стоит наиболее остро и требует безотлагательных, научно обоснованных решений.

Итак, проведенное исследование демонстрирует принципиальную возможность перехода от экологически опасной практики захоронения осадков сточных вод к их комплексной переработке в рамках концепции наилучших доступных технологий. Научная новизна работы заключается в разработке интегрированной технологической схемы, сочетающей термогидролиз, анаэробное сбраживание и сверхadiaбатическое сжигание, с доказанной эффективностью для решения проблемы утилизации загрязненных микропластиком осадков сточных вод.

Разработанная схема показала высокую результативность по трем ключевым направлениям:

- экологическая безопасность: гарантированное разрушение микропластика при температурах 1100-1300°C и достижение отрицательного углеродного следа (-12,1 т CO₂-экв/т СВ);

- энергетическая эффективность: положительное энергетическое сальдо с производством 1400-2000 кВт·ч/т СВ электроэнергии и 5000-7000 МДж тепловой энергии;

- экономическая целесообразность: исключение платежей за размещение осадков на полигонах, снижение платежей за выбросы парниковых газов на 60-80% и создание новых источников дохода от реализации биогаза и топливных брикетов.

Полученные результаты имеют особую актуальность для регионов с высокой антропогенной нагрузкой, где проблема исчерпания емкостей для захоронения осадков требует безотлагательного решения. Предложенная технологическая схема соответствует принципам циклической экономики и может стать основой для модернизации систем обращения с осадками сточных вод в Российской Федерации.

Список литературы:

1. Фокша, Е. А. Городские очистные сооружения как источник загрязнения водных объектов микропластиком / Е. А. Фокша // Производственные системы будущего: опыт внедрения Lean и экологических решений : Материалы IV международной научно-практической конференции, Кемерово, 16–17 апреля 2025 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2024. – С. 420.1-420.7. – EDN FTTGLS

2. М. В. Быкова, Д. М. Малюхин, Д. О. Нагорнов, А. А. Дука Комплексная утилизация осадков городских сточных вод с получением техногенного почвогрунта // Записки Горного института. 2024. №267. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnaya-utilizatsiya-osadkov-gorodskih-stochnyh-vod-s-polucheniem-tehnogennogo-pochvogrunta> (дата обращения: 09.11.2025).
3. SBS Consulting. Решения по обработке иловых осадков водоканалов [Электронный ресурс] : отчет. — Москва, 2021. — 5 с. — URL: <https://www.sbs-consulting.ru/upload/iblock/86d/86d49cea5142bad28fe15d403f89612b.pdf> (дата обращения: 09.11.2025)
4. FanpLESSStic-sea. Балтийское море без микропластика: проектная история / ГАУ КО «ЕКАТ»; программа «Интеррег. Регион Балтийского моря». — 2021. — 40 с. — URL: <https://ecatk.ru/mezhdunarodnaya-deyatelnost/materialy-proektov/FanpLESSStic/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BD%D0%B0%D1%8F%20%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F%20FanpLESSStic%20%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9.pdf> (дата обращения: 09.11.2025).
5. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов: утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 декабря 2019 г. № 2981. — Москва, 2019. — Дата введения 2020-09-01. — 356 с.
6. ГОСТ Р ИСО 14044-2021 «Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и рекомендации»
7. Об утверждении методических рекомендаций и руководящих указаний по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность: приказ Минприроды России от 27 мая 2022 г. № 371