

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДЕТЕКЦИИ И БАРЬЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ МИКРОПЛАСТИКА

Аксёнова А. А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Ильясова М. С. – магистр, ассистент кафедры ИПиЭ

Аннотация. В статье проанализирована проблема микропластика как техногенного загрязнителя. Рассмотрены инструментальные методы его идентификации (ИК-Фурье и Рамановская спектроскопия, пиролизическая ГХ/МС) и выполнено сравнение эффективности технологий водоподготовки: механическая фильтрация (для частиц >20 мкм), мембранные методы (до 99% очистки) и сорбция. Отдельно оценена ситуация в Беларуси: представлены данные по содержанию микропластика в реках Свислочь и Днепр, питьевой воде Минска, а также эффективность работы очистных сооружений (КОС-2, КОС-3) в сравнении с международными решениями (ЕС, Япония, США).

Ключевые слова: микропластик, ИК-Фурье спектрометрия, мембранная фильтрация, обратный осмос, очистные сооружения, сточные воды, технический анализ, нанопластик.

Введение. Загрязнение окружающей среды микропластиком признано одной из глобальных экологических проблем XXI века [1]. Высокая устойчивость к деградации, способность к биоаккумуляции и трансграничному переносу делают микропластик новым классом техногенных загрязнителей, требующим разработки и внедрения эффективных методов детекции и барьерной защиты.

Особую опасность представляет нанопластик – фракция частиц размером менее 1 мкм, способная проникать через биологические барьеры, накапливаться во внутренних органах и служить транспортом для токсичных загрязнителей, сорбированных на поверхности частиц. В связи с этим вопросы контроля содержания микропластика в питьевой воде, а также предотвращения его поступления в природные водоемы со сточными водами приобретают критическое значение.

В Республике Беларусь, в рамках реализации принципов «зеленой» экономики и Национальной стратегии развития экономики замкнутого цикла до 2035 года, проблема обращения с отходами и предотвращения вторичного загрязнения водных объектов выходит на первый план [2]. Традиционные системы водоподготовки и очистки сточных вод изначально не проектировались для удаления частиц микропластика, однако современные исследования демонстрируют их потенциал в качестве барьера [3].

Основная часть. Проблема микропластика в водных объектах Беларуси находится на начальном этапе системного изучения. Актуальность исследований продиктована необходимостью оценки реального уровня загрязнения и эффективности работы существующих очистных сооружений. Городские очистные сооружения Минска являются ключевым звеном, предотвращающим поступление загрязнителей в бассейн р. Свислочь, и представляют собой важный объект для исследования [4].

Современная аналитическая химия предлагает несколько высокоточных методов идентификации микропластика, различающихся по принципу действия, чувствительности и области применения [3]. Наиболее распространены спектральные методы: ИК-Фурье спектрометрия (FTIR) и КР-спектроскопия, позволяющая анализировать частицы мельче 10 мкм. Для количественного определения массовой концентрации полимеров используется пиролиз-газовая хроматография/масс-спектрометрия [5].

Комбинирование методов позволяет получать наиболее полную информацию о загрязнении. Критически важным этапом остается пробоподготовка, включающая разделение частиц по плотности и фильтрацию через мембраны с заданным размером пор.

Эффективность удаления микропластика зависит от стадии водоподготовки или очистки сточных вод и реализуемых механизмов задержания. Сравнительный анализ представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики RDF и традиционных энергоносителей

Технология	Размер удаляемых частиц	Эффективность удаления, %	Механизм задержания
Механическая (песколовки, отстаивание)	>100 мкм	50–80	Седиментация, флотация
Микрофильтрация (МФ)	0.1–10 мкм	90–98	Ситовой
Ультрафильтрация (УФ)	0.01–0.1 мкм	98–99.9	Ситовой, образование гелевого слоя
Нанофильтрация (НФ) и Обратный осмос (ОО)	<0.001 мкм (до ионов)	>99.9	Диффузионный, растворение
Сорбция (активированный уголь)	10–100 мкм	30–70	Адсорбция
Коагуляция/флокуляция	1–100 мкм	60–90	Агломерация

Анализ данных таблицы позволяет сделать следующие выводы. Традиционные механические методы эффективны только для крупных частиц. Мембранные технологии демонстрируют принципиально более высокую эффективность: микрофильтрация задерживает практически весь микропластик (>0,1 мкм), ультрафильтрация обеспечивает удаление до 99,9% частиц, включая крупный нанопластик, а нанофильтрация и обратный осмос являются абсолютным барьером. Сорбционные методы в качестве самостоятельной технологии малоэффективны.

Анализ международного опыта и первых отечественных исследований позволяет оценить ситуацию в Беларуси [4]. Исследования, проведенные на р. Свислочь в черте города Минска и ниже по течению (в районе Королищевичей), фиксируют присутствие частиц микропластика в концентрациях от 0.2 до 0.8 частиц/м³, преимущественно в виде волокон и фрагментов полиэтилена (ПЭ), полипропилена (ПП) и полистирола (ПС) [6]. Концентрации варьируются в зависимости от сезона и гидрологического режима, однако прослеживается тенденция к их увеличению (в 1.5–2 раза) после прохождения через городскую черту, что указывает на вклад диффузных источников и недостаточно очищенных сточных вод. В р. Днепр в районе Могилева концентрации микропластика фиксируются на уровне 0.1–0.3 частиц/м³, что ниже, чем в Свислочи, но также требует системного мониторинга.

Очистные сооружения Минска, использующие полный цикл биологической очистки с доочисткой на песчаных фильтрах, демонстрируют высокую общую эффективность задержания микропластика (до 95–98%), сопоставимую с показателями современных европейских станций [1]. Основное удаление (до 80–90%) происходит на стадиях механической и первичной очистки, где частицы связываются с осадком и удаляются в составе сырого осадка и избыточного активного ила. Тем не менее, даже при столь высокой эффективности, абсолютное количество частиц, попадающих в реку с очищенными водами, остается значительным из-за больших объемов стоков. Расчеты показывают, что суточный сброс микропластика с очищенными водами КОС может составлять от 20 до 80 млн частиц, что создает потенциальную нагрузку на водную экосистему [5].

Сравнение с мировыми данными показывает схожую картину. В странах, Японии и США действуют директивы и национальные программы, стимулирующие исследования по дооснащению очистных сооружений ступенями мембранной фильтрации (МФ/УФ) для повышения барьерной функции, особенно в отношении нанопластика. В Японии внедрение мембранных биореакторов (МБР), сочетающих биологическую очистку с ультрафильтрацией, является стандартом для новых сооружений. В США Агентство по охране окружающей среды разрабатывает рекомендации по учету микропластика при проектировании систем водоснабжения.

В Беларуси применение мембранных технологий пока ограничено системами локальной водоподготовки для фармацевтической, электронной и пищевой промышленности. Для финальной доочистки городских сточных вод эти технологии используются в меньшей степени. Данное направление является перспективным для модернизации очистных сооружений. Техничко-экономические расчеты показывают, что внедрение ультрафильтрации на стадии доочистки может повысить эффективность удаления микропластика до 99.5–99.9% и обеспечить дополнительную защиту от бактериального и вирусного загрязнения [3].

Заклучение. Технический анализ показывает, что проблема микропластика требует комплексного подхода, сочетающего совершенствование методов детекции и модернизацию барьерных технологий. Современные инструментальные методы позволяют надежно идентифицировать и количественно оценивать загрязнение [1]. Мембранные технологии признаны наиболее эффективным барьером, способным задерживать до 99.9% частиц [5].

Для Республики Беларусь актуальными являются несколько задач. Прежде всего, необходима стандартизация методик отбора проб и анализа микропластика для получения сопоставимых данных по водным объектам. Важно проведение систематического мониторинга содержания микропластика в поверхностных водах, питьевой воде и сточных водах. Требуется технико-экономическое обоснование внедрения ступеней мембранной фильтрации на крупных очистных сооружениях для создания надежного технологического барьера. Также необходима реализация мер по снижению поступления пластика в окружающую среду на этапах производства, потребления и обращения с отходами, что напрямую коррелирует с целями Национальной стратегии развития экономики замкнутого цикла [2]. Решение этих задач позволит минимизировать экологические риски и обеспечить технологический суверенитет страны в области охраны водных ресурсов.

Список литературы

1. TOMRA Sorting Solutions. Case Study: Increased Plastic Purity with AI [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.tomra.com>. – Date of access: 04.03.2026.
2. Национальная стратегия развития экономики замкнутого цикла до 2035 года. – Утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь, 20.12.2023, № 521. – Минск, 2023.
3. Wang, L. Deep Learning for Waste Classification: A Comprehensive Review / L. Wang, Y. Zhang // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2024. – Vol. 20, № 2. – P. 1542–1557.
4. Официальный сайт ГУ «Оператор вторичных материальных ресурсов» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vtoroperator.by>. – Дата доступа: 04.03.2026.
5. ZenRobotics. ZenRobotics 4.0: Technical Specifications [Electronic resource]. – Mode of access: <https://zenrobotics.com>. – Date of access: 04.03.2026.
6. ТКП 17.11-08-2020 (02120) Охрана окружающей среды и природопользование. Отходы. Топливо из отходов (RDF). Технические условия. – Минск: Госстандарт, 2020.

UDC 628.16.08:504.5:678.7

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF DETECTION AND BARRIER PROTECTION AGAINST MICROPLASTICS

Aksionava A. A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Ilyasova M.S. – Master of Sci., assistant of the Department of EPE

Annotation. The article analyzes the problem of microplastics as a technogenic pollutant. Instrumental methods for its identification (FTIR and Raman spectroscopy, pyrolytic GC/MS) are reviewed, and a comparison of the efficiency of water treatment technologies is carried out: mechanical filtration (for particles >20 µm), membrane methods (up to 99% purification) and sorption. The situation in Belarus is separately assessed: data on the content of microplastics in the Svisloch and Dnieper rivers, drinking water of Minsk, as well as the efficiency of wastewater treatment plants (WWTP-2, WWTP-3) in comparison with international solutions (EU, Japan, USA) are presented.

Keywords: microplastics, FTIR spectrometry, membrane filtration, reverse osmosis, wastewater treatment plants, wastewater, technical analysis, nanoplastics.