

DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.74.32.010

УДК 678.742.21

© М. А. Булгаков, А. О. Сухова, А. И. Фролов, 2025

М. А. БУЛГАКОВ

инженер

Служба содействия экологической
безопасности, г. Тамбов

e-mail: maksim.bulgakov.01@bk.ru



А. О. СУХОВА

канд. техн. наук,

доцент кафедры

ТамбГТУ, г. Тамбов

e-mail: apill@yandex.ru



А. И. ФРОЛОВ

студент

ТамбГТУ, г. Тамбов

e-mail: sanfro000@gmail.com



ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ HDPE ПЛАСТИКА НА АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ

Проведена оценка современного состояния проблемы негативного влияния выбросов при переработке HDPE пластика, анализ современных технологий переработки HDPE и их воздействия на атмосферу, выявлены ключевые загрязнители. Проведено теоретическое обоснование необходимости выбора многоступенчатой системы очистки.

Ключевые слова: ПОЛИЭТИЛЕН ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ, ОЦЕНКА ВЫБРОСОВ, ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ HDPE, СИСТЕМА ОЧИСТКИ, МНОГОСТУПЕНЧАТЫЙ ФИЛЬТР.

В национальном проекте «Экологическое благополучие» установлено, что к 2030 году необходимо увеличить переработку отходов, в том числе пластиковых, в два раза. С учетом растущего производства пластика и его негативного воздействия на окружающую среду, особенно на атмосферный воздух, изучение переработки HDPE (полиэтилен высокой плотности) становится крайне важным. Неправильная утилизация пластика ведет к выбросу вредных веществ в атмосферу, что оказывает негативное влияние на здоровье человека и экосистему.

Полиэтилен низкого давления (ПНД) также обозначают — полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) имеет маркировку 02 и международную классификацию HDPE (High Density Polyethylene). Переработка HDPE представляет собой междисциплинарную задачу, объединяющую химические, технологические и экологические аспекты. Этот термопласт, отличающийся линейной молекулярной конфигурацией, сохраняет структурную целостность даже после многократных циклов обработки, что делает его ключевым материалом в стратегиях циклической экономики.

Изучение его физико-химических характеристик и методов регенерации критически важно для минимизации экологического следа пластиковых отходов.

Технологическая цепочка рециклинга включает сбор и классификацию отходов, глубокую очистку от примесей, механическое дробление до заданной фракции, термомеханическую обработку (экструзию) для формирования гранулята.

Несмотря на кажущуюся экологичность, процесс сопряжён с системными проблемами, такими как: энергоёмкость операций (транспортировка, нагрев), эмиссии углекислого газа на этапах логистики, накопление микропластика при промывке.

Исследования [1] выявляют, что энергозатраты на рециклинг HDPE могут достигать или превышать показатели синтеза первичного полимера, что ставит под сомнение углеродную нейтральность метода.

Прорывные решения сосредоточены на преодолении ограничений механических методов:

1. Химический рециклинг — деполимеризация с получением мономеров;
2. Спектральный анализ (NIR) — автоматическая идентификация полимеров;
3. Биотехнологии — использование модифицированных бактерий для деградации HDPE.

Эти подходы позволяют увеличить долю регенерированного сырья до 85–90 % при сокращении энергопотребления на 30–40 % [1].

HDPE-пластик — это безопасный и нетоксичный материал, который имеет ряд преимуществ: может контактировать с пищевыми продуктами и средствами для кожи; обладает небольшой плотностью и легкостью в использовании; стойкий к перепадам температур; не проводит электричество и радиоактивное излучение; способен выдерживать большие нагрузки, превышающие его собственный вес в десятки раз; подстраивается под любую форму; не подлежит гниению и образованию плесени или грибка; может быть повторно переработан, а его отходы поддаются ресайклингу во вторичную гранулу, которые широко

используется при изготовлении новых полимерных изделий. Кроме того, изделия из ПНД пригодны для многократного использования, что в значительной степени выделяет его на фоне многих других материалов. Также важно отметить низкие энергозатраты на производство [1].

По горючести HDPE, также как полипропилен, отнесен, согласно стандарту DIN 4102, к классу B: B1 — трудно возгораемые и B2 — нормально возгораемые. Температура самовоспламенения около 350 °C.

Полиэтилен высокой плотности представляет собой термопластичный полимер, получаемый из нефти, с обобщенной химической формулой $(C_2H_4)_n$. Формула HDPE представляет собой повторяющееся мономерное звено этилена и образует молекулярную цепь полиэтилена. HDPE отличается от других форм полиэтилена тем, что частота разветвления его боковой цепи ниже, чем у других типов полиэтилена, где HDPE обычно называют «линейной» цепью.

HDPE синтезируется из нефтяного сырья, представляя собой макромолекулу с минимальным количеством боковых ответвлений. Производственный цикл варьируется в зависимости от методики, но общая схема включает пиролиз углеводородов, каталитическую полимеризацию, обработку, фильтрацию, вакуумную сушку, формование конечных изделий. При пиролизе углеводородов происходит нагревание нефтяных фракций до 800–1200 °C, что приводит к крекингу длинных цепей с образованием этилена — ключевого мономера для HDPE. Газообразный C_2H_4 далее направляется в реактор полимеризации [1]. В присутствии металлокомплексных катализаторов ($TiCl_4$, $Al(C_2H_5)_2Cl$, CrO_3/SiO_2) этилен подвергается координационно-ионной полимеризации. Процесс протекает в суспензионной среде с формированием гранул полимера. Полученную суспензию последовательно обрабатывают. Производится удаление остаточных катализаторов растворителями, многоступенчатая фильтрация и вакуумная сушка до достижения влажности не более 0,1 %. Высушенный гранулят перерабатывают

методом экструзии или литья под давлением для создания.

При термической обработке материала выделяются:

- углекислый газ (CO_2) (основной продукт окисления);
- угарный газ (CO) (результат неполного сгорания);
- вторичные олигомеры (деструкционные фрагменты полимерных цепей).

Выделяющийся при термической деструкции полиэтилена высокой плотности монооксид углерода — бесцветный, лишённый запаха и вкуса токсичный газ. Его опасность обусловлена способностью блокировать транспорт кислорода в крови, вызывая гипоксию тканей [2]. Соединение CO формируется при неполном окислении углеродсодержащих веществ (топливо, древесина, пластики) в условиях дефицита кислорода. Идеальное горение приводит к образованию CO_2 и H_2O , но в реальных процессах часть углерода окисляется только до CO .

В процессе переработки получают разнообразные полимерные и многокомпонентные материалы, которые могут базироваться как на природных — натуральных или химически модифицированных, так и на синтетических высокомолекулярных органических соединениях. Эти материалы, вместе с металлическими и неметаллическими неорганическими веществами, образуют фундамент современного промышленного производства и широко используются в различных отраслях техники и технологий. Их применяют в микро- и наносистемах, строительстве, медицине, сельском хозяйстве, быту, спорте, а также при производстве упаковочных материалов, одежды, обуви и других изделий общего и специализированного назначения.

Полимерные материалы отличаются большой гибкостью в подборе и регулировке их состава, структуры и физико-химических свойств, а также в способах их производства, переработки и обработки. Среди главных преимуществ данных материалов — невысокая стоимость, относительно простое изготовление, высокая производительность,

малое количество отходов и низкая энергоёмкость производственных процессов. Они обладают низкой плотностью (от 850 до 1800 кг/м^3), высокой устойчивостью к агрессивным воздействиям, включая бензин и масла, а также к атмосферным и радиационным факторам и ударным нагрузкам. Полимерные материалы характеризуются низкой теплопроводностью, отличными оптическими, радио- и электрическими свойствами, а также превосходной адгезией.

Однако, несмотря на многочисленные положительные качества, полимерные материалы имеют ограничения: низкую жесткость, ограниченную тепловую и термостойкость, значительную тепловую деформацию, склонность к ползучести и релаксации напряжений, а также возможность растрескивания под нагрузкой. Многие из них являются горючими и не разлагаются биологически. В то же время использование полимеров способствует снижению энергозатрат до 40 % по сравнению с альтернативными материалами, уменьшению расхода сырья и количества отходов до 70 %, а также сокращению загрязнения водных ресурсов до 90 %.

К основным типам полимерных материалов относятся материалы общего назначения, такие как пластиковые массы (включая пенопласты и армированные пластики), синтетические каучуки, резины и резинотехнические изделия, лакокрасочные материалы и покрытия, полимерные синтетические клеи, компаунды, герметики и полимербетон. Также к этой группе относятся синтетические волокна, пленки, листовые и профилированные материалы, такие как жгуты, нити, ткани, ленты, нетканые материалы, пленки, листы, трубы и профили, а также кожа и бумага.

Полимеры специального назначения включают трибологические материалы, такие как фрикционные и антифрикционные, теплоизоляционные и электроизоляционные материалы, электропроводящие полимеры, интеллектуальные материалы, включая биомиметики, и материалы с активными свойствами, такими как термо-, электро-, магнито-, механо- и оптически активные,

фоточувствительные, абляционные, с эффектом памяти формы и другие [4].

Полимерные материалы классифицируются на два основных типа в зависимости от типа полимерного компонента: термопластичные и термореактивные, которые также известны как отверждающиеся, вулканизирующиеся, сшиваемые или высыхающие.

Современные тренды акцентируют внимание на биополимерах. Индустрия все чаще внедряет термопластичные материалы на основе биополимеров, что обусловлено двумя глобальными вызовами. Первый из них заключается в переходе к возобновляемым ресурсам, в частности в замене нефтехимического сырья растительными эквивалентами. Вторым вызовом — это экологичная утилизация, при которой компостирование становится приоритетом, в отличие от накопления отходов на полигонах.

Среди перспективных биополимеров можно выделить модифицированные полисахариды, такие как целлюлоза и крахмал, белковые композиты и бактериальные полиэферы, включая полигидроксиалканоаты.

Технологический цикл обработки биополимеров включает деструкцию, в ходе которой происходит ферментативный гидролиз биополимеров до мономеров, и ресинтез, в результате которого получают новые материалы, такие как полилактид, производимый из крахмальных мономеров. Подобный подход позволяет закрыть жизненный цикл продукции, уменьшить зависимость от ископаемых ресурсов и сократить углеродный след.

Термореактивные полимерные материалы, в свою очередь, основаны на полимерообразующих композициях. Эти композиции, включая пре- или форполимеры, необратимо превращаются в нерастворимую и неплавкую сетчатую или полициклическую молекулярную структуру. Этот процесс происходит непосредственно в материале или изделии в результате сложных химических и физических превращений во время получения, переработки и обработки материала [4].

Синтез термореактивных полимеров основывается на реакционноспособных

компонентах, среди которых важную роль играют мономеры и олигомеры с ненасыщенными или циклическими группами, а также сложные смеси, активируемые температурой, УФ-излучением или катализаторами.

Процессы отверждения могут происходить через цепную полимеризацию, которая может быть свободнорадикальной или ионной, обеспечивая формирование сетчатых структур без побочных продуктов. Также возможна ступенчатая полимеризация, при которой происходит последовательное наращивание цепи с минимальной усадкой.

Среди основных полимерных систем выделяются ненасыщенные смолы, такие как полиэфирные композиции, эпоксидные олигомеры и жидкие каучуки. Преполимеры ароматических полиимидов, включая полиамидокислоты и их производные, отверждаются через внутримолекулярную циклизацию с выделением воды и спиртов. Традиционные термореактивные материалы, такие как фенол-, мочевино- и меламинаформальдегидные смолы, отверждаются по механизму поликонденсации, что приводит к образованию трёхмерной сетки и сопутствующему выделению низкомолекулярных соединений.

Итоговые продукты обладают высокой термостойкостью, достигающей 400 °С, и применяются в электроизоляционных покрытиях и композитах. В современных термореактивных полимерных материалах также используются различные олигомерные и олигомерполимерные смеси, в том числе на основе термопластичных полимеров. Эти смеси могут образовывать взаимопроникающие сетки в отверждённом состоянии.

Для снижения стоимости, а также для улучшения внешнего вида и эксплуатационных характеристик термопластичных и термореактивных полимерных материалов в процессе подготовки компонентов добавляются растворимые химически инертные или активные модификаторы. Это могут быть пластификаторы, мягчители, смазки, разбавители, загустители, структураобразователи, пигменты, красители, биоциды, антистатик, антипирены, антиоксиданты,

термо- и светостабилизаторы и другие добавки, а также нерастворимые компоненты, такие как дисперсные наполнители [4].

Соединение полимерных материалов между собой и с другими материалами осуществляется преимущественно механическими способами или с помощью склеивания, что требует использования специальных клеев и подготовки поверхностей. Только термопластичные полимерные материалы обладают способностью к сварке и повторному формированию.

Отходы полимеров необходимо перерабатывать и утилизировать с применением таких методов, как пиролиз, гидролиз, гликолиз и других замкнутых процессов, поскольку сжигание полимерных материалов приводит к выделению токсичных веществ [4].

Испытания полимерных материалов на всех этапах их производства, от начального сырья до готовой продукции, играют ключевую роль в обеспечении жизненного цикла изделий. Они существенно отличаются от испытаний альтернативных материалов и варьируются для каждого типа полимеров на различных стадиях их производства, переработки, обработки и эксплуатации.

При переработке HDPE могут выделяться различные летучие органические соединения (ЛОС), запахи, а также мелкие частички, способные негативно влиять на здоровье человека и окружающую среду. Поэтому выбор технологии очистки воздуха является ключевым этапом в организации производственных процессов.

Наибольшую опасность представляют летучие органические соединения (ЛОС). Из этих веществ в воздушный бассейн области ежегодно выбрасываются такие вещества, как толуол, ксилол, пары бензина, бензол, этилбензол, формальдегид, бутилацетат и др. На примере Тамбовской области наблюдается рост ЛОС, оксида углерода, загрязняющих атмосферу (табл. 1) [5].

С учетом вышеуказанных загрязнителей, для очистки воздуха от вредных выбросов в процессе переработки HDPE требуется комплексное оборудование, включающее в себя различные технологии и аппараты [6].

Используются различные типы фильтров, такие как тканевые фильтры, циклонные сепараторы и карманные фильтры. Фильтры удаляют крупные частицы и пыль, снижая нагрузку на последующие этапы очистки и защищая оборудование от загрязнений.

Таблица 1
Выбросы наиболее распространенных загрязняющих атмосферу веществ, отходящих от стационарных источников (тыс. тонн)

	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Всего по области	56,0	72,9	69,0	68,4	61,6	75,7
В том числе: Твердые вещества	3,0	3,6	3,4	4,7	6,1	4,6
Газообразные и жидкие	53,0	69,2	65,6	63,8	55,5	71,1
Из них: Диоксид серы	0,5	0,8	0,9	0,7	0,6	0,5
Оксид углерода	9,1	11,0	10,2	13,4	12,8	21,4
Оксиды азота	3,7	4,3	4,1	4,7	4,3	4,7
Углеводороды (без летучих органических соединений)	32,1	46,9	44,3	38,9	31,2	36,8
Летучие органические соединения	2,6	3,2	3,0	3,6	3,7	3,8

Кроме того, при переработке HDPE применяются адсорбционные колонны. Загрязненный воздух проходит через колонну, где адсорбент захватывает молекулы загрязнителей. Регулярная регенерация адсорбента позволяет продлить его эксплуатационный срок.

В процессе переработки используются платиновые, палладиевые или другие специальные катализаторы, которые обеспечивают эффективное окисление загрязняющих веществ. Поддерживаются определенные условия температуры и давления для повышения эффективности преобразования вредных веществ в безвредные продукты.

Также применяются фотокаталитические установки. Фотокатализ, использующий ультрафиолетовое излучение, активирует катализатор (например, оксид титана), что приводит к разложению ЛОС на простые молекулы, такие как углекислый газ и воду. Эффективность работы при низких концентрациях загрязнителей и способность очищать воздух даже от трудноразлагаемых соединений.

Запахи могут быть трудноудаляемыми органическими веществами или результатом термического разложения. В этой связи используются специализированные дезодорационные установки с комбинацией абсорбционных и фотокаталитических технологий для селективного удаления запахов.

Сравнение технологий очистки воздуха по некоторым критериям приведено в табл. 2.

Переработка HDPE может быть безопасной при использовании современных технологий очистки воздуха. Значительно снизить уровень выбросов на предприятиях, занимающихся переработкой полимеров, позволит

следующая многоступенчатая система очистки воздуха, которая включает:

- 1) циклоны — для удаления крупных частиц,
- 2) рукавный фильтр — основная очистка,
- 3) НЕРА-фильтр — финишная очистка от мелких частиц.

Применение позволяет достичь концентрации всего 0,045 мг/м³, или 0,45 % от ПДК.

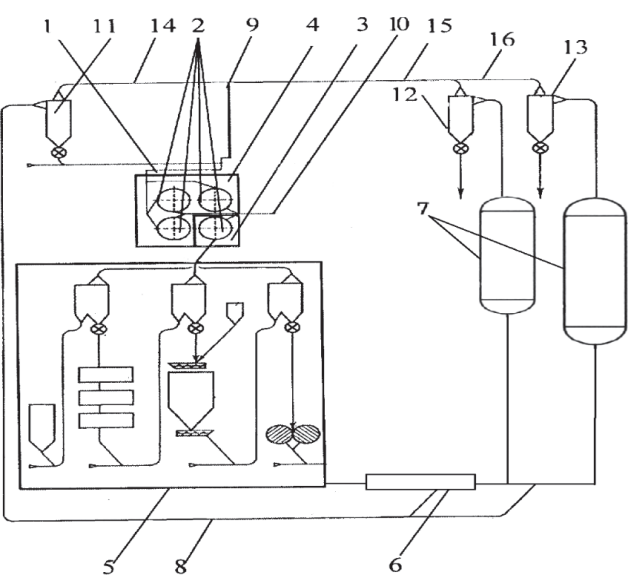


Рис. 1. Предлагаемая схема очистки

Система очистки воздуха состоит из блока очистки воздуха 1, содержащего несколько циклонов 2 и разделенного на два отделения 3 и 4, пылеочистительного отделения 5, рукавным фильтром 6 и НЕРА-фильтрами 7, соединенных продуктопроводами 8, 9 с циклонами разгрузки 11, 12 и 13, имеющими выводные аспирационные каналы 14, 15 и 16. Циклон разгрузки 11 соединен с блоком помола 7. Блок пылеочистительного отделения 5

Таблица 2

Сравнение технологий очистки воздуха [6]

Критерий	Адсорбция	Каталитическое окисление	Фильтрация
1	2	3	4
Эффективность, %	85–90	92–98	95–99
Стоимость оборудования, руб.	500 000	1 200 000	750 000
Эксплуатационные расходы	Высокие	Средние	Низкие
Безопасность	Риск возгорания	Требует катализатора	Безопасна

соединен с отделением 3 циклонов 2, а циклоны разгрузки 11, 12 и 13 соединены с отделением 4 циклонов 2. При этом отделения 3 и 4 циклонов 2 имеют общий выводной аспирационный канал 10.

Система работает следующим образом. Очистка воздуха производится в пылеочистительном отделении 5. Далее мелкие примеси и пыль из отделения 5 попадают в отделение 3 блока очистки воздуха 1, где происходит осаждение крупных частиц, мелкие же частицы вместе с воздухом поступают в общий выводной аспирационный канал 10.

Проходовые фракции блоков помола 6 и 7 отделений продуктопроводами 8, 9 и 10 подаются в циклоны разгрузки 11, 12 и 13. В перечисленных циклонах осаждаются крупные частицы продукта, а мелкие выводятся по аспирационным каналам 14, 15 и 16 и подаются по нему в отделение 4, где также проходят через циклоны. Пыль, которая не осела в этом отделении, подается на выход воздушным потоком по общему выводному аспирационному каналу 10.

Таким образом, в блоке очистки воздуха 1, имеющем отделения 3 и 4 циклонов 2, происходит раздельная очистка воздуха. При этом в каждом из отделений происходит осаждение разного по крупности и по составу материала.

Рукавный фильтр для очистки газов от пыли состоит из прямоугольного корпуса, бункера для сбора пыли, рукавных фильтрующих элементов на каркасе, патрубков для подачи и вывода газов, системы регенерации и крепежного устройства для фильтрующих элементов. Патрубок подачи газа расположен между стенкой корпуса и верхней частью стенки бункера, при этом отношение его ширины к ширине бункера составляет от 0,1 до 0,25.

Запыленный газ поступает через патрубок подачи в корпус фильтра и направляется в ограниченное пространство, где его струя расширяется только в сторону стенки бункера, двигаясь вниз. При соприкосновении струи с бункером скорость газа снижается, и крупные частицы пыли оседают в нижней части

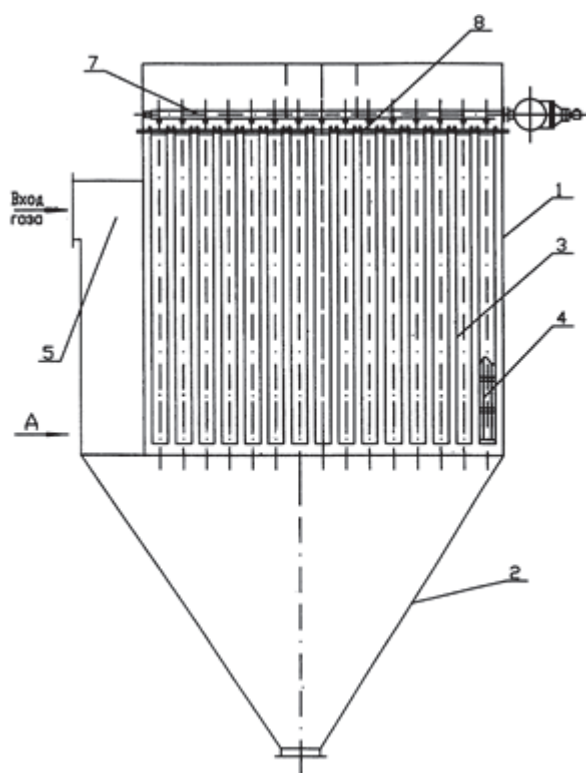


Рис. 2. Общий вид рукавного фильтра для очистки газа:

- 1 — прямоугольный корпус,
- 2 — бункера для сбора уловленной пыли,
- 3 — фильтрующие элементы, 4 — каркас,
- 5 — патрубок ввода газов,
- 6 — патрубок вывода газов,
- 7 — система регенерации,
- 8 — устройство для крепления [7]

бункера. Мелкие частицы, не осевшие, улавливаются на наружной поверхности рукавных фильтрующих элементов. После фильтрации очищенный газ выводится через патрубок вывода.

Когда поры фильтрующих элементов забиваются, их регенерируют с помощью импульсов сжатого воздуха, что позволяет восстанавливать фильтрующую способность.

Фильтр содержит входной патрубок 1 для ввода загрязненного воздуха и выходной патрубок 2 для вывода очищенного воздуха. Между патрубками расположена кассета 3 с фильтрующими элементами. Металлические сетки 4, выполненные из нержавеющей стали, служат для разделения и крепления лобовой части фильтра 5 и замыкающей части 6. Боковая часть фильтра также выполнена из нержавеющей стали.

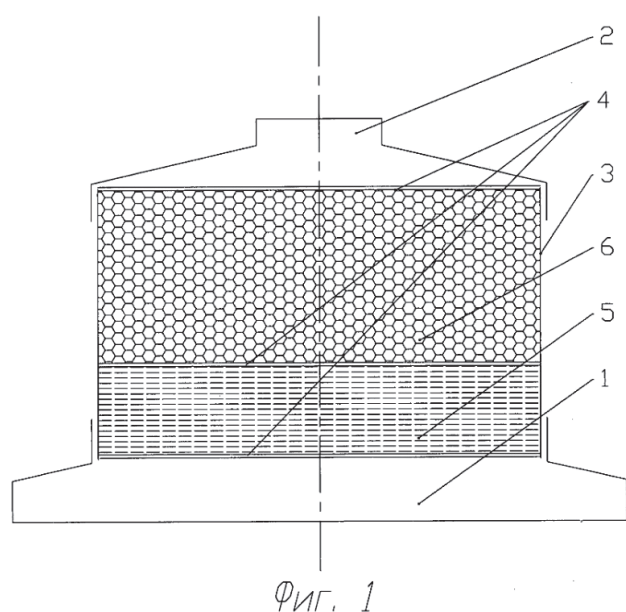


Рис. 3. Общий вид НЕРА-фильтра [8]

Представленная схема позволит существенно сократить уровень выбросов при переработке HDPE пластика, негативно влияющих на здоровье и окружающую среду, тем

самым делая переработку более безопасной и экологически устойчивой.

Переработка HDPE пластика требует строгого контроля технологических процессов для снижения негативного влияния на атмосферу. Эффективные методы фильтрации и очистки выбросов могут существенно уменьшить загрязнение.

По мере усиления глобального загрязнения пластиком важность переработки полиэтилена высокой плотности становится ещё более очевидной, подчёркивая необходимость комплексной политики, технологических инноваций и участия потребителей в развитии эффективных методов переработки.

Совместные усилия представителей отрасли, а также повышение осведомлённости общественности об экономических и экологических преимуществах переработки имеют решающее значение для развития переработки полиэтилена высокой плотности и обеспечения устойчивого будущего.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров, А. Н. Очистка промышленных выбросов: учебное пособие. Москва: Эколайн, 2020. 256 с.
2. Макоско А.А., Матешева А.В. Загрязнение атмосферы и качество жизни населения в XXI веке: угрозы и перспективы. М.: Российская академия наук, 2020. 258 с.
3. ГОСТ Р 56828.32–2017. Лучшие доступные технологии очистки воздуха: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Российский научно-исследовательский центр информации и технического регулирования» Москва: Стандартинформ, 2017. 1 с.
4. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды. Министерство экологии Республики Татарстан. Казань: Изд-во Министерства экологии РТ, 2009. 456 с.
5. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Тамбовской области в 2023 году, Тамбов. 2024 г.
6. Патент №2804427 Российская Федерация, МПК В09В 3/40, F23G 5/027, F23G 7/00. Способ многостадийной термической деструкции: / Мамедов К. Г.; заявл. 28.09.2022; опубл. 21.03.2023. — 68 с.
7. Патент № 2182841 Российская Федерация, МПК В01D 46/02(2006.01), Рукавный фильтр для очистки газов от пыли: № 2001109840 заявл.13.04.2001; опубл. 27.05.2002 / Мошкин А.А. — 12 с.
8. Родионов, А. И., Клушин В. Н., Торочников Н. С. Техника защиты окружающей среды. Москва: Химия, 2013. 67 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.74.32.010

UDC 678.742.21

© M. A. Bulgakov, A. O. Sukhova, A. I. Frolov, 2025

M. A. BULGAKOV

Engineer

Environmental Safety Assistance Service, Tambov

e-mail: maksim.bulgakov.01@bk.ru

A. O. SUKHOVA

Candidate of Engineering Sciences,

Associate Professor of Department

Tambov State Technical University, Tambov

e-mail: apil1@yandex.ru

A. I. FROLOV

Student

Tambov State Technical University, Tambov

e-mail: sanfro000@gmail.com

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF HDPE PLASTIC RECYCLING ON ATMOSPHERIC AIR

The current state of the problem of negative impact of emissions during the processing of HDPE plastic was assessed, the analysis of modern technologies of HDPE recycling and their impact on the atmosphere was carried out, and key pollutants were identified. The theoretical justification of the need to choose a multi-stage purification system was carried out.

Keywords: HIGH-DENSITY POLYETHYLENE, EMISSION ASSESSMENT, HDPE RECYCLING TECHNOLOGIES, PURIFICATION SYSTEM, MULTI-STAGE FILTER.

REFERENCES

1. Petrov A. N. Purification of industrial emissions: a textbook. Moscow: Ecoline, 2020. 256 p. [In Russ.].
2. Makosko A.A., Matesheva A.V. Atmospheric pollution and the quality of life of the population in the 21st century: threats and prospects. Moscow: Russian Academy of Sciences, 2020. 258 p. [In Russ.].
3. GOST R 56828.32–2017. The Best Available Technologies for Air Purification: National Standard of the Russian Federation: Official Edition / Developed by the Federal State Unitary Enterprise Russian Research Center for Information and Technical Regulation. Moscow: Standartinform, 2017. 54 p. [In Russ.].
4. State Report on the State of Natural Resources and Environmental Protection. Ministry of Ecology of the Republic of Tatarstan. Kazan: Publishing House of the Ministry of Ecology of the Republic of Tatarstan, 2009. 456 p. [In Russ.].
5. Report on the State and Protection of the Environment in the Tambov Region in 2023, Tambov. 2024. [In Russ.].
6. Patent No. 2804427, Russian Federation, IPC B09B 3/40, F23G 5/027, F23G 7/00. Method of Multistage Thermal Destruction: / Mamedov K. G.; applied on September 28, 2022; published on March 21, 2023. — 68 p. [In Russ.].
7. Patent No. 2182841, Russian Federation, IPC B01D 46/02(2006.01), Bag Filter for Dust Removal from Gases: No. 2001109840, filed on April 13, 2001; published on May 27, 2002 / Moshkin A.A. – 12 pages. [In Russ.].
8. Rodionov, A. I., Klushin V. N., Torochshnikov N. S. Environmental Protection Techniques. Moscow: Chemistry, 2013. 67 p. [In Russ.].