

Научная статья

УДК 628.4.032;614.849; DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-144-154

**ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ
ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ
ТРАНСПОРТОМ**

✉Абдуллаева Милана Альбертовна;

Королева Людмила Анатольевна;

Ивахнюк Григорий Константинович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉blackwolf1205@mail.ru

Аннотация. Полимеры составляют основную долю пожарной нагрузки в жилых и коммерческих помещениях. Поскольку полимерные материалы плохо разлагаются, утилизация отходов полимеров представляет собой серьезную и долгосрочную экологическую проблему. Являясь перспективным грузом железнодорожного транспорта, полимерная фракция твердых коммунальных отходов требует дальнейшего изучения с целью определения условий транспортировки и принятия решений, направленных на обеспечение пожарной безопасности. При проведении синхронного термического анализа NETZSCH STA 449 F3 Jupiter® (совмещенный термогравиметрия/дифференциально-сканирующая калориметрия) оценена потеря массы при различных температурах образцов полимерных отходов: полиэтилена низкого давления, полиэтилена высокого давления, эластичного пенополиуретана и поливинилхлорида. Полученные результаты позволяют оценить пожарную опасность полимерной фракции твердых коммунальных отходов. Их целесообразно использовать для определения условий перевозки и обоснования требований пожарной безопасности при транспортировании полимерных отходов железнодорожным транспортом.

Ключевые слова: полимеры, железнодорожный транспорт, транспортирование отходов, пожарная безопасность, твердые коммунальные отходы, синхронный термический анализ

Для цитирования: Абдуллаева М.А., Королева Л.А., Ивахнюк Г.К. Оценка пожарной опасности полимерных отходов при транспортировании железнодорожным транспортом // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 4 (72). С. 144–154. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-144-154.

Scientific article

**ASSESSMENT OF FIRE HAZARD OF POLYMER WASTE DURING
TRANSPORTATION BY RAILWAY TRANSPORT**

✉Abdullaeva Milana A.;

Koroleva Ludmila A.;

Ivakhnyuk Grigoriy K.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉blackwolf1205@mail.ru

Abstract. Plastics account for the majority of the fire load in residential and commercial buildings. As polymeric materials are poorly degradable, polymer waste disposal represents a serious and long-term environmental problem. As a promising rail freight, the polymer fraction of municipal solid waste requires further study to determine transport conditions and fire safety solutions. The NETZSCH STA 449 F3 Jupiter® synchronous thermal analysis (combined

thermogravimetry/differential scanning calorimetry) evaluated the mass loss at different temperatures of polymer waste samples: low-pressure polyethylene, high-pressure polyethylene, elastic polyurethane foam and polyvinyl chloride. The obtained results allow estimating the fire hazard of the polymeric fraction of municipal solid waste. It is reasonable to use them to determine the conditions of transport and justify the fire safety requirements for transporting polymeric waste by railway transport.

Keywords: polymers, railway transport, waste transportation, fire safety, solid municipal waste, synchronous thermal analysis

For citation: Abdullaeva M.A., Koroleva L.A., Ivakhnyuk G.K. Assessment of fire hazard of polymer waste during transportation by railway transport // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2024. № 4 (72). P. 144–154. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-144-154.

Введение

Количество твердых коммунальных отходов (ТКО), образующихся на территории Российской Федерации, значительно увеличилось за последние десятилетия, и темпы генерации продолжают расти. На сегодняшний день объем образования ТКО в Российской Федерации составляет более 60 млн т в год [1]. Значительной частью общего объема ТКО являются полимерные отходы. Уже более 50 лет полимеры играют ключевую роль в различных отраслях: строительстве, здравоохранении, электронике и др. Низкая стоимость, универсальность и доступность таких полимеров, как полиэтилентерефталат (ПЭТ), полистирол (ПС), полипропилен (ПП), полиэтилен (ПЭ), поливинилхлорид (ПВХ) и пенополиуретан (ППУ), обусловили их широкое применение (рис. 1).

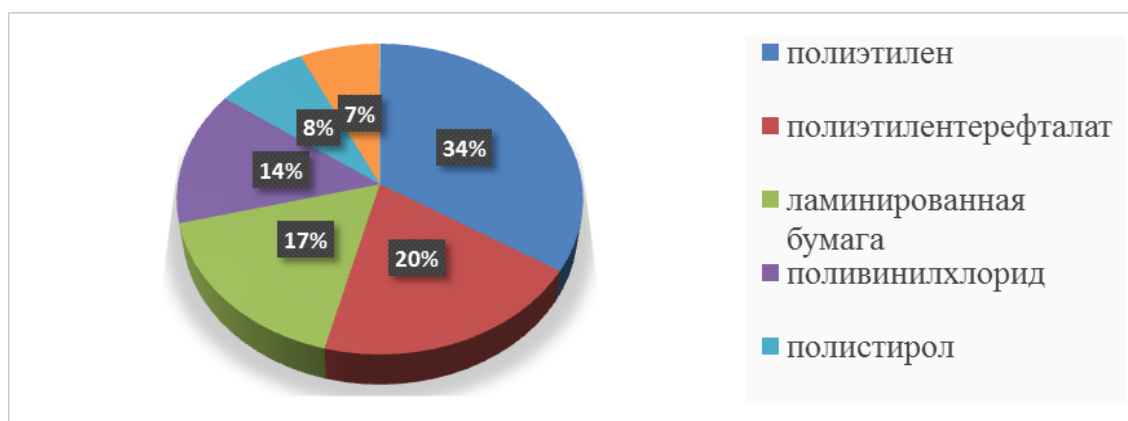


Рис. 1. Структура полимерных отходов в России

Загрязнение окружающей среды полимерными отходами стало проблемой глобального масштаба. Примерно 40 % изделий из пластика имеют срок службы менее одного месяца. И, конечно, большая часть пластиковых отходов, образующихся в настоящее время, не собирается, не сортируется и не утилизируется должным образом, способствуя все большему накоплению полимерных отходов на полигонах.

По данным Министерства промышленности и торговли России, из перерабатываемых полимерных отходов получается: 33 % ПП, 28 % ПВХ, 20 % ПЭ и 19 % ПС [2]. Среди имеющихся видов наибольшая доля перерабатываемых полимерных отходов приходится на ПП и ПВХ – 61 %.

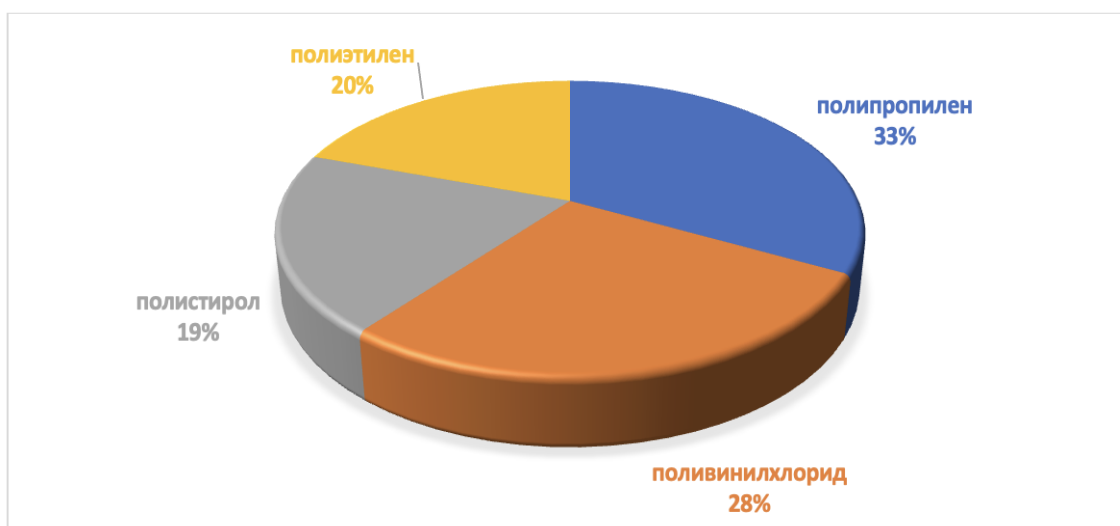


Рис. 2. Перерабатываемые полимерные отходы в России

В данный момент приобретает популярность тенденция вторичной переработки отходов из полимера для повторного использования, но не имеется возможности переработать весь объем, так как недостаточно инфраструктуры и логистических решений [3, 4]. В связи с этим необходимо строительство мусороперерабатывающих заводов и транспортирование на них отсортированных отходов. Использование железнодорожного транспорта для перевозки ТКО имеет ряд существенных преимуществ [3]. Такое решение позволит увеличить количество перерабатываемых отходов и снизить пожарную нагрузку на местах накопления и захоронения ТКО [5]. Полимерные отходы имеют длительный срок разложения, и их выделение из общего потока мусора минимизирует риск загрязнения окружающей среды. Кроме того, раздельная перевозка снижает затраты на обработку и утилизацию отходов.

Оценка пожарной опасности при транспортировке полимерной фракции ТКО железнодорожным транспортом требует комплексного подхода. Прежде всего необходимо учитывать физические и химические свойства отходов, токсичность, возможность образования горючих газов при нагревании, значительное выделение тепла при горении. Следует учитывать, что в процессе эксплуатации и хранения полимеры подвергаются старению, в результате которого происходит изменение их свойств, что должно быть учтено при организации процессов перевозки отходов. Являясь перспективным грузом железнодорожного транспорта, полимерная фракция ТКО требует дальнейшего изучения с целью определения условий транспортировки и принятия решений, направленных на обеспечение пожарной безопасности.

Учитывая недостаточную изученность процессов воспламенения и горения отходов, оценка пожарной опасности полимерной фракции ТКО при их транспортировании является актуальной. Большое количество единиц подвижного состава, наличие значительных объемов опасных грузов, проблемы, связанные с противопожарным водоснабжением, сложность проведения боевых действий по тушению пожаров и т.д. требует осуществления обоснованных мер обеспечения пожарной безопасности на железнодорожном транспорте.

Цель работы заключается в проведении оценки пожарной опасности полимерной фракции ТКО как грузов железнодорожного транспорта.

Методы исследования

Принимая во внимание, что наибольшей теплотой сгорания обладает фракция полимерных отходов [5] и учитывая широкие возможности их вторичной переработки и необходимость транспортировки на перерабатывающие заводы, в качестве объекта

исследования было выбрано четыре образца полимеров, а именно: полиэтилен низкого давления (ПНД), полиэтилен высокого давления (ПВД), эластичный пенополиуретан (ЭППУ), ПВХ. При помощи метода синхронного термического анализа (СТА) была определена потеря массы полимеров при различных температурах, представлена характеристика процессов, при которых происходят термоокислительные реакции.

СТА позволяет одновременно фиксировать изменения массы и образца при контролируемом изменении температуры. Это определяет возможности более полного понимания процессов термического разложения и фазовых переходов, происходящих при нагревании полимерных отходов. Синхронный анализ минимизирует временную задержку между измерениями и улучшает достоверность результатов, сокращая время анализа и уменьшая необходимый объем образца.

Калориметрический метод [6], несмотря на популярность и широкую применимость, обладает значительными недостатками. Во-первых, точность измерений может снижаться из-за тепловых потерь в окружающую среду, особенно в открытых системах, что приводит к значительным ошибкам в расчетах. Во-вторых, для проведения экспериментов требуется специализированное оборудование, что может быть дорогим и сложным в использовании, особенно для лабораторий с ограниченными ресурсами.

Кроме того, калориметрический метод часто требует значительных временных затрат на подготовку образцов и выполнение измерений, что может быть неэффективным при необходимости быстрого получения результатов. Также существует влияние таких факторов, как изменения давления и концентрации веществ, что осложняет интерпретацию данных. В случае сложных химических реакций сложно точно определить вклад каждого компонента в общее изменение энтальпии, что может исказить результаты анализа.

Исследование проводилось на приборе СТА NETZSCH STA 449 F3 Jupiter® (рис. 3). (https://lab-test.su/index.php?dispatch=product_features.view&variant_id=68), который позволяет отслеживать изменение свойств образцов в результате воздействия температур в диапазоне от 25 °С до 1 500 °С, например, определять такие параметры, как изменение массы и количественные показатели тепловых эффектов. Универсальность прибора обеспечивается широким выбором сенсоров, тиглей и диапазоном для термогравиметрических (ТГ) измерений, что позволяет анализировать разные материалы различной природы. Легко взаимозаменяемые держатели образца позволяют оптимально адаптировать систему для различных областей измерительных задач (ТГ и дифференциальный термический анализ (ДТА), ТГ и дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК)).

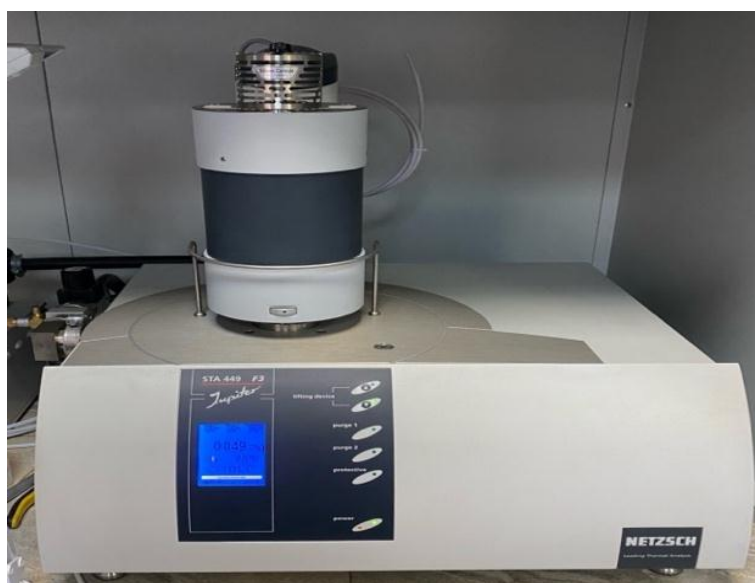


Рис. 3. Прибор СТА NETZSCH STA 449 F3 Jupiter®

Вакуумная конструкция прибора позволяет проводить измерения при различных атмосферных условиях. Управление системой осуществляется с помощью нового цифрового устройства, а анализ данных выполняется на персональном компьютере.

Результаты исследования и их обсуждение

Первый образец – ПНД обладает кристаллической структурой и отличается легкостью, упругостью и термопластичностью. Он устойчив к воздействию воды, не реагирует со щелочами и солями различных типов, органическими и неорганическими кислотами, включая даже концентрированную серную кислоту. ПНД применяется для создания различных изделий, таких как бутылки, упаковочные материалы, бочки, баки, бидоны, крышки от пластиковых бутылок, а также емкости для разнообразных жидкостей. Отходы из этого материала могут быть переработаны вторично, что позволяет использовать их для производства новых полимерных изделий. Также стоит отметить, что изделия из ПНД можно использовать многократно, что делает его более привлекательным по сравнению с другими материалами.

ПЭ, из которого изготавливается ПНД, состоит из углерода и водорода, при его горении выделяется углекислый газ, монооксид углерода (угарный газ), вода и незначительное количество сажи. Состав и концентрация продуктов горения полимеров зависит от условий протекания горения.

Изготовление ПНД осуществляется при температуре от 100 до 150 °С. Сырьем для производства является чистый этилен, при этом необходимо использовать катализаторы. Применение ПНД очень широко – от промышленных предприятий до мелкого производства. Благодаря физико-химическим свойствам данный вид имеет широкую область применения [7]. ПЭ удобно использовать для хранения различных жидкостей и упаковки товаров из-за своей универсальности и доступности. Низкая стоимость производства ПЭ делает его популярным материалом на рынке.

Анализ термограммы ТГ показал, что при нагревании образца ПНД происходит потеря массы в диапазонах температур 320–400 °С и 440–500 °С (рис. 4). Первый этап начинается при 320 °С и завершается при 390 °С, потеря массы составляет 66,7 %. Максимальная скорость потери массы при температуре 367 °С достигает 29,0 %/мин и обусловлена термоокислительной деструкцией полиэтилена.

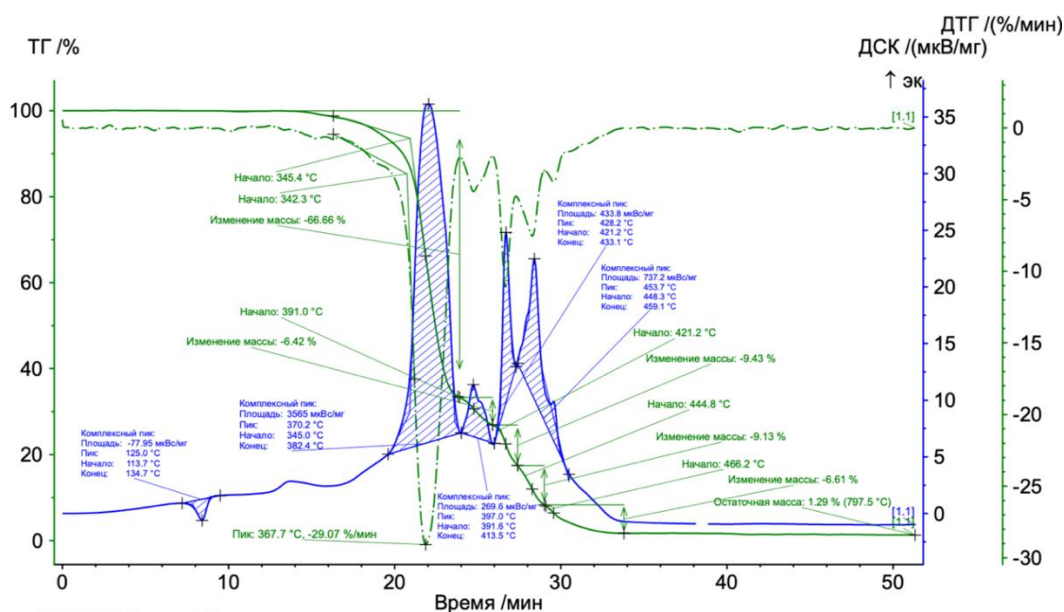


Рис. 4. Термограммы ТГ и ДТГ ПНД

Второй этап процесса разложения связан с выгоранием наполнителей и других функциональных добавок, способствующих, например, быстрому разложению ПЭ, он полностью завершается при 500 °С. Поскольку при полном выгорании материала зольный остаток составляет всего 1,29 %, можно сказать, что наполнители представляют собой органические вещества.

Второй образец – ПВД. Метод получения ПВД включает в себя обработку при температуре не выше 180 °С, использование кислорода в качестве катализатора и давлении до 300 атм. Температура плавления ПЭ низкой плотности – 100–120 °С, при достижении граничных значений материал становится хрупким [8]. Вещество почти не поглощает влагу (коэффициент влагопоглощения – 0,02 % за месяц). Плотность ПВД составляет 0,925 г/см³, а температура стеклования – минус 25 °С. При горении ПВД наблюдается голубоватый оттенок пламени, слабое излучение света. Материал устойчив к щелочам и кислотам, не растворяется в воде, подвержен термостарению.

В диапазоне температур 250–400 °С происходит потеря массы образца ПВД (рис. 5). При этом наблюдается потеря массы 93,6 % при 266 °С и завершается процесс при 370 °С. Максимальная скорость потери массы при температуре 364 °С достигает 32,4 %/мин и связана с термоокислительной деструкцией ПЭ.

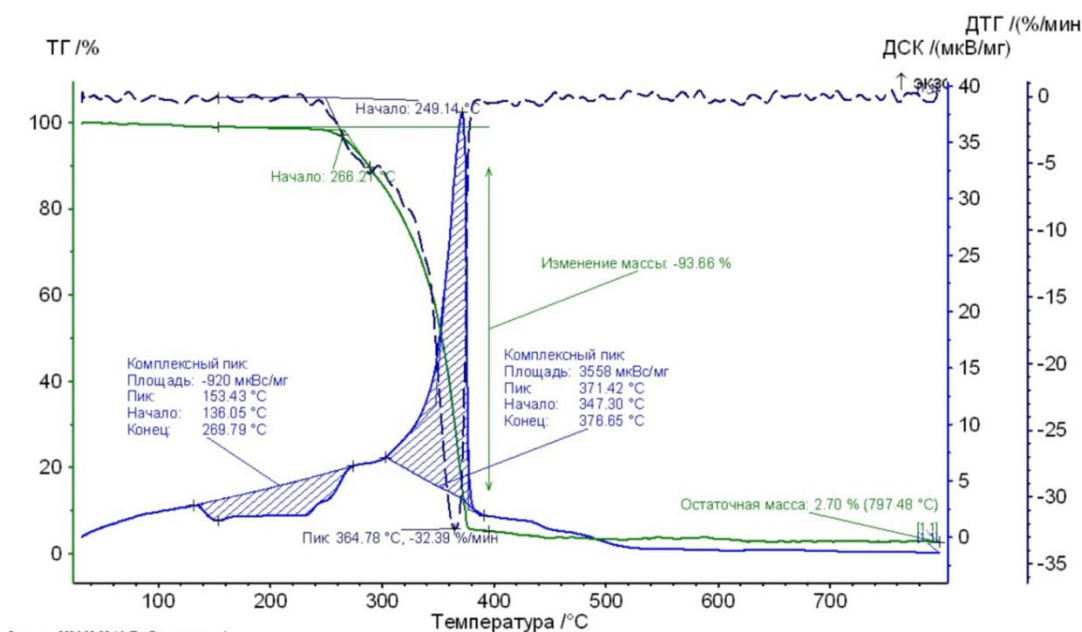


Рис. 5. Термограммы ТГ и ДТГ ПВД

Поскольку при полном выгорании материала зольный остаток составляет 2,7 %, можно сказать, что наполнители представляют собой органические вещества.

Третий образец – ЭППУ, относится к реактопластам [9]. Материал известен большинству людей как поролон. Его отличие от жестких видов ППУ заключается в открыто-пористой структуре материала. ЭППУ имеет высокую упругость, эластичность и открыто-ячеистую структуру. Его главным отличием является способность быстро восстанавливать форму после внешней нагрузки (сжатия). ЭППУ используется в производстве матрасов, мягкой мебели, автомобильных сидений и в других сферах, где требуется долговечный, упругий и безопасный материал. Он обладает высокой прочностью, что позволяет использовать его в качестве обивки мебели.

Исходным сырьем для изготовления эластичных ППУ являются полиолы (многоатомные спирты), толуилизоцианат и катализаторы (добавки для ускорения процесса пенообразования). Наполнители придают ЭППУ негорючесть и увеличивают эластичность материала. Также для придания оттенка дополнительно вводят пигменты.

При смешивании компонентов происходит химическая реакция, в результате которой материал пенится и увеличивается в размерах. После застывания образуется материал с хорошими показателями звукопоглощения и теплопроводимости.

На термограмме (рис. 6) наблюдается потеря массы образца ЭППУ 80 % в диапазоне температур 250–550 °С. Максимальная скорость потери массы при температуре 412 °С достигает 11,85 %/мин и связана с термоокислительной деструкцией ППУ.

Первый этап потери массы образца при 282 °С достигает скорости разложения 3,25 %/мин и незначительная потеря массы связана с деполимеризацией готового продукта в результате воздействия температур.

Данный процесс начинается при 260 °С и завершается при 300 °С, потеря массы при этом составляет 35 %. На втором этапе потеря массы образца при 412 °С достигает скорости разложения 11,85 %/мин и связана с отщеплением NO групп (азотистые соединения). Данный процесс начинается при 360 °С и завершается при 420 °С, потеря массы при этом составляет 90 %.

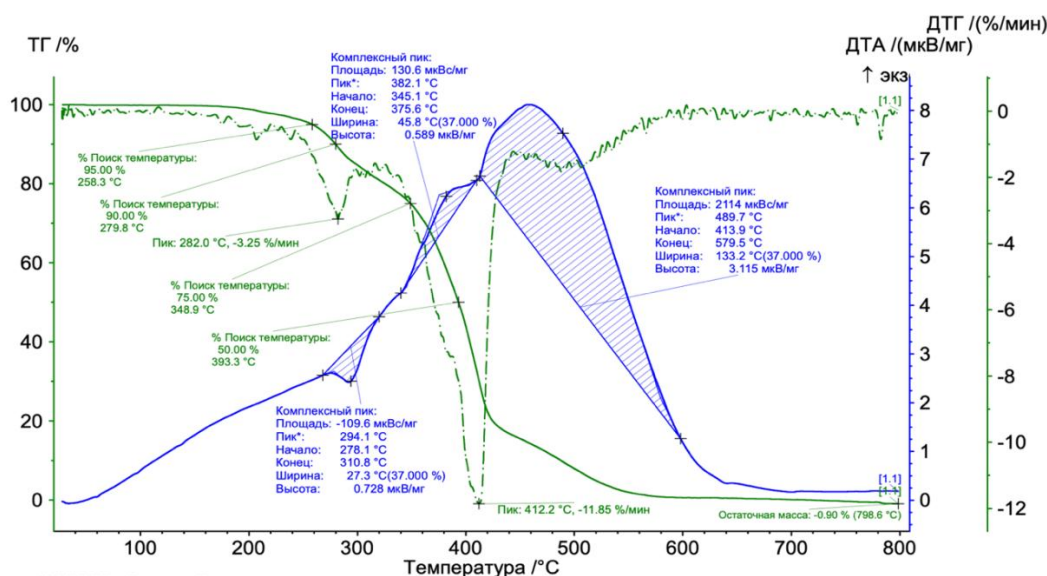


Рис. 6. Термограммы ТГ и ДТГ ППУ

Третий этап разложения связан с выгоранием наполнителей и других функциональных добавок, он полностью завершается при 400 °С. Поскольку при полном выгорании материала зольный остаток составляет 2,70 %.

Четвертый образец – ПВХ, термопластичный материал, получаемый полимеризацией винилхлорида, хлорзамещенного этилена. ПВХ широко используется в различных сферах, существует более 3 000 видов материалов и изделий, производимых из него. ПВХ обладает хорошей устойчивостью к воздействию промышленных газов (хлор и диоксид азота), влаги, щелочи, кислот и растворов солей. Более того, ПВХ имеет устойчивость к воздействию керосина, бензина, спиртов и жиров, но ограниченно растворим в ацетоне и бензоле. ПВХ растворяется в дихлорэтане и нитробензоле.

Для улучшения обрабатываемости ПВХ обычно смешивают с пластификаторами, доля которых может достигать 30 % от общей массы изделия [10]. Это позволяет получать продукты с различными параметрами жесткости.

Анализ термограммы ТГ показал, что при нагревании образца эластичного ПВХ в диапазоне температур 317–510 °С происходит термоокислительная деструкция.

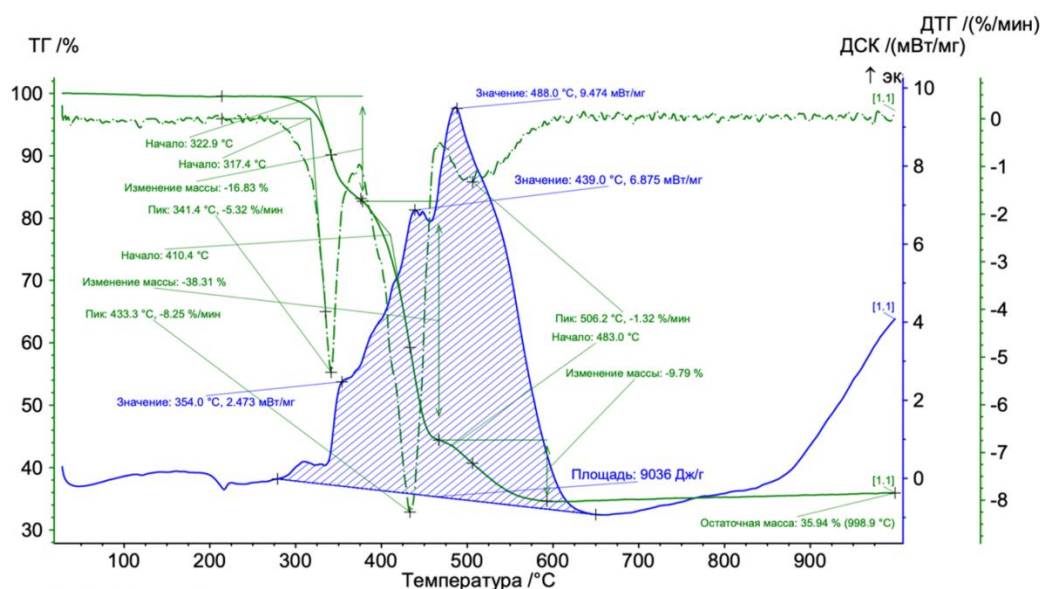


Рис. 7. Термограммы ТГ и ДТГ ПВХ

Первый этап потери массы образца при 341 °С достигает скорости разложения 5,32 %/мин и связан с термоокислительной деструкцией ПВХ (отщепление хлора). Данный процесс начинается при 322 °С и завершается при 350 °С. Второй и самый значительный этап потери массы образца при 433 °С достигает скорости разложения 8,25 %/мин и связан с термоокислительной деструкцией продуктов термоокислительной реакции ПВХ. Данный процесс начинается при 410 °С и завершается при 490 °С, потеря массы при этом составляет 62 %. Третий этап разложения связан с выгоранием наполнителей (пластификаторов) и других функциональных добавок, он полностью завершается при 400 °С. Поскольку при полном выгорании материала зольный остаток составляет 35,94 %.

На рис. 8 представлены значения температуры в зависимости от потери массы образцов (5 %; 10 %; 25 %; 50 %). Как видно по гистограмме, наибольшая температура разложения составляет для образца ПВХ, при этом выделяет хлористый водород, являющийся токсичным для человека газом.

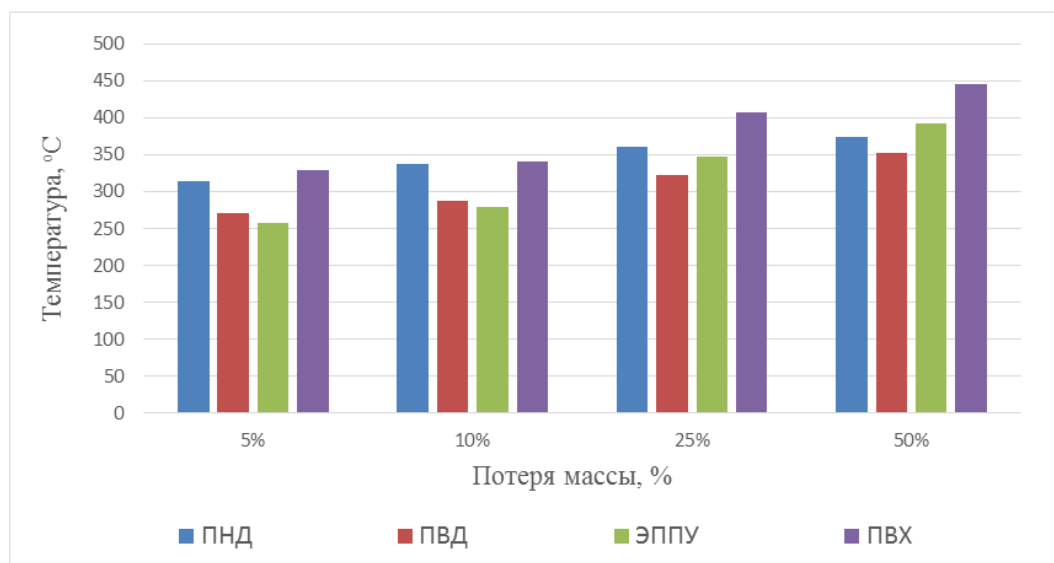


Рис. 8. Температуры при определенных значениях потери массы образцов полимеров

Исследование выбранных полимерных образцов показало, что для ЭППУ требуются наиболее жесткие требования с точки зрения обеспечения пожарной безопасности при их транспортировке, так как он имеет наименьшую температуру термоокислительной деструкции (258 °С), его разложение сопровождается выделением вредных азотсодержащих веществ, например, цианидов.

Пожарная опасность полимерных отходов при их транспортировке железнодорожным транспортом определяется:

- значительным выделением тепла в процессе их разложения и горения, что может вызвать распространение пожара, например, воспламенение грузов в соседних вагонах;
- возможностью протекания экзотермических реакций при воздействии солнечного света, взаимодействии с кислородом воздуха и влагой;
- выделением токсичных продуктов разложения и горения;
- плавлением термопластичных полимеров при повышении температуры, что может привести к возникновению вторичных очагов горения и травмированию людей;
- высокой задымленностью, приводящей к снижению видимости и адсорбции токсичных газов на твердых частицах с большой удельной поверхностью;
- снижением концентрации кислорода;
- сложностью тушения пожаров, определяющейся, в том числе, особенностями подвижного состава железнодорожного транспорта и организации движения.

Важным аспектом является соблюдение норм и стандартов, регулирующих перевозку опасных грузов, включая наличие соответствующей упаковки ТКО. Следует проводить регулярные технические осмотры вагонов и контейнеров, чтобы минимизировать риск возгорания, а также обеспечить наличие автоматизированных систем пожарной сигнализации. При формировании железнодорожных составов необходимо учитывать, что при горении полимеров выделяется значительное количество тепла, что может стать причиной быстрого развития пожара с распространением горения на другие вагоны, поезда и прилегающую территорию.

Наконец, необходимо учитывать влияние внешних факторов, таких как погодные условия и состояние перегонов, чтобы своевременно реагировать на потенциальные угрозы. Эффективная оценка пожарной опасности требует междисциплинарного подхода и постоянной актуализации знаний.

Раздельный сбор и транспортировка позволят снизить пожарную опасность ТКО, исключив, например, легковоспламеняющиеся вещества и материалы, горение которых может стать источником нагрева полимеров.

Учитывая, что на этапе сбора полимерных отходов возможности сортировки по типу полимера ограничены, существует значительная вероятность перевозки полимерной фракции ТКО без ее разделения. Дальнейшие исследования предполагается направить на изучение композиций полимерных отходов и других фракций ТКО (пищевых отходов, бумаги и картона, текстиля, резины и т.д.).

Заключение

Раздельный сбор мусора и транспортирование полимерных отходов железнодорожным транспортом играет важную роль в обеспечении их эффективной переработки, является приоритетным инструментом в сфере обращения с отходами, способствует развитию экологически чистых технологий. Раздельный сбор при транспортировке ТКО позволяют снизить пожарную опасность отходов, однако требуют разработки мер обеспечения пожарной безопасности.

При горении полимеров выделяется значительное количество тепла, что способствует развитию пожара, и токсичных продуктов, таких как угарный газ, азотсодержащие вещества (цианиды, оксиды азота), негативно влияющих на окружающую среду и здоровье населения.

Следует учитывать изменение свойств полимеров при их старении в процессе эксплуатации и хранения.

В результате проведенных исследований были определены параметры, при которых происходят термоокислительные реакции полимерных материалов, входящих в состав ТКО. Установлено, что полная термодеструкция полимеров проходит при температурах 300–800 °С.

Полученные результаты позволяют прогнозировать пожарную опасность полимерной фракции ТКО. Их целесообразно использовать для определения условий перевозки и обоснования требований пожарной безопасности при транспортировании полимерных отходов железнодорожным транспортом.

При проведении дальнейших исследований представленный способ будет применен при оценке пожарной опасности транспортирования железнодорожным транспортом композиций полимерных отходов и других фракций ТКО (пищевых отходов, бумаги и картона, текстиля, резины и т.д.).

Список источников

1. Шилкина С.В. Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». 2020. № 1. DOI: 10.15862/05ECOR120.
2. Информационные системы, реестры, базы и банки данных, сборники // Официальный сайт Минпромторг России. URL: <http://government.ru/departments/54/events/> (дата обращения: 10.05.2024).
3. Абдуллаева М.А., Королева Л.А. Перспектива развития транспортирования твердых коммунальных отходов железнодорожным транспортом // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2023: материалы Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: ИПТ РАН, 2023. Т. 2. С. 171–175.
4. Козлов Г.В., Ивахнюк Г.К. Морфологический состав твердых коммунальных отходов по регионам мира в XX и начале XXI века (обзор) // Известия СПбГТИ (ТУ). 2014. № 24 (50). С. 58–66.
5. Хайдаров А.Г., Королева Л.А., Ивахнюк Г.К. Эксергетическая оценка пожарной опасности перевозок на железнодорожном транспорте // Пожаровзрывобезопасность. 2018. Т. 27. № 10. С. 26–37.
6. Коптелов А.А., Милехин Ю.М., Шленский О.Ф. Тепловые эффекты термического разложения полимеров // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. № 9. 2005. С. 1628–1634.
7. Гордиенко В.П., Ковалева Г.Н. Механохимическое влияние на структуру и износостойкость термопластичных систем: полиэтилен – карбиды // Пластические массы. 2017. № 1–2. С. 40–43.
8. Асеева Р.М., Заиков Г.Е. Горение полимерных материалов. М.: Наука, 1981. 280 с.
9. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. СПб.: Научные основы и технологии, 2011. 416 с.
10. Беров К.К., Бельшина Ю.Н., Дементьев Ф.А. Экспериментальные исследования коксового остатка поливинилхлоридных полимерных материалов методом элементного анализа CHNS // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2014. № 1. С. 33–37.

References

1. Shilkina S.V. Mirovye tendencii upravleniya othodami i analiz situacii v Rossii // Internet-zhurnal «Othody i resursy». 2020. № 1. DOI: 10.15862/05ECOR120.
2. Informacionnye sistemy, reestry, bazy i banki dannyh, sborniki // Oficial'nyj sajt Minpromtorg Rossii. URL: <http://government.ru/departments/54/events/> (data obrashcheniya: 10.05.2024).

3. Abdullaeva M.A., Koroleva L.A. Perspektiva razvitiya transportirovaniya tverdyh kommunal'nyh othodov zheleznodorozhnym transportom // Transport Rossii: problem i perspektivy – 2023: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. SPb.: IPT RAN, 2023. T. 2. S. 171–175.

4. Kozlov G.V., Ivahnyuk G.K. Morfologicheskij sostav tverdyh kommunal'nyh othodov po regionam mira v HKH i nachale HKHI veka (obzor) // Izvestiya SPbGTI (TU). 2014. № 24 (50). S. 58–66.

5. Hajdarov A.G., Koroleva L.A., Ivahnyuk G.K. Eksergeticheskaya ocenka pozharnoj opasnosti perevozok na zheleznodorozhnom transporte // Pozharovzryvobezopasnost'. 2018. T. 27. № 10. S. 26–37.

6. Koptelov A.A., Milekhin Yu.M., Shlenskij O.F. Teplovye efekty termicheskogo razlozheniya polimerov // Vysokomolekulyarnye soedineniya. Ser. A. № 9. 2005. S. 1628–1634.

7. Gordienko V.P., Kovaleva G.N. Mekhanohimicheskoe vliyanie na strukturu i iznosostojkost' termoplastichnyh sistem: polietilen – karbidy // Plasticheskie massy. 2017. № 1–2. S. 40–43.

8. Aseeva R.M., Zaikov G.E. Gorenje polimernyh materialov. M.: Nauka, 1981. 280 s.

9. Mihajlin Yu.A. Teplo-, termo- i ognestojkost' polimernyh materialov. SPb.: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2011. 416 s.

10. Berov K.K., Bel'shina Yu.N., Dement'ev F.A. Eksperimental'nye issledovaniya koksovogo ostatka polivinilhlordnyh polimernyh materialov metodom elementnogo analiza CHNS // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2014. № 1. S. 33–37.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 17.06.2024; одобрена после рецензирования: 17.10.2024;

принята к публикации: 26.10.2024

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 17.06.2024; approved after review: 17.10.2024;

accepted for publication: 26.10.2024

Информация об авторах:

Абдуллаева Милана Альбертовна, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: blackwolf1205@mail.ru, SPIN-код: 8158-2330

Королева Людмила Анатольевна, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, доцент, e-mail: koroleva.l@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5661-5774>, SPIN-код: 6101-9772

Ивахнюк Григорий Константинович, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор химических наук, профессор, e-mail: fireside@inbox.ru, SPIN-код: 1985-9518

Information about the authors:

Abdullaeva Milana A., adjunct of the faculty of training highly qualified personnel of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: blackwolf1205@mail.ru, SPIN: 8158-2330

Koroleva Lyudmila A., professor of the department of fire, rescue equipment and automobile economy of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: koroleva.l@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5661-5774>, SPIN: 6101-9772

Ivakhnyuk Grigory K., professor of the department of fire safety of technological processes and productions of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of chemical sciences, professor, e-mail: fireside@inbox.ru, SPIN: 1985-9518