

Научная статья

DOI: 10.15593/24111678/2023.03.05

УДК 504.06

**М.П. Красновских**Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
Пермь, Российская Федерация**ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ  
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ И ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ**

Производство синтетических полимеров имеет тенденцию к ежегодному росту, и ожидается, что к 2050 г. на свалках и в окружающей среде накопится около 12 млрд тонн полимерных отходов. Традиционный способ переработки пластиковых отходов с сохранением их материального ресурсного потенциала возможен только с определенными типами пластмасс и только в том случае, если они состоят из цельных полимеров. Многие изделия включают в себя несколько типов полимеров, несколько слоев пластика. Также в состав могут входить полимеры, содержащие в составе гетероатомы или же материалы, загрязненные пищевыми продуктами и иными примесями. Поэтому традиционные виды переработки для таких полимерных композиционных материалов зачастую невозможны. А термические методы утилизации, позволяющие вовлечь энергетический потенциал отработанных полимеров за счет огневого окисления органических молекул, могут приводить к негативному экологическому эффекту за счет образования высокотоксичных соединений, например, хлорорганических соединений, или соединений, содержащих азот и серу. Предложено термохимически перерабатывать многокомпонентные и загрязненные полимерные отходы с помощью процессов медленного пиролиза. В результате медленного пиролиза полиэтилена и полипропилена, и их смеси с добавлением целлюлозосодержащих загрязнений получено жидкое топливо с высокой теплотворной способностью и незначительной долей кислородасодержащих компонентов в составе. Аналогично с помощью медленного пиролиза под давлением резиновой крошки из отработанных покрышек с добавлением растительного масла получен битумоподобный продукт, потенциально применимый в качестве модификатора битума. Термохимическая переработка позволяет повторно использовать загрязненные потоки отходов со смешанными полимерами, которые непригодны для механической переработки. Переработанные таким образом синтетические полимеры могут быть повторно использованы в качестве топлив или модификаторов битумов, что может способствовать снижению добычи ископаемых ресурсов.

**Ключевые слова:** полимеры, отходы, медленный пиролиз, топливо, битум, полиэтилен, полипропилен, отработанные покрышки.

**M.P. Krasnovskikh**

Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

**PROSPECTS FOR THERMOCHEMICAL RECYCLING OF MULTICOMPONENT  
AND CONTAMINATED POLYMERIC WASTES**

The production of synthetic polymers is on an annual growth trend. About 12 billion tons of polymer waste is expected to accumulate in landfills and in the environment by 2050. The traditional way of recycling plastic waste while maintaining its material resource potential is only possible with certain types of plastics and only if they consist of solid polymers. Many plastic products contain heteroatomic compounds, include multiple types of polymers, multiple layers of plastic, or are contaminated with food and dirt. Therefore, traditional types of processing for such polymer composite materials are often not possible. And thermal recycling methods, which make it possible to involve the energy potential of spent polymers due to the fire oxidation of organic molecules, can lead to a negative environmental effect due to the formation of highly toxic compounds, for example, organochlorine compounds, or compounds containing nitrogen and sulfur. Slow pyrolytic thermochemical process of the multicomponent and contaminated polymer wastes is proposed. As a result of the slow pyrolysis of polyethylene and polypropylene, and their mixtures with the addition of cellulose-containing contaminants, a liquid fuel with a high calorific value and a small proportion of oxygen-containing components in the composition was obtained. Similarly, by slow pyrolysis under pressure of crumb rubber from waste tires with the addition of vegetable oil, a bitumen-like product was obtained, potentially applicable as a bitumen modifier. Thermochemical recycling allows the reuse of contaminated waste streams with mixed polymers that are unsuitable for mechanical processing. Synthetic polymers processed in this way can be reused as fuels or bitumen modifiers, which can help reduce the extraction of fossil resources.

**Keywords:** polymers, waste, slow pyrolysis, fuel, bitumen, polyethylene, polypropylene, used tires

В последнее десятилетие наблюдается растущий интерес к вопросам оптимального выбора параметров обработки материалов и технологий, обеспечивающих высокую эффективность и низкое воздействие на окружающую среду [1; 2]. Проведенные исследования и анализы, а также технологическое развитие привели к динамичному росту потребления полимеров и материалов на их основе практически во всех областях [3]. Производство синтетических полимеров имеет тенденцию к ежегодному росту, и ожидается, что к 2050 г. на свалках и в окружающей среде накопится около 12 млрд тонн пластика. Внимание к полимерным отходам возрастает из-за их накопления в последние десятилетия и их негативного воздействия на окружающую наземную и морскую среду и на здоровье человека. В отличие от органических отходов, разложение пластика в природе может занять от сотен до тысяч лет. Под воздействием ультрафиолетового излучения солнца пластик разлагается на «микропластики», которые практически невозможно восстановить и которые нарушают пищевые цепочки и ухудшают естественную среду обитания [4].

Пластмассы и композиционные полимерные материалы классифицируются в соответствии с их основным полимерным материалом. Основные пластмассы, с которыми мы сталкиваемся в нашей повседневной жизни, включают такие полимеры, как ПВД и ПНД (полиэтилен высокой и низкой плотности), ПЭТ (полиэтилентерефталат), ПВХ (поливинилхлорид), ПП (полипропилен) и ПС (полистирол), смолы, а также различные виды синтетического каучука в виде автомобильных покрышек. Все эти материалы отличаются по размеру, цвету, использованию и пригодности для вторичной переработки [5].

Существует три основных способа обращения с полимерными отходами: повторное использование в неизменном виде, переработка (как материала, так и энергии) и удаление (в основном в форме захоронения на свалке или сжигания). Законодательство поощряет, в частности, две формы обращения с отходами: повторное использование и переработку [6].

Традиционный способ переработки пластиковых отходов с сохранением их материального ресурсного потенциала – механическая переработка: процесс, включающий сортировку, измельчение, отделение, промывку, плавление, а затем охлаждение до гранулированного переработанного пластика. Однако этот процесс возможен только с определенными типами пластмасс и только в том случае, если они состоят из цельных полимеров. Например, ПЭТ-бутылки для напитков и контейнеры из полиэтилена высокой плотности легко перерабатываются [7].

Однако на самом деле многие пластиковые изделия включают в себя несколько типов полимеров, несколько слоев пластика или загрязнены пищевыми продуктами и грязью. Это затрудняет или существенно удорожает их механическую переработку. Вместо этого они сжигаются или отправляются на свалки. Вот почему в настоящее время перерабатывается очень мало пластмасс.

Процессы вторичной переработки используются для извлечения материалов и энергии, особенно из загрязненных отходов, структура которых изменена другими материалами, трением, температурой, машиной, процессом и т.д. Переработка полимеров, особенно многослойных конструктивных элементов, композиционных материалов, например отработанных покрышек, требует использования специальных технологических установок и ряда подготовительных операций, включая дробление и отделение, или же затруднена [8].

Экологическая оценка также должна быть неотъемлемым элементом анализа возможных путей утилизации, особенно учитывая, что основным сырьем для производства полимерных материалов являются нефть и газ, добыча которых истощает имеющиеся ресурсы и вызывает негативное воздействие на окружающую среду [9; 10].

Термические методы утилизации, позволяющие вовлечь энергетический потенциал отработанных полимеров за счет огневого окисления органических молекул, на сегодняшний день наиболее развиты [11]. Однако они сопряжены с рядом проблем. Полимеры и полимерные связки в композитах претерпевают деструкцию с разрывом связей в основной цепи и образованием низкомолекулярных газообразных и жидких летучих продуктов. Поэтому термическое

воздействие на СН и СНО-полимерные материалы приводит к образованию широкого спектра газообразных продуктов пиролиза как в инертной атмосфере, так и на воздухе [12]. А незначительное по массовой доле наличие гетероатомов в полимерной композиции может приводить к несопоставимо большому негативному экологическому эффекту в случае образования высококислотных соединений в процессе глубокого окисления, например, хлорорганических соединений, или соединений, содержащих азот и серу [13; 14].

В связи с вышеизложенным представляется предпочтительным снижение и в перспективе отказ от энергетических методов переработки полимерных и композиционных материалов, в том числе и содержащих гетероатомы, как приводящих к обязательному загрязнению окружающей среды токсичными продуктами. Поэтому следует ожидать развития альтернативных методов переработки, основанных на использовании неэнергетического ресурсного потенциала [15–17].

Многообещающие результаты показывает технология медленного пиролиза, которая дает возможность перерабатывать многокомпонентные и загрязненные полимерные отходы, в том числе и содержащие гетероатомы, в новые продукты в виде топлив и модификаторов битума, предоставляя широкие возможности для экологической устойчивости и инноваций в материалах [18].

Цель исследования – продемонстрировать, как технология медленного пиролиза под давлением может быть применима для получения новых материалов/продуктов с добавленной стоимостью из многокомпонентных или загрязненных отходов синтетических полимеров.

Медленный пиролиз проводился во всех экспериментах с помощью стального трубчатого реактора объемом 30 мл, возможные температуры процесса – до 700 °С, давление до 10 атмосфер. В верхней части реактора находится манометр и кран для отбора газовой фазы. Исследуемый образец массой 20,0 г помещали в реактор. Для проведения процесса пиролиза реактор помещали в печь, нагретую до требуемой температуры. После завершения пиролиза реактор извлекали из печи и охлаждали до комнатной температуры. Пробу газовой фазы брали через кран после полного охлаждения реактора. Жидкую фракцию отбирали из реактора после завершения процесса охлаждения реактора и сброса остаточного давления.

В качестве сырья полимеров использовались полиэтилен низкой плотности ПВД и полипропилен ПП. В качестве резины отработанных покрышек использовали резиновую крошку фракции 1–3 мм. Все полимерное сырье производства ООО «Буматика». Сырье ПВД представляет собой гранулы вторичного материала после удаления примесей, мойки и экструзионного формования. Сырье ПП прошло отделение примесей, мойку и измельчение на шредере. Также для исследований использовали сосновые опилки фракции менее 0,5 мм, высушенные при 100 °С и подсолнечное нерафинированное масло марки «Благо».

Полученные продукты анализировались с помощью комплекса инструментальных методов исследований. Термогравиметический анализ, проводимый на стандартном оборудовании NETZSCH STA 449 F1, позволяет проводить термический анализ образца с одновременной регистрацией его термогравиметрических и калориметрических характеристик. Использовалась программа NETZSCH Proteus. Скорость нагрева во всех экспериментах составляла 10 градусов в минуту. Расход аргона в соответствующих экспериментах составлял 40 мл/мин. Полученные данные обрабатывали с помощью соответствующего программного обеспечения.

Качественный состав продукта пиролиза определяли методом хромато-масс-спектрометрии на приборе Agilent Technologies, хроматограф 7890B GS System, масс-спектрометр 5977A MSD. Обработка результатов проводилась с использованием программного комплекса, поставляемого с прибором. Идентификацию продуктов проводили на основании сравнения их масс-спектров со спектрами соединений, имеющихся в библиотеке NIST 2017, прилагаемой к программе.

Высшую теплотворную способность образцов при постоянном объеме определяли на изопериболовом калориметре IKA C6000 1/12.

Структуру и размер частиц продуктов пиролиза анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N.

В результате пиролиза чистого ПВД чистого ПП и этих полимеров с примесями опила и масла при температурах 510–590 °С и времени термообработки 30–60 мин во всех случаях получены жидкости, по внешнему виду и запаху напоминающие природную нефть. При нагревании при атмосферном давлении все жидкости в той или иной степени испаряются, что контролировалось методом термогравиметрии.

Для примера на рис. 1 представлены результаты термогравиметрического анализа в аргоне продуктов пиролиза ПВД (кривая 1) и ПП (кривая 2), полученные при нагревании в течение 60 мин при 590 °С.

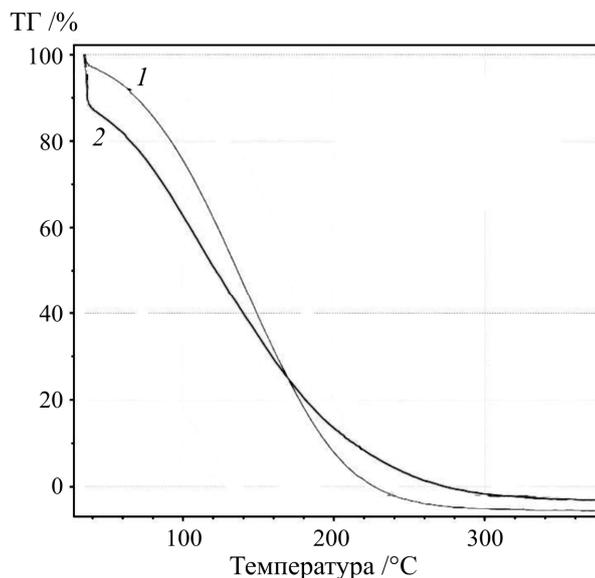


Рис. 1. Результаты термогравиметрического анализа в инертной атмосфере для продукта пиролиза ПВД (кривая 1) и ПП (кривая 2)

Исходные ПВД и ПП практически не содержат легких компонентов и термостабильны до температуры выше 100 °С. В отличие от исходных полимеров, полученные образцы пиролизного топлива начинают испаряться уже при комнатных температурах.

Исходя из представлений о радикальном характере процесса пиролиза, можно предположить, что наличие в системе веществ, поставляющих свободные радикалы, может привести к снижению в продукте конденсированных углеводородов. Таким образом, совместный пиролиз полимеров с загрязняющими веществами в виде соединений, содержащих гетероатомы, например, маслами, растительными целлюлозосодержащими отходами, будет приводить к аналогичным продуктам в виде топлив с увеличенной теплотворной способностью в технологически удобном жидком состоянии.

Ряд исследователей рассматривали совместный пиролиз ПВД с различными видами древесных отходов, что по сути является добавлением в реакционную смесь кислородсодержащих полимеров в форме целлюлозы и лигнина, а также остаточной воды в древесине. Совместный пиролиз с древесиной возможен не только с полиолефинами, но и с другими полимерами. Так, совместный пиролиз стирол-бутадиенового каучука с лигнинсодержащими материалами в виде древесины ольхи, биомассы соломы и отходов мебели приводит к увеличению масла в продуктах пиролиза [19; 20].

По своему химическому составу образец после совместного пиролиза полимеров полиолефинового типа и опила представляют собой преимущественно углеводороды линейного (в случае ПВД) или же разветвленного (в случае ПП) строения, что подтверждается результатами газовой хроматографии, совмещенной с масс-спектрометрией, в табл. 1 представлено относительное содержание мажорных соединений.

Таблица 1

Результаты ГХ-МС-анализа образцов продуктов пиролиза ПВД и ПП в смеси с целлюлозосодержащими отходами

Продукт пиролиза ПВД с примесями целлюлозы		Продукт пиролиза ПП с примесями целлюлозы	
Соединение	мас. %	Соединение	мас. %
1-гексен	7,77	2,4-диметил-1-гептен	16,51
2-гептен	3,67	1-гексен, 2-метил-	8,22
1-неприличный	3,46	2-гексен	8,02
3-октен,(Z)-	3,42	1-пентадецен	4,77
1-додецен	3,29	1-пентадецен	3,38
1-деcene	3,2	1-децен, 2,4-диметил-	2,64
Пентадекан	3,16	–	–
1-тридецен	3,14	–	–

Предположение о свободнорадикальном механизме доказано авторами [21], которые показали, что значительное количество образующихся при пиролизе лигнина свободных радикалов с высокой энергией способно разрушать связи в углеводородных полимерах с образованием множества более коротких молекул.

Определение высшей теплотворной способности для продуктов пиролиза загрязненных ПВД и ПП показало значения в 57 и 56 МДж/кг соответственно, что близко для традиционных видов жидкого топлива.

Аналогичным образом работает и добавление растительных масел в процесс пиролиза резиновой крошки из отработанных покрышек. Основную долю отработанных покрышек составляет резина, полученная преимущественно из бутадиена. В составе шин имеются наполнители, улучшающие свойства резины, такие как сажа и оксид цинка, а также тканевый и металлический корды. Имеется ряд технических решений как прямого сжигания покрышек для получения тепловой энергии, так и пиролиза для производства жидкого топлива. Однако материал покрышек в своем составе помимо углерода и водорода обязательно содержит серу для вулканизации и азот в составе добавок, улучшающих свойства резины. В результате этого не только снижается ценность этого отработанного материала, как энергетического ресурса, но и возникает опасность образования высокотоксичных соединений при пиролизе шин, которые в дальнейшем попадают в получаемое жидкое топливо. При сжигании пиролизного топлива или исходных покрышек соединения серы и азота окисляются и попадают в атмосферу, что также может служить источником загрязнения окружающей среды.

Исходя из вышеописанных данных о механизме пиролиза полимеров в присутствии кислородсодержащих соединений, были получены продукты резиновой крошки и совместного пиролиза резиновой крошки и 20 % растительного масла.

Количественная оценка деструкции резины, входящей в состав отработанных покрышек, и образования более низкомолекулярных фракций может быть проведена путем нахождения доли углеводородов, испаряющихся в определенном температурном интервале. В данном случае представляло интерес оценить долю фракции, аналогичную керосину и дизельному топливу, которая перегоняется при температурах 150–360 °С. Доля средней фракций для образцов, полученных при пиролизе резины из отработанных покрышек и при пиролизе резины с добавлением масла, приведена в табл. 2.

Таблица 2

Доли средней (150–360 °С) фракции в составе образцов по данным термогравиметрии

Образец	Доля средней фракции (150–360 °С), мас. %
Продукт пиролиза резиновой крошки	29,38
Продукт пиролиза резиновой крошки и растительного масла	40,79

Для дальнейших путей утилизации резиновой крошки в асфальтобетоне определяющей является химическая совместимость продуктов переработки резины с битумом. Ее можно оценить по растворимости полученных продуктов пиролиза в органических растворителях, главным образом в толуоле, согласно ГОСТ 20739-75. Установлено, что растворимая часть в случае продукта пиролиза чистой резиновой крошки составляет 41 %, а в случае совместного пиролиза резиновой крошки с добавлением масла – 59 %, что подтверждает факт, что в случае совместного пиролиза процесс девулканизации резины и деструкции полимера протекает значительно глубже. Термохимическая обработка приводит, помимо девулканизации и образования комплекса индивидуальных химических соединений, к диспергированию нерастворимой в толуоле полимерной части. На рис. 2 представлены результаты сканирующей электронной микроскопии пленки продукта пиролиза резины совместно с растительным маслом, отмечается диспергирование продукта до наноразмерных частиц, характерных для битумов.

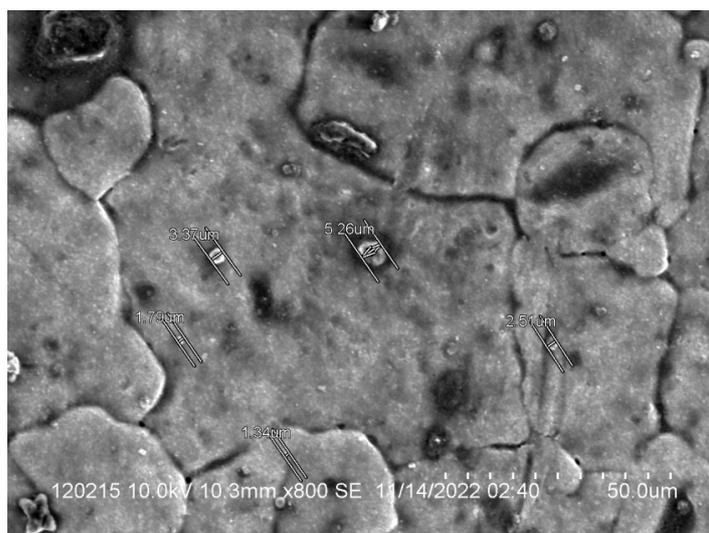


Рис. 2. Микрофотография пленки органического продукта с частицами нерастворенного полимерного материала

В ходе термохимической переработки происходит разрушение трехмерной сетки и крекинг полимерных молекул резины с образованием широкого спектра индивидуальных органических олигомеров и высокодисперсных частиц органической и неорганической природы. Эти результаты согласуются с исследованиями других авторов [22], где показано, что пиролиз резины происходит интенсивнее, увеличивается выход жидкого продукта в присутствии растительных отходов в виде стеблей кукурузы.

Таким образом, можно заключить, что добавление кислородсодержащих соединений к полимерам типа полеолефинового типа (полиэтилен, полипропилен, каучук) в процессе пиролиза позволяет существенно интенсифицировать крекинг исходного отхода до жидких продуктов. Вероятно, это связано с образованием при температурах пиролиза значительного количества коротких кислородсодержащих радикалов, способствующих разрыву полимерных углеводородных молекул и образованию олигомеров в случае вулканизированного каучука и углеводородов средней длины в случае ПВД и ПП.

Термохимическая переработка позволяет повторно использовать загрязненные потоки отходов со смешанными полимерами, которые непригодны для механической переработки. Поскольку термохимически переработанные полимеры могут быть повторно использованы в качестве топлив или модификаторов битумов, это может способствовать снижению добычи ископаемых ресурсов. Также термохимическая переработка потенциально снижает выбросы углекислого газа, связанные со сжиганием и рекуперацией энергии. Согласно экономике замкнутого

цикла, технологии, которые очищают, разлагают или перерабатывают отходы полимеров в новые материалы, могут открыть потенциальные возможности получения дохода.

Поэтому оптимальным технически обоснованным решением может быть переработка потоков отработанных полимеров, в том числе многокомпонентных и загрязненных, содержащих в составе гетероатомы, в востребованные продукты. С эколого-экономической точки зрения такое решение также имеет преимущество, заключающееся в извлечении материального ресурсного потенциала из отходов и в получении прибыли от продажи произведенного продукта.

### Список литературы

1. Flizikowski J, Kruszelnicka W, Macko M. The Development of Efficient Contaminated Polymer Materials Shredding in Recycling Processes // *Polymers*. – 2021. – Vol. 26. № 13 (5). – P. 713. DOI: 10.3390/polym13050713.
2. Grigore M.E. Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers // *Recycling*. – 2017. – Vol. 2. – P. 24. DOI: 10.3390/recycling2040024.
3. Eco-Design of Energy Production Systems: The Problem of Renewable Energy Capacity Recycling / S. Ratner, K. Gomonov, S. Revinova, I. Lazanyuk // *Appl. Sci.* – 2020. – Vol. 10. – P. 4339. <https://doi.org/10.3390/app10124339>.
4. Parker L. Here's how much plastic trash is littering the earth. National Geographic Society (website). – 2018 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nationalgeographic.com/science/article/plastic-produced-recycling-waste-ocean-trash-debris-environment> (дата обращения: 10.01.2023).
5. Садикова М.М. Классификация полимер композиционных материалов // *Universum: технические науки*. – 2023. – № 2–4 (107). – С. 32–34.
6. Об утверждении Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года: Распоряжение правительства РФ от 25 января 2018 года № 84-р. – М., 2018.
7. Assessing scaling effects of circular economy strategies: A case study on plastic bottle closed-loop recycling in the USA PET market / G. Lonca, P. Lesage, G. Majeau-Bettez [et al.] // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2020. – Vol. 162. – P. 105013. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105013.
8. Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: A review / D. Czajczyńska, R. Krzyżyńska, H. Jouhara, N. Spencer // *Energy*. – 2017. – Vol. 134. – P. 1121–1131. DOI: 10.1016/j.energy.2017.05.042.
9. Пшебельская Л.Ю., Ледницкий А.В. Эффективные направления переработки пластиковых отходов // *Труды БГТУ. Серия 5: Экономика и управление*. – 2021. – № 2 (250). – С. 89–94. DOI: 10.52065/2520-6877-2021-250-2-89-94.
10. Hamad K., Kaseem M., Deri F. Recycling of Waste from Polymer Materials: An Overview of the Recent Works // *Polym. Degrad. Stab.* – 2013. – Vol. 98. – P. 2801–2812.
11. Вайсман Я.И. Ретроспективный анализ и перспективы развития термических методов обезвреживания и утилизации твердых бытовых отходов // *Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика*. – 2015. – № 1. – С. 6–23.
12. Красновских М.П. К вопросу об опасности компонентов термической утилизации полимерных продуктов химических и нефтехимических отраслей промышленности в условиях урбанизированных территорий // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. – 2020. – № 1 (37). – С. 107–125. DOI: 10.15593/2409-5125/2020.01.09.
13. Армишева Г.Т. Исследование разложения отходов из поливинилхлорида // *Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика*. – 2014. – № 4. – С. 141–150.
14. End of Life Tires as a Possible Source of Toxic Substances Emission in the Process of Combustion / I. Glushankova, A. Ketov, M. Krasnovskikh, L. Rudakova, I. Vaisman // *Resources*. – 2019. – Vol. 8. – P. 113. DOI: 10.3390/resources8020113.
15. Innovative approaches to plastic waste recycling using the example of the textile industry / I.P. Abramenko, K.Yu. Boeva, O.S. Dubskaya [et al.]. // *Amazonia Investiga*. – 2021. – Vol. 10, No. 46. – P. 234–243. DOI: 10.34069/AI/2021.46.10.24. – EDN FJAARF.

16. Chemical recycling of plastic waste via thermocatalytic routes / J. Lee, E.E. Kwon, S.S. Lam, W.-H. Chen, J. Rinklebe, Y.-K. Park // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 321. – P. 128989. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128989.
17. Пугин К.Г., Яконцева О.В., Салахова В.К. Использование полимерных материалов в качестве структурного элемента в составе асфальтобетона // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. – 2021. – № 4. – С. 29–36. – DOI: 10.15593/24111678/2021.04.04.
18. Baseline Data of Low-Density Polyethylene Continuous Pyrolysis for Liquid Fuel Manufacture / A. Ketov, V. Korotaev, N. Sliusar, V. Bosnic, M. Krasnovskikh, A. Gorbunov // *Recycling*. – 2022. – Vol. 7. – P. 2. DOI: 10.3390/recycling7010002.
19. Eylem Önal, Başak Burcu Uzun, Ayşe Eren Pütün. Bio-oil production via co-pyrolysis of almond shell as biomass and high-density polyethylene // *Energy Conversion and Management*. – 2014. – Vol. 78. – P. 704–710. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.11.022.
20. Marcin Sajdak, Impact of plastic blends on the product yield from co-pyrolysis of lignin-rich materials // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2017. – Vol. 124. – P. 415–425. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.03.002.
21. Free-Radical Analysis on Thermochemical Transformation of Lignin to Phenolic Compounds / Jun Hu, Dekui Shen, Rui Xiao, Shiliang Wu and Huiyan Zhang // *Energy & Fuels*. – 2021. – Vol. 27 (1). – 285–293. DOI: 10.1021/ef3016602.
22. Investigation on the co-pyrolysis of waste rubber/plastics blended with a stalk additive / H. Li, X. Jiang, H. Cui, F. Wang, X. Zhang, L. Yang, C. Wang // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2015. – Vol. 115. – P. 37–42. DOI: 10.1016/j.jaap.2015.07.004.

#### References

1. Flizikowski J., Kruszelnicka W., Macko M. The Development of Efficient Contaminated Polymer Materials Shredding in Recycling Processes. *Polymers*, 2021, 13, 713. <https://doi.org/10.3390/polym13050713>.
2. Grigore M.E. Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers. *Recycling*, 2017, 2, 24. <https://doi.org/10.3390/recycling2040024>.
3. Ratner S., Gomonov K., Revinova S., Lazanyuk I. Eco-Design of Energy Production Systems: The Problem of Renewable Energy Capacity Recycling. *Applied Sciences*, 2020, 10, 4339. <https://doi.org/10.3390/app10124339>.
4. Parker L. (2018). Here's how much plastic trash is littering the earth. National Geographic Society (website). Available at: <https://www.nationalgeographic.com/science/article/plastic-produced-recycling-waste-ocean-trash-debris-environment> (accessed 17 May 2023).
5. Sadikova M.M. Klassifikaciya polimer kompozicionnyh materialov [Classification of polymer composite materials]. *Universum: technical sciences*, 2023, no. 2-4 (107), pp. 32-34.
6. Decree of the Government of the Russian Federation of January 25, 2018 No. 84-r "On approval of the Strategy for the development of industry for the processing, recycling and disposal of production and consumption waste for the period up to 2030".
7. Lonca G., Lesage P., Majeau-Bettez G. [et al.] Assessing scaling effects of circular economy strategies: A case study on plastic bottle closed-loop recycling in the USA PET market. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 162, pp. 105013. DOI 10.1016/j.resconrec.2020.105013.
8. Czajczyńska D., Krzyżyńska R., Jouhara H., Spencer N. Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: A review. *Energy*, 2017, 134, pp. 1121–1131. doi: 10.1016/j.energy.2017.05.042.
9. Pshebel'skaya L. YU., Lednickij A.V. Effektivnye napravleniya pererabotki plastikovyh othodov [Effective directions for recycling plastic waste]. *Proceedings of BSTU. Series 5: Economics and Management*, 2021, 2 (250), pp. 89-94. DOI 10.52065/2520-6877-2021-250-2-89-94.
10. Hamad K., Kaseem M., Deri F. Recycling of Waste from Polymer Materials: An Overview of the Recent Works. *Polymer Degradation and Stability*, 2013, 98, pp. 2801–2812.
11. Vaisman Ia.I. Retrospektivnyi analiz i perspektivy razvitiia termicheskikh metodov obezvrezhivaniia i utilizatsii tverdykh bytovykh otkhodov [Retrospective analysis and development prospects for the thermal waste neutralization and recycling]. *Bulletin of Perm national research polytechnic university. Applied ecology. Urban development*, 2015, no. 1, pp. 6-23. DOI 10.15593/240985125/2015.01.01.
12. Krasnovskikh M.P. K voprosu ob opasnosti komponentov termicheskoy utilizatsii polimernykh produktov himicheskikh i neftekhimicheskikh otraslej promyshlennosti v usloviyah urbanizirovannykh territorij [On the issue of the danger of components of thermal utilization of polymer products of chemical and petrochemical industries in urban areas]. *Bulletin of Perm national research polytechnic university. Applied ecology. Urban development*, 2020, no. 1 (37), pp. 107-125. DOI 10.15593/2409-5125/2020.01.09.

13. Armisheva G.T. Issledovanie razlozheniya othodov iz polivinilhlorida [Polyvinyl Chloride Waste Degradation Study]. *Bulletin of Perm national research polytechnic university. Applied ecology. Urban development*, 2014, no. 4, pp. 141-150.
14. Glushankova I., Ketov A., Krasnovskikh M., Rudakova L., Vaisman I. End of Life Tires as a Possible Source of Toxic Substances Emission in the Process of Combustion. *Resources*, 2019, 8, 113. <https://doi.org/10.3390/resources8020113>.
15. Abramenko I.P., Boeva K.Yu., Dubskaya O.S. [et al.]. Innovative approaches to plastic waste recycling using the example of the textile industry. *Amazonia Investiga*. 2021, Vol. 10, no. 46, pp. 234-243. DOI 10.34069/AI/2021.46.10.24. EDN FJAARF.
16. Lee J., Kwon E.E., Lam S.S., Chen W.-H., Rinklebe J., & Park, Y.-K. Chemical recycling of plastic waste via thermocatalytic routes. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321, p. 128989. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128989.
17. Pugin K.G., YAkonceva O.V., Salahova V.K. Ispol'zovanie polimernykh materialov v kachestve strukturnogo elementa v sostave asfal'tobetona [The use of polymeric materials as a structural element in the composition of asphalt concrete]. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2021, no. 4, pp. 29-36. DOI 10.15593/24111678/2021.04.04.
18. Ketov A., Korotaev V., Sliusar N., Bosnic V., Krasnovskikh M., Gorbunov A. Baseline Data of Low-Density Polyethylene Continuous Pyrolysis for Liquid Fuel Manufacture. *Recycling*, 2022, 7, 2. <https://doi.org/10.3390/recycling7010002>
19. Eylem Önal, Başak Burcu Uzun, Ayşe Eren Pütün. Bio-oil production via co-pyrolysis of almond shell as biomass and high-density polyethylene. *Energy Conversion and Management*, 2014, 78, pp. 704–710. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.022>.
20. Marcin Sajdak, Impact of plastic blends on the product yield from co-pyrolysis of lignin-rich materials. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2017, 124, pp. 415–425. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2017.03.002>.
21. Jun Hu, Dekui Shen, Rui Xiao, Shiliang Wu and Huiyan Zhang. Free-Radical Analysis on Thermochemical Transformation of Lignin to Phenolic Compounds. *Energy & Fuels*, 2021, 27 (1), pp. 285–293. DOI: 10.1021/ef3016602.
22. Li H., Jiang X., Cui H., Wang F., Zhang X., Yang L., Wang C. Investigation on the co-pyrolysis of waste rubber/plastics blended with a stalk additive. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2015, 115, pp. 37–42. doi: 10.1016/j.jaap.2015.07.004.

#### Об авторе

**Красновских Марина Павловна** (Пермь, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент, кафедры неорганической химии, химической технологии и техносферной безопасности, Пермский государственный национальный исследовательский университет (Российская Федерация, 614068, РФ, г. Пермь, ул. Букирева, 15); научный сотрудник, кафедра «Охрана окружающей среды», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: krasnovskikh@yandex.ru).

#### About the author

**Marina P. Krasnovskikh** (Perm, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Inorganic Chemistry, Chemical Technology and Technosphere Safety, Perm State National Research University (15, st. Bukireva, Perm, 614068, Russian Federation); Researcher, Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky pr., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: krasnovskikh@yandex.ru).

**Финансирование.** Исследования выполнены при финансовой поддержке Пермского научно-образовательного центра «Рациональное недропользование», 2023 г.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад автора** 100 %.

Поступила: 27.05.2023

Одобрена: 10.06.2023

Принята к публикации: 26.06.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Красновских, М.П. Перспективы термохимической утилизации многокомпонентных и загрязненных полимерных отходов / М.П. Красновских // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2023. – № 3. – С. 50–58. DOI: 10.15593/24111678/2023.03.05

Please cite this article in English as: Krasnovskikh M.P. Prospects for thermochemical recycling of multicomponent and contaminated polymeric wastes. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2023, no. 3, pp. 50-58. DOI: 10.15593/24111678/2023.03.05