

Научная статья

DOI: 10.15593/24111678/2023.01.04

УДК 661.7

**С.Ю. Чудинов**

ООО «Буматика», Пермь, Россия

## **ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПУТЕЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ**

На полигонах твердых коммунальных отходов (ТКО) основным видом отходов, требующим утилизации, являются полимеры различного строения. В статье показано на конкретном примере переработки вторичных полимеров в виде пластика и резины автомобильных покрышек, как технико-экономические показатели технологии, рыночная конъюнктура и экологические риски определяют выбор технологии переработки. Значительную часть пластика можно переработать в гранулы вторичного пластика, но проблемными остаются фракции с высоким уровнем загрязнения либо смесь пластика, которую трудно или невозможно разделить на отдельные виды пластика. Показано, что низкая удельная теплотворная способность таких видов пластика препятствует применению их по энергетической схеме. Предложено перерабатывать не утилизируемые пластики в бескислородное жидкое топливо. Обсуждаются пути утилизации автомобильных покрышек. В связи с тем, что автомобильные покрышки являются композиционным материалом, показана экологическая опасность их переработки по энергетическому пути и предложено использовать материальный потенциал покрышек для производства битумоподобных материалов. Для всех рассмотренных видов вторичных полимерных материалов рассмотрены технико-экономические показатели различных технологических решений.

**Ключевые слова:** полимеры, отходы, пиролиз, топливо, битум, пластики, покрышки.

**S.Yu. Chudinov**

Bumatica Ltd, Perm, Russian Federation

## **TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF TECHNOLOGICAL WAYS FOR PROCESSING POLYMER WASTE**

At solid municipal waste landfills, the main type of waste requiring disposal is polymers of various structures. It is shown on a specific example of the processing of secondary polymers in the form of plastics and rubber of automobile tires how the technical and economic indicators of the technology, market conditions and environmental risks determine the choice of the processing technology. A significant part of plastics can be processed into secondary plastic pellets, but fractions with high levels of pollution remain problematic, either a mixture of plastics that is difficult or impossible to separate into separate types of plastic. It has been shown that the low specific calorific value of such types of plastic prevents their use according to the energy scheme. It is proposed to process non-utilisable plastics into anoxic liquid fuel. Ways to dispose of car tires are being discussed. Due to the fact that automotive tires are a composite material, the environmental danger of their processing along the energy path is shown and it is proposed to use the material potential of tires for the production of bitumen-like materials. Technical and economic indicators of various technological solutions are considered for all types of secondary polymer materials considered.

**Keywords:** polymers, waste, pyrolysis, fuel, bitumen, plastics, tires.

Объем твердых коммунальных отходов ежегодно возрастает в количественном выражении и изменяется в качественном. Анализ динамики изменения накопления, состава и свойств ТКО два десятилетия показывает [1], что происходит ежегодное увеличение общего количества отходов на 3,5 %. Изменяется и морфологический состав: так, ежегодно содержание полимеров увеличивается на 6,4 %, макулатуры на 6,8 %, стекла на 3,0 %, а содержание пищевых отходов снижается на 5,9 % по отношению к значениям предыдущего года.

Поэтому на полигонах ТКО основным видом отходов, требующим утилизации, являются полимеры различного строения. Вопреки устоявшемуся мнению об инертности полимеров и устойчивости в окружающей среде, в реальных условиях полигона происходит деградация

полимеров, сопровождающаяся загрязнением атмосферы и полигонных вод. В результате биохимической деградации происходит снижение энергетического потенциала как в целом ТКО, так и полимеров [2]. Поэтому приоритетным направлением деятельности экотехнопарков следует признать сортировку, обработку свежих ТКО с последующей передачей вторичных материальных ресурсов (ВМР) на утилизацию, что в последние годы реализуется на практике, но при решении задачи необходимо выбирать оптимальные технологии в соответствии с технико-экономической целесообразностью. Кроме того, при выборе технических решений обязательным условием является геоэкологическая оценка технологий утилизации полимерных отходов, которая позволит на стадии разработки технологий оценить экологические риски, возникающие при производстве и эксплуатации получаемого продукта [3].

Цели исследования – продемонстрировать на конкретном примере переработки вторичных полимеров в виде пластиков и резины автомобильных покрышек, как технико-экономические показатели технологии, рыночная конъюнктура и экологические риски определяют выбор технологии переработки.

Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ (ред. от 14.07.2022) «Об отходах производства и потребления» устанавливает, что основными принципами государственной политики в области обращения с отходами является использование методов экономического регулирования деятельности в области обращения с отходами в целях уменьшения количества отходов и вовлечения их в хозяйственный оборот. В связи с экономической тарифной моделью и поступающими доходами за счет услуг региональных операторов обращения с отходами формирование себестоимости продукции, производимой из твердых коммунальных отходов, имеет экономические преимущества по сравнению с продукцией, производимой из первичного сырья.

Тариф на обращение с ТКО с 1 июля по 31 декабря 2022 г. в Пермском крае составляет 6597,02 руб./т (Постановление Министерства тарифного регулирования и энергетики Пермского края от 28.10.2022 г. № 7-0). Поэтому можно считать, что килограмм продукции, полученной из вторичного сырья, имеет конкурентное преимущество перед продукцией, полученной из первичного сырья, выраженное в сумме 6,6 руб. за кг.

Рассмотрим структуру себестоимости вторичного сырья на примере полиэтилена высокого давления (ПВД). Для получения ПВД в форме сырья, пригодного для дальнейшей переработки, общий поток сначала подвергается сортировке. В текущих ценах операция требует затрат 8–10 руб./кг. Далее материал измельчается до размеров 5–15 мм, что увеличивает себестоимость на 5–6 руб./кг. Мойка и сушка отсортированного и дробленого ПВД требует еще 15–20 руб./кг. Отходы после измельчения, мойки и сушки составляют 27–32 %. В результате операционные затраты составляют 30–35 руб./кг. С учетом утилизационного сбора можно считать, что себестоимость сырья в форме чистого и дробленого ПВД составляет 28–30 руб./кг. Учитывая стоимость отходов, итоговая себестоимость получается 38–44 руб./кг.

Наиболее широко используемыми на практике технологиями переработки вторичного полиэтилена является его сжигание для получения энергии в том или ином виде и изготовление на его основе вторичных гранул. В первом случае прямым конкурентом вторичному полиэтилену выступают различные виды минерального топлива от каменного угля до нефтепродуктов. С одной стороны, даже не учитывая энергетическую ценность полиэтилена, очевидно, что при текущей оптовой цене на кокс 32–35 руб./кг и на печное топливо 25–27 руб./кг полиэтилену сложно конкурировать с имеющимися на рынке энергоносителями.

С другой стороны, оптовая цена вторичных гранул полиэтилена составляет 60–65 руб./кг на спотовых рынках на ноябрь 2022 г. Очевидно, что при затратах 10–12 руб./кг на гранулирование и соответственно себестоимости готовых вторичных гранул в 38–56 руб./кг переработка ПВД во вторичные гранулы оказывается экономически целесообразным решением. Дополнительное преимущество данному техническому решению придает отсутствие негативного воздействия производства на окружающую среду. Поэтому сегодня переработка большинства пластиков во вторичные гранулы оказывается наиболее экономически эффективной. Однако на

практике не только ПВД, но и любой компонент ТКО существует в виде различных конкретных типов продуктов, некоторые из которых не могут быть переработаны во вторичное сырье, как показано в табл. 1.

Таблица 1

Экономически эффективные технические решения  
по переработке пластика

Вид пластика	Код	Вид отходов	Продукт переработки
ПВД	4	Пленка	Вторичные гранулы
	4	Флаконы	Вторичные гранулы
ПНД	2	Флаконы	Вторичные гранулы
	2	Канистры от нефтепродуктов	-
	2	Пакеты	-
ПП	5	Тара, упаковка	Вторичные гранулы
ПЭТ	1	Флаконы от водных жидкостей базовых цветов	Вторичные гранулы по цветам
	1	Флаконы других цветов кроме прозрачного, голубого, зеленого, коричневого, белого	-
	1	Флаконы от растительного масла	-
	1	Фракция менее 3 мм	-
ПС	6	Тара, упаковка, преимущественно ППС	-
	6	Корпуса от орг и бытовой техники	Вторичные гранулы
ПВХ	3	Упаковка, строительные материалы	-
Многослойные пакеты	7	Дой-паки, полиуретан, поликарбонат, полиамиды, полиакрилонитрил и др., биопластики, смесь полиэтилена высокого и низкого давления (HDPE и LDPE), смесь материалов полиолефиновой группы	-
АБС	9	Корпуса мониторов/телевизоров и электроинструмента, кофеварки, сотовые телефоны, компьютерный пластик	Вторичные гранулы

Из данных табл. 1 очевидно, что проблемы с переработкой возникают в тех случаях, когда сырьем является либо сильно загрязненный пластик, либо смесь пластиков, которую трудно (как мелкую фракцию) или невозможно (как дой-пак) разделить на отдельные виды пластика. Тем не менее единственным общим решением для всех этих не утилизируемых отходов является их сжигание для получения энергии. Исключением является поливинилхлорид, который при сжигании образует токсичные хлорорганические соединения, поэтому для него пока нет эффективного пути утилизации.

Сжигание полимерных отходов является универсальным решением с точки зрения утилизации, но имеет технологические проблемы, связанные с их невысоким удельным энергетическим потенциалом. В Европе в последние годы приобрели популярность топливные гранулы RDF (refuse derived fuel), произведенные из отходов, преимущественно из пластика. Однако очевидным их недостатком является низкая удельная теплотворная способность, что осложняет их конкуренцию с традиционными видами топлива. Для решения этой проблемы предлагаются различные технические решения. Например, торрефикация RDF, то есть предварительная термическая обработка гранул при температурах 200–300 °С, может значительно снизить влажность и увеличить низшую теплоту сгорания с 19,6 до 25,3 МДж/кг [4].

Помимо пластика, гранулы RDF обычно содержат текстиль и бумагу. Авторы [5] установили, что производимые на заводах гранулы RDF в основном состоят из фракций текстиля, бумаги и пластмасс. Причем помимо полиэтилена и полипропилена, во фракции пластика присутствует ПЭТ. Состав гранул меняется изо дня в день, но типичные гранулы содержат около 60 % текстиля, 20 % бумаги и 20 % пластика.

Исходя из материального состава гранул RDF, можно утверждать, что удельная теплота сгорания оказывается низкой вследствие высокого содержания в их составе кислородсодержащих соединений. Действительно, высшую теплоту сгорания топлива можно рассчитать в соответствии с формулой Менделеева [6]. Соответствующие величины для различных топлив, включая полимеры, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Высшая теплота сгорания различных веществ, рассчитанная в соответствии с формулой Менделеева

Соединение	Брутто, химическая формула	$Q_{н}$ , МДж/кг
Метан	$CH_4$	51,1
Этан	$C_2H_6$	47,6
Пропан	$C_3H_8$	46,4
Бутан	$C_4H_{10}$	45,7
Октан	$C_8H_{18}$	44,7
Ундекан	$C_{11}H_{24}$	44,5
Полиэтилен	$C_2H_4$	43,7
Полипропилен	$C_3H_6$	43,7
Полистирол	$C_8H_8$	39,2
ПЭТ	$C_{10}H_8O_4$	21,8
Стеариновая кислота	$C_{18}H_{36}O_2$	37,6
Этанол	$C_2H_6O_1$	27,3
Глицерин	$C_3H_8O_3$	16,5
Целлюлоза	$C_6H_{10}O_5$	16,0

Из формулы Менделеева прямо следует, что наличие атомов кислорода в составе соединения снижает теплоту сгорания, поэтому в представленной таблице все кислородсодержащие соединения имеют в два раза (и более) ниже теплоту сгорания, чем бескислородные. Поэтому ни синтетический полимер ПЭТ, ни природный полимер целлюлоза не могут составить конкуренцию в виде топлива бескислородным соединениям, в том числе полиэтилену или полипропилену. По этой же причине этанол, как классическое биотопливо, не может заменить минеральное бескислородное топливо в существующих двигателях, оптимизированных под топливо с теплотой сгорания не ниже 44–45 МДж/кг.

Таким образом, в существующих условиях производство RDF из не утилизируемых отходов пластика представляется бесперспективным с экономической точки зрения. Действительно, предположим, что гранулы RDF формируются экструзией сразу после выделения соответствующих фракций. В этом случае из себестоимости исключаются затраты на мойку и сушку, но добавляются затраты на экструзионное формование. Тогда себестоимость RDF-гранул оказывается 20–25 руб./кг, что примерно соответствует цене на печное топливо с учетом розничной наценки. Однако печное топливо более конкурентно на рынке энергоносителей по причинам большей удельной теплоты сгорания и технологической проработанности жидкостных горелок, в отличие от пеллетных.

Возможным техническим решением утилизации неиспользуемых в настоящее время фракций пластика может быть их переработка в жидкое бескислородное топливо в результате медленного пиролиза под давлением [7; 8]. В этом случае полученный продукт является смесью бескислородных углеводородов и имеет теплотехнические характеристики на уровне минерального топлива. Это позволит ему при планируемой себестоимости успешно конкурировать с печными топливами, получаемыми из минерального сырья.

Помимо пластика трудноутилизируемым продуктом, поступающим на полигоны ТКО, являются автомобильные покрышки. Прогресс, достигнутый в последние годы в области обра-

щения с отходами, привел к тому, что шины начинают восприниматься как потенциальный источник ценного сырья [9].

Исторически первым методом массовой утилизации отработанных покрышек является их сжигание для получения тепловой энергии. Использование покрышек в качестве вторичного топлива при производстве цемента стало эффективным способом снижения издержек производства [10]. Метод сжигания в цементных печах имеет неоспоримое преимущество в том, что неорганические добавки в виде оксидов кремния и цинка переходят в клинкер, не изменяя его потребительских свойств, и поэтому не требуют дополнительной утилизации. Однако сжигание покрышек требует глубокой очистки отходящих газов и имеет риски образования высокотоксичных соединений [11]. Поэтому пристальное внимание исследователей сосредоточено на методах, позволяющих использовать материальный ресурсный потенциал покрышек.

Авторы показывают [12], как изменялся подход к методам утилизации покрышек. После запрета захоронения и открытого сжигания, основное внимание в технологиях утилизации сосредоточилось на производстве и применении резиновой крошки. Такой подход до сих пор используется вследствие относительной простоты технологического процесса. Из известных способов обработки шин отделением корда с получением крошки невозможно выделить один универсальный или оптимальный метод, который можно считать наилучшим для всех ситуаций [13]. Собственно резиновая крошка обычно и подразумевается, как основной материал шин, подлежащий дальнейшей переработке. Однако товарная резиновая крошка получается из узкого размера автомобильных покрышек: крупные легковые, от самосвалов, седельных тягачей и автомобильных фур. Зимние шипованные покрышки радиусов 12–22”, а также грузовые покрышки выше 25” и покрышки от спецтехники технологически не перерабатываются в резиновую крошку.

Известно применение резиновой крошки в даунциклинге – для покрытий детских площадок [14], искусственных газонов, легких наполнителей, изоляционных панелей [15] и в рециклинге – смещения в небольших количествах с первичным каучуком для изготовления новых шин [16]. Переработка шин обратно в изопрен и другие компоненты сегодня представляется невозможной. Однако процессом, противоположным вулканизации и, следовательно, делающим эластомерный материал снова плавящимся и пригодным для обработки, является девулканизация [17]. Девулканизация предлагает переработку шин в продукты с высокой добавленной стоимостью. Девулканизированный каучук может быть использован повторно, переработан в качестве нового продукта или использован для рекуперации энергии в различных областях применения [18].

Таким образом, все методы утилизации автомобильных покрышек можно условно разделить на две группы. В одном случае производят окисление органической части покрышек с извлечением энергии, во втором производят преобразование покрышек и используют в том или ином виде их материальный потенциал. К первому типу следует отнести наиболее распространенный в России пиролиз покрышек в периодических барабанных печах. Проблемы данного технического решения прямо вытекают из химического состава покрышек. Покрышки являются композиционным материалом и собственно каучук и другие нефтехимические компоненты составляют не более 55 мас. %. [19]. Сера и неорганические оксиды содержатся в количестве 3 мас. %, сталь металлокорда 10 мас. % и углерод 28 мас. %. Очевидно, что при прямом сжигании покрышек обязательно образуется оксид серы (IV), который необходимо удалять из топочных газов, и зольный остаток из оксидов цинка и алюминия. В случае пиролиза покрышек с получением пиролизного топлива, экологические проблемы оказываются более острыми. Помимо выбросов оксида серы (IV) при сжигании газообразных продуктов пиролиза, в процессе термообработки образуется пироуглерод до трети от массы исходных покрышек. Высокое содержание неорганических оксидов в пироуглероде препятствует его использованию в качестве твердого топлива, а высокая дисперсность создает угрозу загрязнения окрестностей установки и попадания в грунтовые воды.

В отличие от методов сжигания покрышек, методы, рассматривающие покрышки как материальный ресурс, представляются более экологически безопасными вследствие сохранения потенциально экологически опасных компонентов покрышек в капсулированном виде внутри нового продукта. Однако для экономически эффективной переработки покрышек необходимо получать продукт, удовлетворяющий двум условиям: наличию обширного и устойчивого рынка и ценой, способной покрыть операционные затраты. С этой позиции наиболее перспективным решением представляется переработка покрышек в модификаторы битума и битумоподобные материалы [20]. Действительно, цена битума на рынке составляет 30–32 руб./кг. Операционные затраты на извлечение металлокорда и дробление покрышек составляют 10–15 руб./кг, дополнительные затраты на реакционный пиролиз требуют 5–8 руб./кг, что позволяет надеяться на экономическую целесообразность данного решения.

Таким образом, задача по полной утилизации полимерной фракции ТКО (за исключением ПВХ) может быть решена переработкой не утилизируемых в настоящее время потоков в жидкое бескислородное топливо. Отработанные покрышки как композиционный материал, содержащий помимо полимеров, неорганические компоненты, предложено перерабатывать после извлечения металлокорда и измельчения в битумоподобный материал для дальнейшего использования в асфальтобетоне. Предлагаемые технологические решения утилизации полимеров ТКО могут быть экономически эффективными при минимизации воздействия полимерных отходов на окружающую среду.

### Список литературы

1. Тенденции и закономерности изменения норм накопления, состава и свойств ТБО / Г.В. Ильиных, Ю.В. Завизион, Н.Н. Слюсарь, В.Н. Коротаев // Экология и промышленность России. – 2013. – № 10. – С. 22–25. DOI: 10.18412/1816-0395-2013-10-22-25
2. Применение синхронного термического анализа для оценки стабильности захороненных на полигонах твердых коммунальных отходов / Ю.В. Завизион, И.С. Глушанкова, Н.Н. Слюсарь, Я.И. Вайсман // Экология и промышленность России. – 2016. – № 20(6). – С. 43–49. DOI: 10.18412/1816-0395-2016-6-43-49
3. Пугина В.К., Пугин К.Г. Геоэкологическая оценка использования полимерных отходов в производстве различных строительных материалов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2021. – № 1. – С. 63–69. DOI: 10.15593/24111678/2021.01.08
4. The RDF/SRF torrefaction: An effect of temperature on characterization of the product – Carbonized Refuse Derived Fuel / A. Białowiec, J. Pulka, P. Stępień, P. Manczarski, J. Gołaszewski // Waste Management. – 2017. – Vol. 70. – P. 91–100. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.09.020
5. Sever Akdağ A., Atımtay A., Sanin F.D. Comparison of fuel value and combustion characteristics of two different RDF samples // Waste Management. – 2016. – Vol. 47. – P. 217–224. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.08.037
6. Сагадеев Е.В., Сагадеев В.В. Расчет теплот сгорания предельных углеводородов, входящих в энергетические топлива // Теплофизика высоких температур. – 2002. – Т. 40, № 4. – С. 581–585.
7. 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
8. Plant Biomass Conversion to Vehicle Liquid Fuel as a Path to Sustainability / A. Ketov, N. Sliusar, A. Tsybina, I. Ketov, S. Chudinov, M. Krasnovskikh, V. Bosnic // Resources. – 2022. – Vol. 11 (8). – P. 75. DOI: 10.3390/resources11080075
9. Progress in used tyres management in the European Union: A review / M. Sienkiewicz, J. Kucinska-Lipka, H. Janik, A. Balas // Waste Management. – 2012. – Vol. 32(10). – P. 1742–1751. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.05.010

10. Lamas W. de Q., Palau J.C.F., Camargo J.R. de. Waste materials co-processing in cement industry: Ecological efficiency of waste reuse // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – Vol. 19. – P. 200–207. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.015
11. 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
12. Current Progress in Waste Tire Rubber Devulcanization / R. Saputra, R. Walvekar, M. Khalid, N.M. Mubarak, M. Sillanpää // *Chemosphere*. – 2020. – 129033. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129033
13. Crumb Rubber as a Secondary Raw Material from Waste Rubber: A Short Review of End-Of-Life Mechanical Processing Methods / V. Lapkovskis, V. Mironovs, A. Kasperovich, V. Myadelets, D. Goljandin // *Recycling*. – 2020. – Vol. 5(4). – P. 32. DOI: 10.3390/recycling5040032
14. Karagiannidis A., Kasampalis T. Resource recovery from end-of-life tyres in Greece: a field survey, state-of-art and trends // *Waste Management & Research*. – 2009. – Vol. 28(6). – P. 520–532. DOI: 10.1177/0734242x09341073
15. Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis / S. Schiavoni, F. D'Alessandro, F. Bianchi, F. Asdrubali // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 62. – P. 988–1011. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.045
16. Environmentally friendly polymer-rubber composites obtained from waste tyres: A review / M. Sienkiewicz, H. Janik, K. Borzędowska-Labuda, J. Kucińska-Lipka // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 147. – P. 560–571. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.01.121
17. Markl E., Lackner M. Devulcanization Technologies for Recycling of Tire-Derived Rubber: A Review // *Materials*. – 2020. – Vol. 13(5). – P. 1246. DOI: 10.3390/ma13051246
18. Rubber waste management: A review on methods, mechanism, and prospects / H. Chittella, L.W. Yoon, S. Ramarad, Z.W. Laic // *Polymer Degradation and Stability*. – 2021. – Vol. 194. – P. 109761. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109761
19. Утилизация пневматических и безвоздушных шин / З.А. Кострова, А.В. Михеев, М.Е. Бушуева, В.В. Беляков, С.Н. Митяков // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексева*. – 2016. – № 3(114). – С. 120–130.
20. Перспективные направления получения битумоподобных материалов на основе отходов синтетических полимеров / В.Б. Босник, Я.И. Вайсман, А.А. Кетов, М.П. Красновских, Л.В. Рудакова // *Экология и промышленность России*. – 2020. – Т. 24, № 5. – С. 34–39.

#### References

1. Ilyinykh G.V., Zavizion Yu.V., Slyusar N.N., Korotayev V.N. Trends and Legitimacies of Rate of Accumulation's Variation, Composition and Properties of SMW. *Ecology and Industry of Russia*. 2013, 10, pp. 22-25. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2013-10-22-25>
2. Zavizion Yu.V., Glushankova I.S., Sliusar N.N., Vaisman Y.I. The Use of Simultaneous Thermal Analysis to Assess the Stability of Landfilled Municipal Solid Waste. *Ecology and Industry of Russia*. 2016, 6, pp. 43-49. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-6-43-49>
3. Pugina V.K., Pugin K.G. Geoekologicheskaya otsenka ispol'zovaniya polimernykh otkhodov v proizvodstve razlichnykh stroitel'nykh materialov [Geoecological assessment of the use of polymer waste in the production of various building materials] *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*, 2021, no. 1, pp. 63-69. DOI 10.15593/24111678/2021.01.08
4. Białowiec A., Pulka J., Stępień P., Manczarski P., Gołaszewski J. The RDF/SRF torrefaction: An effect of temperature on characterization of the product – Carbonized Refuse Derived Fuel, *Waste Management*, 2017, 70, pp. 91–100. doi:10.1016/j.wasman.2017.09.020
5. Sever Akdağ A., Atımtay A., Sanin F. D. Comparison of fuel value and combustion characteristics of two different RDF samples, *Waste Management*, 2016, 47, pp. 217–224. doi:10.1016/j.wasman.2015.08.037
6. Sagadeev E. V., Sagadeev V. V. Raschet teplot sgoraniya predel'nykh uglevodorodov, vkhodyashchikh v energeticheskie topliva [Calculation of heat of combustion of limit hydrocarbons included in power fuels] *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2002, vol.40, no. 4, pp. 581-585.
7. Ketov A., Korotayev 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>

8. Ketov A, Sliusar N., Tsybina A., Ketov I., Chudinov S., Krasnovskikh M. Bosnic V. Plant Biomass Conversion to Vehicle Liquid Fuel as a Path to Sustainability, *Resources*, 2022, 11 (8), 75. <https://doi.org/10.3390/resources11080075>
9. Sienkiewicz M., Kucinska-Lipka J., Janik H., Balas A. Progress in used tyres management in the European Union: A review, *Waste Management*, 2012, 32(10), pp. 1742–1751. doi:10.1016/j.wasman.2012.05.010
10. Lamas W. de Q., Palau J. C. F., Camargo J. R. de. Waste materials co-processing in cement industry: Ecological efficiency of waste reuse, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 19, pp. 200–207. doi:10.1016/j.rser.2012.11.015
11. 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. doi:10.3390/resources8020113
12. Saputra R., Walvekar R., Khalid M., Mubarak N. M., Sillanpää M.. Current Progress in Waste Tire Rubber Devulcanization, *Chemosphere*, 2020, 129033. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.129033
13. Lapkovskis V., Mironovs V., Kasperovich A., Myadelets V., Goljandin D. Crumb Rubber as a Secondary Raw Material from Waste Rubber: A Short Review of End-Of-Life Mechanical Processing Methods, *Recycling*, 2020, 5(4), 32. <https://doi.org/10.3390/recycling5040032>
14. Karagiannidis A., Kasampalis T. Resource recovery from end-of-life tyres in Greece: a field survey, state-of-art and trends, *Waste Management & Research*, 2009, 28(6), pp. 520–532. doi:10.1177/0734242x09341073
15. Schiavoni S., D'Alessandro F., Bianchi F., Asdrubali F. Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62, pp. 988–1011. doi:10.1016/j.rser.2016.05.045
16. Sienkiewicz M., Janik H., Borzędowska-Labuda K., Kucińska-Lipka J. Environmentally friendly polymer-rubber composites obtained from waste tyres: A review, *Journal of Cleaner Production*, 2017, 147, pp. 560–571. doi:10.1016/j.jclepro.2017.01.121
17. Markl E., Lackner M. Devulcanization Technologies for Recycling of Tire-Derived Rubber: A Review, *Materials*, 2020, 13(5), 1246. doi:10.3390/ma13051246
18. Chittella H., Yoon L.W., Ramarad S., Laic Z.W. Rubber waste management: A review on methods, mechanism, and prospects, *Polymer Degradation and Stability*, 2021, Vol. 194, 109761. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109761>
19. Kostrova Z.A., Mikheev A.V., Bushueva M.E., Belyakov V.V., Mityakov S.N. Utilizatsiya pnevmaticheskikh i bezvozdushnykh shin [Disposal of pneumatic and airless tyres] *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2016, no. 3, pp. 120-130.
20. Bosnic V., Vaisman Y., Ketov A., Krasnovskikh M., Rudakova L. Promising Areas for Producing Bitumen-like Materials Based on Synthetic Polymers Waste. *Ecology and Industry of Russia*, 2020, 5, pp. 34-39. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-5-34-39>

#### Об авторе

**Чудинов Сергей Юрьевич** (Пермь, Россия) – директор ООО «Буматика» (Россия, 614065, г. Пермь, ул. Промышленная, 110, e-mail: office@bumatika.ru).

#### About the author

**Sergey Yu. Chudinov** (Perm, Russian Federation) – director Bumatica Ltd (110, Promishlennaya str., Perm, 614065, Russian Federation, e-mail: office@bumatika.ru).

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад автора.** 100 %.

Поступила: 28.11.2022

Одобрена: 11.12.2022

Принята к публикации: 01.03.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Чудинов, С.Ю. Технико-экономическая оценка технологических путей переработки полимерных отходов / С.Ю. Чудинов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2023. – № 1. – С. 26–33. DOI: 10.15593/24111678/2023.01.04

Please cite this article in English as: Chudinov S.I. Technical and economic assessment of technological ways for processing polymer waste. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2023, no. 1, pp. 26-33. DOI: 10.15593/24111678/2023.01.04