

DOI 10.15593/2409-5125/2018.04.02

УДК 504.06+661.18

Р.И. Хоперский, А.В. Бондаренко

Липецкий государственный технический университет

**СРЕДТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПИРОЛИЗ
ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ КАК СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ
ОТОПИТЕЛЬНОГО ГАЗА ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ**

Применяемые при изготовлении различных бытовых предметов, от упаковки до электроники, полимерные материалы стали неотъемлемой частью нашей повседневной жизни. Это привело к значительному росту количества полимерных изделий в составе твердых коммунальных отходов (ТКО). На сегодняшний день только малая доля их перерабатывается во вторичные материалы (по разным данным, около 1–5 %), а основная масса отправляется на захоронение, что наносит ущерб окружающей среде. Отсортировать пригодное для вторичной переработки сырье на свалке – практически невыполнимая задача из-за высокой степени загрязнения, поэтому важным вопросом является создание эффективных методов переработки полимерсодержащих отходов и уменьшение в значительной степени полигонного захоронения необезвреженных ТКО. В статье проанализированы основные особенности обращения с твердыми коммунальными отходами в России. На базе мусоросортировочной станции г. Липецка исследован морфологический состав остаточной части ТКО после сортировки. На основе полученных данных авторами предложена технология производства твердого топлива из отходов методом термопрессования, где в качестве связующего компонента используется полимерная составляющая ТКО. В настоящей работе также рассмотрена возможность использования высококалорийного газа, полученного в результате пиролиза твердого топлива на основе ТКО, в качестве альтернативного энергоносителя для обогрева печей обжига цементного клинкера. Для увеличения выхода пиролизного газа предложено использовать доступный катализатор процесса и исследовано влияние дозировки катализатора на количество и качество продукта.

Ключевые слова: обращение с ТКО, твердое топливо из отходов, пиролиз, отходы полимеров, цементная печь.

Особенности обращения с твердыми коммунальными отходами в России. Ежегодный рост объема твердых коммунальных отходов (ТКО) требует применения технологий, которые позволят добиться минимизации негативного воздействия на природу, снизить экономические затраты на пе-

Хоперский Р.И., Бондаренко А.В. Среднетемпературный пиролиз твердых коммунальных отходов как способ получения отопительного газа для промышленных печей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2018. – № 4. – С. 17–30. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.04.02

Xhoperskij R., Bondarenko A. Medium temperature pyrolysis of municipal solid waste as a method of gas production for industrial furnaces. PNRPU. Applied ecology. Urban development. 2018. No. 4. Pp. 17-30. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.04.02

переработку и в то же время использовать высокий энергетический потенциал горючих фракций ТКО. Мировая тенденция в области обращения с отходами городского хозяйства заключается в полном отказе от полигонного захоронения необезвреженных отходов и увеличении доли термической утилизации с последующим использованием в промышленности полученной тепловой энергии [1]. Особые требования к сортировке ТКО обусловлены сложным морфологическим составом коммунальных отходов, которые включают в себя горючие материалы (полимеры, бумага, картон, дерево, ветошь), балластную негорючую часть (стеклобой, керамика, камни), а также высокотоксичные загрязнители (ртутьсодержащие лампы, аккумуляторные батареи, хлорсодержащие материалы).

Сегодня перспективным направлением является производство альтернативных видов твердого топлива (ТТО – твердое топливо из отходов, или АТ – альтернативное топливо, в зарубежных публикациях используется аббревиатура RDF – Refuse Derived Fuel), которые получают после удаления негорючих и опасных фракций коммунальных отходов. В таком случае ТТО является готовым видом топлива с достаточно высокой теплотой сгорания (15–25 МДж/кг) и может использоваться как основной или дополнительный источник тепловой энергии в промышленных ТЭЦ и на предприятиях с высоким энергопотреблением.

Применение в России энергетической утилизации ТКО на энергоемких предприятиях идет крайне низкими темпами, что связано с особенностями обращения с отходами, характерными для нашей страны. К ним относятся: возможность полигонного захоронения; низкие экологические платежи; упрощенные требования к организации полигонов; наличие относительно дешевых сырьевых энергоресурсов. Все эти факторы приводят к некачественной утилизации ТКО.

За последние несколько десятилетий в составе ТКО резко увеличилось содержание различных видов пластмасс и полимеров, которые непригодны для вторичной переработки, однако они представляют собой перспективное сырье для технологии пиролиза с получением высококалорийного отопительного газа [2]. Также экономическая привлекательность технологии пиролиза обусловлена отсутствием в России системного механизма по отдельному сбору мусора, что приводит к образованию сложносортируемой смеси полимерных и органических отходов, горючих и балластных материалов. Такая смесь не подлежит вторичной переработке и требует значительных затрат на обезвреживание и захоронение. Использование газообразных продуктов пиролиза органической части ТКО позволит уменьшить затраты на традиционное топливо предприятий, со-

кратить площадь полигонов и, в случае контактного обогрева, исключит образование золы, ухудшающей показатели товарного продукта.

Любые термические способы утилизации требуют соблюдения жестких стандартов, регламентирующих выброс загрязняющих веществ в окружающую среду, накладывают серьезные ограничения на выбор производства для использования технологии пиролиза ТКО. Ряд исследований [3–5] показывают, что печи обжига цементного клинкера являются наиболее перспективными агрегатами для апробации данной технологии. Наличие высоких температур и развитого турбулентного режима в зоне горения позволяет добиться снижения выхода таких высокотоксичных загрязнителей, как полихлордибензодиоксины и полихлордibenзофураны, на 99,99 % [3, 6]. Производители цемента заинтересованы в использовании альтернативных источников энергии, так как это позволит им снизить расходы на дорожающее углеводородное топливо. Прямое сжигание ТТО приводит к необходимости конструктивных изменений в существующем оборудовании, нарушению технологического режима работы при подаче твердого топлива в печь, а также ухудшению качества цементного клинкера за счет высокого содержания в золе ТКО некоторых оксидов металлов (Fe_2O_3 , MgO , MnO , SiO_2 и др.) и прочих соединений.

Для решения данной проблемы авторы настоящих исследований предлагают использовать горючий газ, полученный в результате пиролиза органической части «хвостов» ТКО – остаточной фракции отходов после сепарации на мусоросортировочной станции. Пиролиз в сравнении со сжиганием имеет ряд преимуществ:

- более высокая энергетическая и экономическая ценность продуктов;
- возможность регулирования выхода твердых или газообразных продуктов за счет изменения условий пиролиза;
- подача пиролизного газа через горячий торец печи вместе с основным топливом и воздухом.

Выполненные расчеты показывают, что такая технология позволит сократить затраты на природный газ до 30 %, а высокая теплота сгорания (около 40–50 МДж/м³) обеспечит заданную температуру в зоне горения. Расположение установки пиролиза на территории цементного завода поможет в значительной степени уменьшить затраты на транспортировку и хранение топлива, при этом недостатки, которые характерны для регламента при загрузке твердого топлива, в данном случае отсутствуют. Образовавшиеся жидкие продукты пиролиза совместно с твердым остатком обеспечат обогрев самой установки, что позволит поддерживать ее непрерывную автономную работу и увеличить экономический эффект утилизации ТКО.

Цель и методы исследований. Настоящие исследования проведены с целью изучения термической деструкции полимерных отходов – компонентов сложносортируемой смеси ТКО, оценки состава и энергетического потенциала продуктов пиролиза, определения технологических параметров производства ТТО, а также технологических условий, обеспечивающих преимущественный выход газообразных продуктов пиролиза альтернативного топлива и их высокую теплоту сгорания. В работе изучен пиролиз товарных изделий в качестве прототипов компонентов ТКО из таких полимеров, как полиэтилентерефталат (ПЭТ), полиэтилен низкого давления (ПНД), полиэтилен высокого давления (ПВД), полипропилен (ПП).

Пиролиз проводили в реакторе, который представляет собой металлическую реторту диаметром 50 мм и длиной 210 мм, помещенную в трубчатую печь с регулируемым электрообогревом. В реактор загружали навеску массой 30 г, предварительно из реторты вытесняли воздух продувкой аргоном. Серия предварительных экспериментов позволила выбрать температуру и скорость нагрева, оптимальную с точки зрения выхода неконденсирующихся газообразных продуктов. Температура процесса составляла (450 ± 5) °С, скорость нагрева 12 град/мин. Выделившиеся продукты пиролиза поступали сначала в холодильник, где собирался конденсат, а далее – в газометр, где и определяли объем выделившегося газа. Отбор пирогаза для анализа производился по окончании процесса. Подробно лабораторная установка описана в работе [7].

Состав выделившегося в результате пиролиза горючего газа определяли газохроматографическим методом на хроматографе «Кристалл 2000М». Анализ проводили на двух колонках – насадочной, заполненной цеолитом СаА, длиной 3 м, диаметром 2 мм (детектор – по теплопроводности) и капиллярной Zebron (ZB-1) длиной 60 м, диаметром 0,25 мм (тип детектора – пламенно-ионизационный). Расход газа-носителя (гелий) – 18 мл/мин, расход водорода – 25 мл/мин, воздуха – 250 мл/мин, температура колонки 40–220 °С (скорость нагрева 10 °С/мин), температура детектора 250 °С, испарителя – 200 °С. Для расчета использовали поправочные коэффициенты по ГОСТ 14920–79.

Фактором, смещающим деструкцию в сторону образования газообразных продуктов, является использование каталитически активных материалов. Известно, что доступными катализаторами процесса термической деструкции органической части отходов могут служить некоторые природные алюмосиликаты, обладающие адсорбционными и каталитическими свойствами [8, 9]. Среди прочих доступных глинистых минералов наилучшие сорбционные и каталитические свойства проявляет бентонитовая глина, в состав которой входит минерал монтмориллонит (ММ) [10]. По-

этому авторы в качестве добавки к альтернативному топливу использовали ММ, выделенный из образца бентонитовой глины месторождения «Десятый хутор» (Хакасия), фракция менее 0,005 мм [11].

Химический состав образца бентонитовой глины, мас. %

| | | | |
|--------------------------------|-------|-------------------------------|------|
| Fe _{общ} | 1,83 | MnO | 0,03 |
| FeO | 0,29 | S | 0,08 |
| Fe ₂ O ₃ | 2,29 | C | 0,25 |
| SiO ₂ | 62,40 | P ₂ O ₅ | 0,18 |
| Al ₂ O ₃ | 16,80 | K ₂ O | 1,78 |
| CaO | 2,02 | Na ₂ O | 1,83 |
| MgO | 2,14 | П.п.п. | 9,80 |
| TiO | 0,71 | | |

При изучении пиролиза полимерной фракции ТКО количество монтмориллонита в навеске варьировалось от 0 до 10 мас. %. Влияние каталитически активной добавки на пиролиз полимерных материалов оценивалось по объему выделившихся продуктов, по величине концентрации углеводородов в газовых смесях и теплоте сгорания горючих газов.

Для изучения пиролиза альтернативного топлива из многокомпонентного ТКО была использована остаточная часть твердых коммунальных отходов после сортировки на мусороперерабатывающем предприятии г. Липецка, изучен ее морфологический состав и предложена технология получения топливных брикетов. Также апробирована каталитически активная добавка ММ в условиях пиролиза многокомпонентного топлива.

Результаты исследований и их обсуждение. Опыт функционирования мусоросортировочной станции показывает, что основное количество (более 90 %) пластмасс в отходах составляют фракции, которые можно укрупненно разделить на четыре группы: изделия из полипропилена (ПП), полиэтилена (низкого (ПНД) и высокого давления – ПВД) и полиэтилентерафталата (ПЭТ). Последний представляет интерес для вторичной утилизации (ПЭТ-бутылки), однако загрязненные ПЭТ-материалы также попадают в «хвосты» на захоронение.

Хлорсодержащие полимеры, в основном ПВХ, отбираются на предварительной стадии сортировки как негабаритные отходы стройматериалов. Более того, необходимо тщательное удаление данного вида отходов ввиду высокой токсичности хлорорганических соединений, образующихся в процессе термической переработки [12, 13].

Исходя из этих обстоятельств, изучался пиролиз товарных изделий из четырех видов полимеров: ПП – упаковочная тара, лотки, контейнеры; ПЭТ-бутылки; ПНД – одноразовая посуда; ПВД – тара для бытовой химии

и др. Выбор изделий контролировался соответствующей международной маркировкой ISO 1043-1:2011. Ввиду того, что целевым направлением в предлагаемой авторами технологии является получение высококалорийного пиролизного газа и увеличение его выхода при уменьшении конденсирующихся продуктов, был исследован пиролиз индивидуальных материалов, а также пиролиз в присутствии ММ в количестве 3, 5, 8 и 10 мас. %. Влияние используемого катализатора на выход продуктов пиролиза полимерных материалов показано на рис. 1.

Экспериментальное исследование процесса пиролиза товарных изделий из полимеров подтверждает перспективность данного способа переработки и показывает неоднозначное влияние монтмориллонита на количество выделившихся продуктов. Для всех видов полимеров выход газа составил менее 20 мас. %, а выход конденсирующихся жидких продуктов находится в интервале 40–70 мас. %. Твердый остаток в незначительных количествах образуется из полипропилена, но для ПВД и ПЭТ составляет 40 и 50 % от исходной массы. Этот результат требует дополнительного рассмотрения, так как наблюдается при использовании в качестве сырья товарных продуктов и компонентов ТКО из этих полимеров, но существенно снижается при использовании кондиционного полимерного сырья. Вероятное объяснение такого явления – добавление наполнителей, в том числе минеральных, в процессе изготовления изделий. Высокое количество жидких продуктов, которые также обладают значительным энергетическим потенциалом, ставит вопрос о совместном их сжигании с пиролизным газом, но это требует дополнительного изучения, как с точки зрения аппаратурного оформления процесса, так и промышленной безопасности.

Применение ММ позволяет повысить выход газа для большинства полимеров и снизить количество жидких продуктов, однако с увеличением его дозировки в образце наблюдается повышение выхода твердых продуктов пиролиза. Наиболее существенное увеличение газа и жидких продуктов наблюдается при дозировке ММ до 5 мас. %, а затем, при дальнейшем увеличении массового содержания ММ, значения выхода продуктов стабилизируются для ПВД, ПНД и ПЭТ. Очевидно, что использование дозировки ММ более 5 мас. % в ТКО нецелесообразно.

Другим эффектом использования ММ являлось изменение состава пиролизного газа в сторону образования органических продуктов с более высокой теплотой сгорания. Газохроматографическое определение состава газа позволило проанализировать изменение содержания по следующим компонентам: пропан, метан, этилен + этан, бутан, бензол, спирты, пентан, гексан, соединения C_5-C_6 (рис. 2).

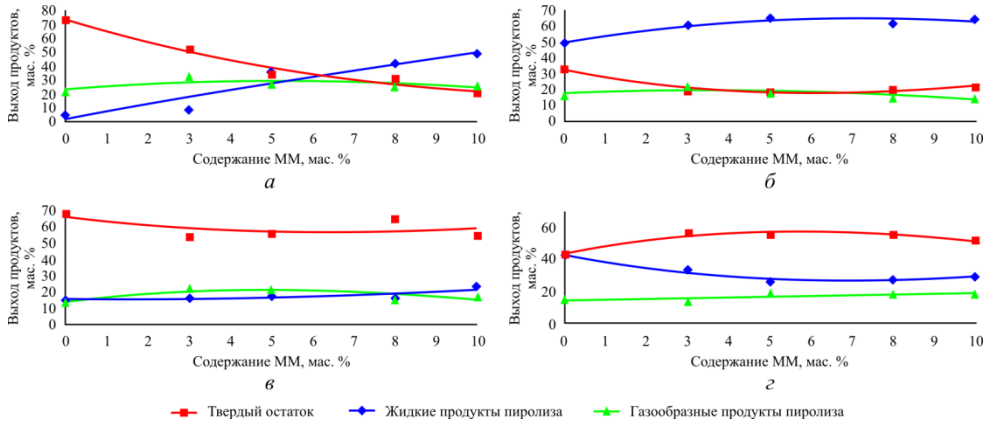


Рис. 1. Влияние содержания ММ на выход продуктов пиролиза отходов из различных полимеров: *а* – пиролиз ПП; *б* – пиролиз ПЭТ; *в* – пиролиз ПНД; *г* – пиролиз ПВД

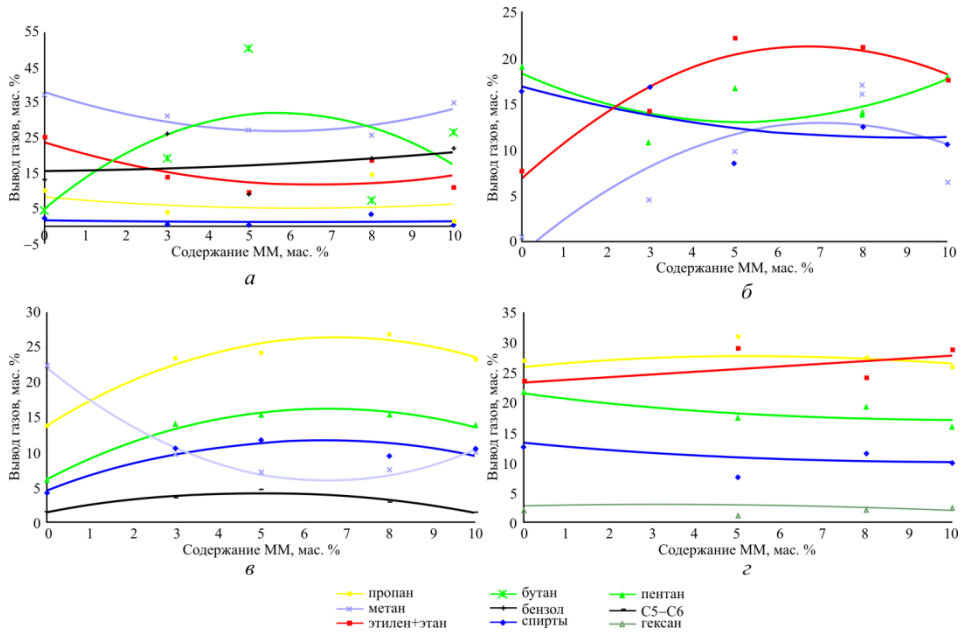


Рис. 2. Влияние содержания ММ на состав пиролизного газа пластиковых отходов из следующих полимеров: *а* – ПЭТ; *б* – ПП; *в* – ПНД; *г* – ПВД

Для большинства полимерных фракций наблюдается увеличение непредельных углеводородов, кислородсодержащих компонентов и соединений группы C₄ и выше, что способствует повышению теплоты сгорания пирогаза. Исходя из состава выделившегося газа рассчитана его низшая теплота сгорания (табл. 1).

Таблица 1

Низшая теплота сгорания пиролизного газа пластиковых отходов
при различной дозировке ММ

| Полимер | Низшая теплота сгорания, кДж/м ³ , при дозировке ММ, мас. % | | | | |
|---------|--|---------|---------|---------|---------|
| | 0 | 3 | 5 | 8 | 10 |
| ПП | 80 316 | 74 082 | 86 266 | 70 280 | 81 644 |
| ПЭТ | 53 997 | 59 398 | 67 095 | 63 198 | 60 210 |
| ПНД | 169 677 | 159 308 | 162 902 | 147 972 | 161 654 |
| ПВД | 80 984 | 84 748 | 83 351 | 75 678 | 75 737 |

Эти данные подтверждают оптимальную дозировку ММ 5 мас. %, так как все полимеры, кроме полиэтилена низкого давления, показали рост теплоты сгорания газа при совместном пиролизе. Для полиэтилена высокого давления наивысших значений теплота сгорания достигала при содержании ММ 3–5 мас. %, а для всех остальных полимеров – при 5 мас. %.

Теплота сгорания пиролизного газа полимеров изменяется в интервале от 54 МДж/м³ для ПЭТ до 170 МДж/м³ у ПНД, что позволяет отнести полученный пиролизный газ к топливу с высоким энергопотенциалом. Однако при переработке «хвостов» ТКО значение теплоты сгорания ожидаемо снизится из-за присутствия компонентов с более низким потенциалом, а также балластной части топлива. Для того чтобы оценить реальное значение энергетического потенциала продуктов пиролиза ТКО, проведен морфологический анализ остаточной части ТКО после сортировки на мусоросортировочной станции г. Липецка. Морфологический анализ показал следующий фракционный состав (мас. %): полимерные материалы – около 19, целлюлозосодержащие компоненты – 19, текстиль – 8,5, дерево – 1,5, металл – 1, а также прочее (пищевые отходы, стеклобой, керамика, камни, уличный смет, листья и др.) – около 51. На основе полученных результатов составлена модельная среда из компонентов, отобранных при изучении морфологии, но обеспечивающая постоянный усредненный состав ТКО:

| Компонент ТКО | Модельный состав ТКО, мас. % |
|---|------------------------------|
| Упаковочный материал из полиэтилена | 9 |
| Пакеты и одноразовая посуда из полипропилена | 4 |
| Бумага и картон | 19 |
| Текстиль | 8 |
| Упаковочный пластик (с металлизированным покрытием) | 7 |
| Металл | 1 |
| Дерево | 2 |
| Прочие (сложносортируемая смесь пищевых отходов, песка, уличного смёта, мелкого мусора и др.) | 50 |
| <i>Итого</i> | 100 |

Система утилизации хвостов ТКО в виде пиролизного газа подразумевает проведение процесса непосредственно на промышленных предприятиях, поэтому, чтобы избежать превращения промпредприятия в филиал полигона для хранения ТКО, предлагается использование специально подготовленного топлива. Согласно исследованиям, полимерные фракции составляют около 19 % от сухой массы отходов, что позволяет использовать их в качестве связующего для брикетирования, которое уменьшит влагоемкость сырья, остановит или замедлит биodeградацию, обеспечит дезодорирование. Процесс получения брикетов из «хвостов» ТКО включает технологические стадии, представленные на рис. 3 [14].

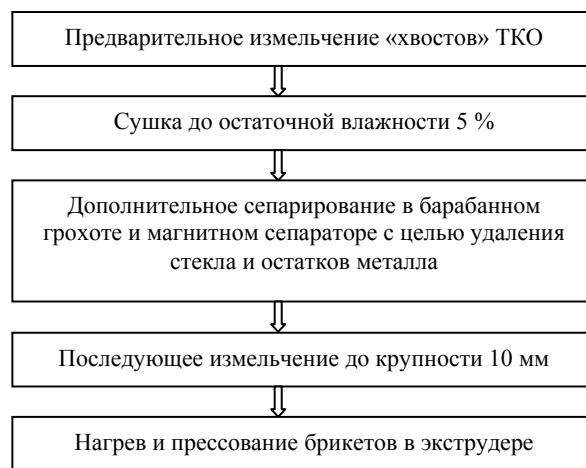


Рис. 3. Производство ТТО

В результате, за счет усреднения измельченного сырья достигается высокая однородность состава альтернативного твердого топлива, значительно возрастает теплота сгорания при удалении балластных компонентов. При этом брикеты имеют низкую влажность и адсорбционную влагоемкость, высокую плотность, отсутствуют процессы гниения, что увеличивает сроки хранения, а содержание опасных составляющих в топливе может быть строго проконтролировано до допустимых норм. Экспериментальное определение теплоты сгорания топливных брикетов, полученных из модельного ТКО в лабораторных условиях, проведено ВНИИ метрологии имени Д.И. Менделеева. Среднее значение теплоты сгорания составило 30,7 МДж/кг.

По предложенной схеме подготовлены брикеты из модельного состава ТКО без ММ и с добавлением 5 мас. % монтмориллонита. Проведен пиролиз каждого образца в трех повторах, результаты которого (табл. 2)

показали, что выход твердых продуктов практически одинаков. Однако выход газа при добавлении ММ увеличивается с 9 до 15 мас. % за счет уменьшения сконденсировавшихся продуктов. Состав газа, определенный методом газоадсорбционной хроматографии, представлен в табл. 3. По компонентному составу рассчитана низшая теплота сгорания газа. Использование ММ приводит к уменьшению содержания метана, но увеличивает содержание этана, пропана, соединений C_5 и выше. Такое изменение состава приводит к повышению низшей теплоты сгорания с 56 до 65 МДж/м³, т.е. применение ММ повысило теплоту сгорания на 16 %.

Таблица 2

Материальный баланс пиролиза ТГО

| Параметр | Содержание ММ, мас. % | |
|---|-----------------------|-------|
| | Без добавления | 5 |
| Масса твердых продуктов, мас. % | 70,78 | 71,35 |
| Масса сконденсировавшихся продуктов, мас. % | 18,12 | 13,93 |
| Масса выделившихся газов, мас. % | 8,93 | 15,38 |
| Невязка, % | 2,17 | -0,67 |

Таблица 3

Состав газа выделившегося в результате термической деструкции ТГО

| Компонент газа | Массовая концентрация, мас. % | | Низшая теплота сгорания компонента с учетом его содержания в газе, кДж/м ³ | |
|-----------------|-------------------------------|--------|---|--------|
| | Без добавления ММ | ММ 5 % | Без добавления ММ | ММ 5 % |
| Метан | 31,15 | 21,49 | 18 000 | 14 945 |
| Этилен | 15,12 | 11,60 | 8577 | 7583 |
| Этан | 10,59 | 13,45 | 6051 | 8856 |
| Пропан | 16,30 | 20,38 | 9088 | 13 098 |
| Бутан | 3,60 | 1,48 | 1981 | 936 |
| Пентан | 4,08 | 10,11 | 2223 | 6352 |
| Бензол | 2,70 | 2,18 | 1306 | 1211 |
| C_5-C_6 | 2,96 | 3,80 | 1581 | 2338 |
| Спирты | 9,09 | 7,92 | 5830 | 5856 |
| Гексан | 0,94 | 1,99 | 503 | 1224 |
| C_7 и выше | 1,21 | 3,71 | 585 | 2073 |
| Водород | 0,05 | 0,04 | 64 | 62 |
| СО | 1,81 | 1,25 | 220 | 175 |
| СО ₂ | 0,39 | 0,61 | – | – |
| <i>Всего</i> | 100,00 | 100,00 | 56 013 | 64 711 |

Таким образом, данная технология позволяет получать пиролизный газ с высоким энергетическим потенциалом и снижать количество ТКО, предназначенных для полигонного захоронения, т.е. возможно получение экономического эффекта за счет уменьшения использования кондиционного топливного газа, сокращения расходов на использование земельных ресурсов и последующее обслуживание полигонов. Особо следует отметить, что в расчетах экономической эффективности использования пиролиза твердого топлива из коммунальных отходов не учитывается ущерб, который приносит периодическое возгорание полигонов, содержащих значительное количество токсичных материалов, а также отсроченное негативное воздействие на окружающую среду, которое нанесет деструкция полимеров при длительном захоронении. В сравнении с вышеперечисленными статьями финансовые затраты на переоборудование действующих производственных линий представляются менее значимыми. Низкая экономическая заинтересованность использования ТТО объясняется в том числе и тем, что предприятия – потребители газа должны взять на себя основные расходы по внедрению технологии, при этом сокращение государственного и/или муниципального финансирования переработки ТКО за счет снижения объема захораниваемых отходов никак не отразится на финансовом положении предприятия. Поэтому решение проблемы энергетической утилизации ТКО для отопления промышленных печей требует не только технологической проработки, но и предоставления субсидий предприятиям, реализующим данные технологии. Пока такие решения не принимаются, внедрение альтернативных источников энергии на промышленных предприятиях страны идет низкими темпами.

В заключение необходимо подчеркнуть некоторые положения, резюмирующие проведенные исследования:

1) в настоящее время морфологический состав ТКО претерпел существенные изменения в сторону увеличения пластиковых отходов; после сортировки ТКО количество полимерных материалов составляет около 19 мас. %, а общее количество горючих фракций достигает 40 мас. %, что делает экономически оправданным изготовление твердого топлива из отходов (ТТО);

2) авторами предложена технология изготовления высокопрочных однородных топливных брикетов из «хвостов» ТКО с низкой адсорбционной влажностью;

3) печи обжига цементного клинкера являются наиболее оптимальными для апробации применения пиролизного газа из ТТО, так как, во-первых, высокое энергопотребление процесса требует замены части природного газа; во-вторых, состав среды и гидродинамические режимы по-

тока в печи предотвращают образование высокотоксичных загрязнителей и, в-третьих, использование пиролизного газа, в отличие от прямого сжигания ТТО, не оказывает негативного влияния на качество конечного продукта. Проведение процесса при оптимальных значениях температуры и скорости нагрева, а также использование ММ в качестве катализатора приводит к увеличению выхода и теплоты сгорания пиролизного газа, что обеспечит экономическую привлекательность технологии;

4) апробация технологии на модельном ТКО, составленном из компонентов «хвостов», которые были отобраны на мусоросортировочной станции г. Липецка, показала, что в реальных условиях можно получить до 15 мас. % газа на тонну «хвостов» с теплотой сгорания примерно 56 МДж/м³, прочие продукты можно использовать для обогрева установки поддержания автономного режима работы;

5) внедрение использования энергетического потенциала ТКО требует принятия регулирующих решений государственных органов, которые повысят экономическую заинтересованность предприятий – потенциальных потребителей ТТО.

В настоящее время продолжается разработка технологии энергетической утилизации ТКО и конструирование мобильной установки пиролиза альтернативного твердого топлива для промышленных печей.

Библиографический список

1. Municipal Waste Treatment 2016. Конфедерации европейских заводов по обращению с отходами (Confederation of European waste management plants): офиц. сайт. – URL: <http://www.cewep.eu/2018/07/05/municipal-waste-treatment-2016> (дата обращения: 04.07.2018).
2. Хоперский Р.И., Бондаренко А.В. Исследование морфологического состава и энергетического потенциала «хвостов» ТБО комплекса по переработке твердых бытовых отходов «ЭкоПром-Липецк» // Рецилинг, переработка отходов и чистые технологии: сб. материалов 8-й Междунар. науч.-практ. конф.; Ин-т ГИНЦВЕТМЕТ. – М., 2012. – С. 55–58.
3. Ivshin V.P., Polushin R.V. Dioxin and dioxin-like compounds: paths of formation, properties and methods of degradation: Monograph / Mari State University. – Yoshkar-Ola, 2005. – 320 p.
4. Lee V.K.C., Cheung W.H., McKay G. PCDD/PCDF reduction by the co-combustion process // Chemosphere. – 2008. – Vol. 70. – P. 682–688.
5. Mc Kay G. Dioxin characterisation, formation and minimization during municipal solid waste (MSW) incineration: review // Chemical Engineering Journal. – 2002. – Vol. 86. – P. 343–368.
6. Федоров Л.А. Диоксины как экологическая опасность: ретроспектива и перспективы: монография. – М.: Наука, 1993. – 266 с.
7. Изучение продуктов пиролиза твердых бытовых отходов, подлежащих полигонному захоронению / Р.И. Хоперский, В.В. Левкина, М.В. Конев, О.Н. Чмырева, А.В. Бондаренко // Экология ЦЧОРФ. – 2012. – № 1 (28). – С. 35–43.
8. Pyrolysis of aseptic packages (tetrapak) in a laboratory screw type reactor and secondary thermal/catalytic tar decomposition / J. Haydari [et al.] // Waste Management. – 2013. – № 33. – P. 1136–1141.
9. Косивцов Ю.Ю. Низкотемпературный каталитический пиролиз органического сырья: дис. ... канд. техн. наук; Тверь. гос. университет. – Тверь, 2011. – 162 с.

10. Тарасевич Ю.И. Структура и химия поверхности слоистых силикатов. – Киев: Наукова думка, 1988. – 246 с.
11. Иванова А.В., Михайлова Н.А. Технологические испытания глин: метод. указания к лаборатор. работам / УГТУ–УПИ. – Екатеринбург, 2005. – 41 с.
12. Будников Г.К. Диоксины и родственные соединения как экотоксиканты // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 26. – С. 38–44.
13. Ившин В.П., Полушин Р.В. Диоксины и диоксиноподобные соединения: пути образования, свойства, способы деструкции. – Йошкар-Ола: Изд-во МарГУ, 2005. – 320 с.
14. Хоперский Р.И., Бондаренко А.В. Производство топливных брикетов из ТБО – эффективный метод снижения экологической нагрузки городов // Наша общая окружающая среда: сб. тез. докл. XIV науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов, студентов и школьников г. Липецка; г. Липецк, 24 апреля 2013 г. – Липецк, 2013. – С. 59–60.

References

1. Municipal Waste Treatment 2016. Confederation of European waste management plants, available at: <http://www.cewep.eu/2018/07/05/municipal-waste-treatment-2016/> (accessed 04 July 2018).
2. Hoperskij R.I., Bondarenko A.V. Issledovanie morfologicheskogo sostava i ehnergeticheskogo potentsiala «hvorostov TBO» kompleksa po pererabotke tvorydyh bytovykh othodov «EkoProm-Lipetsk» [The study of the morphological composition and energy potential of MSW at the waste recycling enterprise "EcoProm-Lipetsk"]. Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Recikling, pererabotka othodov i chistye tekhnologii». Moscow: FGUP «Institut GINCVETMET», 2012, pp. 55-58.
3. Ivshin V.P., Polushin R.V. Dioxin and dioxin-like compounds: paths of formation, properties and methods of degradation: Monograph // Mari State University. Yoshkar-ola, 2005, 320 p.
4. Lee V.K.C., Wai-Hung Cheung, Gordon McKay PCDD/PCDF reduction by the co-combustion process. – Chemosphere, 2008, vol. 70, pp. 682–688.
5. G. Mc Kay Dioxin characterisation, formation and minimization during municipal solid waste (MSW) incineration: review. – Chemical Engineering J. 2002, vol. 86, pp. 343-368.
6. Fedorov L.A. Dioxins as a ecological danger: retrospective and perspective. Moscow, Nauka, 1993. 266 p.
7. Khopersky R.I., Levkina V.V., Konev M.V., Chmyreva O.N., Bondarenko A.V. The study of pyrolysis products from MSW, allotted for landfill. *Ecology of the Central Chernozem Region of Russia*. 2012, vol. 1(28), pp. 35-43.
8. J. Haydary et al. Pyrolysis of aseptic packages (tetrapak) in a laboratory screw type reactor and secondary thermal/catalytic tar decomposition. *Waste Management*. 2013, vol. 33, pp. 1136-1141.
9. Kosivcov Yu. Yu. Nizkotemperaturnyj kataliticheskij piroliz organicheskogo syr'ya. Thesis of candidate's degree dissertation: 05.17.04: [Low-temperature catalytic pyrolysis of organic raw materials]. Tver, Tver State Technical University, 2011, 162 p.
10. Tarasevich Yu.I. The structure and surface of layered silicates. Kiev, Naukova dumka, 1988. 246 p.
11. Ivanova A.V., Mihajlova N.A. Tekhnologicheskie ispytaniya glin [Technological tests of clays]. Yekaterinburg, 2005. pp. 32-37.
12. Budnikov H.C. Dioksiny i rodstvennye soedineniya kak ehkotoksikanty [Dioxines and related compounds as ecotoxicants]. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal*, 1997, no 26, pp. 38-44, available at: http://www.pereplet.ru/nauka/Soros/pdf/9708_038.pdf (accessed 04 July 2018).
13. Ivshin V.P., Polushin R.V. Dioksiny i dioksinopodobnye soedineniya: puti obrazovaniya, svoystva, sposoby destruktii [Dioxins and Dioxin-Like Compounds. Paths of Formation, Properties and Methods of Degradation]. Yoshkar-Ola: Mari State University, 2005, 320 p.
14. Khopersky R.I., Bondarenko A.V. Proizvodstvo toplivnykh briketov iz TBO – ehffektivnyj metod snizheniya ehkologicheskoy nagruzki gorodov [Environmental safety of refused derived fuel burning in industrial furnaces]. Materialy XIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Nasha obshchaya okruzhayushchaya sreda». Lipetsk: LEGI, 2013, pp. 59-60.

R. Khoperskij, A. Bondarenko

MEDIUM TEMPERATURE PYROLYSIS OF MUNICIPAL SOLID WASTE AS A METHOD OF GAS PRODUCTION FOR INDUSTRIAL FURNACES

Polymer materials, which are used for manufacturing various household objects from package to electronic devices, have become an integral part of our everyday's life. It has led to a significant growth of the number of polymer products as a part of the municipal solid waste. Today only a small part of them is being recycled into secondary materials (about 1.5–2.0 %), and the main part is being landfilled, seriously damaging the environment. Because of a high level of pollution, sorting out recyclable materials from a dump is almost impossible. Therefore it is important to create effective methods for recycling waste that contains polymers and to reduce the amount of untreated MSW disposed on landfills. In this article, the main issues of handling MSW in Russia were analyzed. By the example of a waste sorting station in Lipetsk morphological composition of a residual part of municipal solid waste after sorting has been analyzed. On the basis of data obtained, the authors have proposed a technology for the production refuse derived fuel by the method of thermal pressing, where the polymer component of MSW is used as a binder. In this research the possibility of using high-calorific gas obtained as a result of RDF pyrolysis, as an alternative energy source in cement kilns is also considered. To increase the yield of pyrolysis gas, it is proposed to use an inexpensive catalyst, and the effect of catalyst dosage on the quantity and quality of pyrolysis products was studied.

Keywords: municipal solid waste management, pyrolysis, RDF, polymer waste, cement kiln.

Бондаренко Антонина Викторовна (Липецк, Россия) – канд. хим. наук, доцент кафедры химии, Липецкий государственный технический университет (398600, г. Липецк, ул. Московская, 30, e-mail: antonina.bondarenko@gmail.com).

Хоперский Руслан Игоревич (Липецк, Россия) – ассистент кафедры химии, Липецкий государственный технический университет (398600, г. Липецк, ул. Московская, 30, e-mail: ruslanleex@mail.ru).

Bondarenko Antonina (Lipetsk, Russian Federation) – Associate Professor of Department of Chemistry, Lipetsk State Technical University (398600, Russia, Lipetsk, Moskovskaya st., 30, e-mail: antonina.bondarenko@gmail.com).

Khoperskij Ruslan (Lipetsk, Russian Federation) – Assistant of the Department of Chemistry, Lipetsk State Technical University (398600, Russia, Lipetsk, Moskovskaya st., 30, e-mail: ruslanleex@mail.ru).