

и олефиновые углеводороды) — 14–18 %, а также коксозольного остатка — 35–37 %, который на 75–80 % состоит из минеральных неорганических соединений.

Результаты проведенных экспериментов показали возможность регенерировать часть отходов путем мягкотермической паровой переработки, однако следует иметь в виду, что товарные битумы содержат известное количество неплавких асфальтенов, от содержания которых зависит температура размягчения мягкой кровли. В режиме отгонки с паром асфальтены частично разрушаются, и получаемый регенерат может служить лишь полупродуктом (на уровне мягких нефтепегонных битумов) для получения кровельного материала.

В коксозольном остатке содержится до 80 % минеральных неорганических соединений, и требуется дальнейшая переработка с целью удаления остаточного углерода, например, методом сверхадиабатического фильтрационного горения.

Испытанные технические решения термолизного реактора — с неподвижным фильтрующим слоем и шнековой системой перемещения материала через внутренний объем реактора — недостаточно эффективны из-за слипания исходного материала, что значительно снижает производительность. Для дальнейших исследований предполагается новая конструкция реактора с ленточной системой транспортировки перерабатываемого материала по типу подвижных колосниковых решеток.

Список используемых источников

1. Паротермолиз резинотехнических отходов с получением энергоэффективного материала / Ложечник А.В. [и др.] // Промышленная экология: тез. докл. науч.-тех. конф., Минск, сентябрь 2012 г. / БНТУ. – Минск, 2012. – С. 40.
2. Шнековый реактор для термолиза резиновых отходов / Ложечник А.В. [и др.] // Тепло- и массообмен – 2012: сб. науч. тр. / Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси. – Минск, 2013. – С. 196–199.

УДК 536.246.2

АЛЬТЕРНАТИВНОЕ ТОПЛИВО ИЗ ОТХОДОВ

*Г. И. Журавский, О. Г. Мартинов, Д. Э. Полесский, Н. С. Шаранда
Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси*

Анализируя развитие технологий термолизной переработки органических материалов и результаты практического использования оборудования для получения топлив из различных видов отходов, можно сделать вывод о том, что в настоящее время данные технологии достигли высокого уровня совершенства и позволяют подвергать термической переработке практически все виды

органических отходов, включая и смешанные отходы, содержащие органические и неорганические составляющие [1–5].

Сложились три направления развития термолизных технологий переработки органических материалов, определяющиеся выбором теплоносителя (газообразный, жидкий, твердый) для осуществления процесса термического разложе-

ния. Наиболее широкое распространение получило направление, связанное с использованием различного рода газообразных теплоносителей (продуктов сгорания топлива, инертных газов, водяного пара и их смесей). Создано значительное количество экспериментальных и опытно-промышленных образцов оборудования для переработки органических материалов широкого компонентного состава с получением жидких и газообразных углеводородов.

Анализ опыта строительства и работы оборудования по термолитической переработке органических отходов выявил ряд недостатков. Исследования продуктов переработки отходов путем их термического разложения показали, что жидкая углеводородная фракция, получаемая в результате термолитической переработки органических отходов, в лучшем случае может быть использована в качестве полуфабриката для производства различных аналогов нефтепродуктов. Применение жидкой фракции термолитической переработки автомобильных шин даже в качестве аналога мазута М-100 или аналога печного топлива не представляется возможным из-за ряда присущих ей качественных показателей, например, данная фракция не соответствует требованиям по температуре вспышки в закрытом тигле. Так, например, в зависимости от состава сырья и степени его термического разложения, значение температуры вспышки жидкой фракции вместо требуемого для мазута (жидких видов топлива) значения, равного не менее 92 °С, будет находиться за счет легких компонентов в пределах до 45 °С. Такую фракцию можно использовать в зимний период лишь как разбавитель мазута в объеме до 5 %.

Твердые продукты можно применять в качестве инертных добавок в строительных материалах, полимерах и некоторых других материалах. Из-за высокого содержания тяжелых металлов (цинка, свинца и др.) твердые продукты термолитической переработки автомобильных шин сами непосредственно не могут быть использованы как топливо (в брикетированном и любом другом виде).

В Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси выполнен комплекс исследований по определению физико-химических показателей продуктов термолитической переработки различных видов органических отходов и обоснованию наиболее перспективных направлений практического применения данных продуктов, например получения на их основе топлив.

В настоящей работе рассмотрено получение жидких и газообразных топлив из продуктов тер-

молитической переработки автомобильных шин. Необходимо отметить, что все элементы этого процесса могут быть применены для создания технологий получения топлив из продуктов термолитической переработки и различных других видов органических отходов (древесных, полимерных, сельскохозяйственных).

Одной из инженерных задач при разработке оборудования для термолитической переработки отходов является определение количественных показателей выхода продуктов термического разложения и, в том числе, их удельной теплоты сгорания. В результате экспериментов по термолитической переработке различного рода органических отходов разработана методика расчета выхода и удельной теплоты сгорания жидких, газообразных и твердых продуктов термического разложения отходов. Рассмотрим данную методику на примере термолитической переработки автомобильных шин.

Согласно экспериментальным данным, выход продуктов при термическом разложении автомобильных шин в среде перегретого водяного пара составляет: горючий газ — 8–12 %; жидкая фракция — 35–45 %; твердые продукты — 35–50 %; металлический лом — 8–12 %. Рассмотрим процесс термолитической переработки на основании законов сохранения массы

$$M_g + M_f + M_s = 1 \quad (1)$$

и энергии

$$M_g q_g + M_f q_f + M_s q_s = q_T + q_r = q_{\Sigma}, \quad (2)$$

где M_g — количество выделяющегося неконденсирующегося газа (кг/кг исходного продукта); M_f — количество выделяющихся жидких продуктов (кг/кг); M_s — количество твердых продуктов (кг/кг); q_g — удельная теплота сгорания неконденсирующихся газов; q_f — удельная теплота сгорания жидких продуктов; q_s — удельная теплота сгорания твердых продуктов (без металлического корда); q_T — удельная скрытая теплота термолитической переработки резины (не более 600 кДж/кг); q_r — удельная теплота сгорания автомобильных шин (без металлического корда), кДж/кг; q_{Σ} — суммарная энергия (сумма скрытой теплоты термолитической переработки и удельной теплоты сгорания резины).

При образовании продуктов термолитической переработки, а именно жидких и газообразных, между составляющими их химическими элементами образуются новые связи, иные по сравнению с исходной резиной. Разница между совокупными энергиями связей в исходной резине и в продуктах термолитической переработки выступает в роли скрытой теплоты. Этим и объясняется парадоксальность процесса термолитической переработки, заключающаяся в начальном выделении теплоты,

а затем в ее поглощении от внешних источников нагрева с последующим образованием конечных продуктов, даже более калорийных, чем исходное вещество.

Несмотря на то, что величина теплоты термоллиза $q_T = 600$ кДж/кг (0,6 МДж/кг) является малой по сравнению с $q_r = 36$ МДж/кг и составляет $(0,6/36) \cdot 100\% = 1,67\%$, она должна учитываться в балансе энергии (2), как дополнительная энергия к энергии, содержащейся в исходной резине (изношенных шин). Для замыкания системы уравнений введем отношение количества жидких продуктов к количеству твердых $\beta = M_f/M_s$. Как установлено на основе экспериментальных данных при термоллизе изношенных шин, β изменяется в пределах 0,7–1,0. Для других видов отходов пределы изменения этой величины будут иные, но в диапазоне от 0 до 1.

Решением данной системы уравнений будут соотношения для расчета выхода продуктов термоллиза:

$$M_g = \frac{q_\Sigma - \frac{\beta}{1+\beta} \left(\frac{q_s}{\beta} + q_f \right)}{q_g - \frac{\beta}{1+\beta} \left(\frac{q_s}{\beta} + q_f \right)}; \quad (3)$$

$$M_f = \frac{\beta}{1+\beta} - \frac{\beta}{1+\beta} \left[\frac{q_\Sigma - \frac{\beta}{1+\beta} \left(\frac{q_s}{\beta} + q_f \right)}{q_g - \frac{\beta}{1+\beta} \left(\frac{q_s}{\beta} + q_f \right)} \right]; \quad (4)$$

$$M_s = \frac{1}{1+\beta} - \frac{1}{1+\beta} \left[\frac{q_\Sigma - \frac{\beta}{1+\beta} \left(\frac{q_s}{\beta} + q_f \right)}{q_g - \frac{\beta}{1+\beta} \left(\frac{q_s}{\beta} + q_f \right)} \right]. \quad (5)$$

В уравнении (1) не учитывается металлический корд (шины без металлокорда). В шинах с металлокордом (при учете металлического корда) уравнение (1) примет вид

$$M_g + M_f + M_s + M_m = 1, \quad (6)$$

где M_m — количество металлического лома в изношенных шин (кг/кг).

В этом случае в приведенных выше решениях (4) и (5) появится коэффициент $(1 - M_m)$.

$$M_f = \frac{(1 - M_m)\beta}{1+\beta} - \frac{\beta}{1+\beta} \left[\frac{q_\Sigma - \frac{\beta}{1+\beta} \left(\frac{q_s}{\beta} + q_f \right)}{q_g - \frac{\beta}{1+\beta} \left(\frac{q_s}{\beta} + q_f \right)} \right]; \quad (7)$$

$$M_s = \frac{(1 - M_m)}{1+\beta} - \frac{\beta}{1+\beta} \left[\frac{q_\Sigma - \frac{\beta}{1+\beta} \left(\frac{q_s}{\beta} + q_f \right)}{q_g - \frac{\beta}{1+\beta} \left(\frac{q_s}{\beta} + q_f \right)} \right]. \quad (8)$$

Рассмотрим следующий вариант. По данным компании «Альфа Рецикляж» (Франция) удельная теплота сгорания неконденсирующегося газа составляет $q_g \approx 30$ МДж/кг. Определим, какой будет выход продуктов в этом случае при условиях

$$q_\Sigma = q_T + q_r = 36,6 \text{ МДж/кг};$$

$$q_s = 34 \text{ МДж/кг};$$

$$q_f = 42 \text{ МДж/кг};$$

$$\beta = 35/40 = 0,875;$$

$$M_m = 0,1 \text{ кг}.$$

Из расчетов следует, что выход горючего неконденсирующегося газа с удельной теплотой сгорания 30 МДж/кг составляет 14,7%; жидкой фракции с удельной теплотой сгорания 42 МДж/кг — 35,2%, твердых продуктов — 40,1%, выход металлического корда — 10%. Сравнение расчетных данных с экспериментальными показывает, что погрешность не превышает 1%.

На фото 1 показана шнековая установка для термоллиза измельченных изношенных шин с получением жидкого топлива и твердого углеродного остатка. Установка разработана и изготовлена ООО «Модум – Техно» (г. Минск) по заказу компании «Альфа Рецикляж». С использованием данной установки получены продукты (жидкие и твердые) термоллиза изношенных шин, которые исследовались для определения физико-химических показателей и возможности практического применения их в качестве топлив, или компонентов топлив. Полученные с использованием данной установки экспериментальные данные по выходу продуктов с погрешностью не более 1% совпадают с расчетными величинами, что подтверждает корректность принятых допущений при получении соотношений (7, 8).

Таким образом, приведенные выше соотношения могут быть использованы как для расчета количественных показателей выхода продуктов термоллиза отходов, так и для определения их удельной теплоты сгорания.

Вследствие высокого содержания компонентов с низкой температурой вспышки получаемые из отходов путем термоллиза жидкие углеводоро-

ды также имеют низкую температуру вспышки в закрытом тигле. При выпаривании части легких фракций температура вспышки жидких углеводородов, как показали эксперименты, увеличивалась. В состав экспериментальной установки входил стеклянный сосуд, размещенный в емкости с водой, установленной на электрическом нагревателе, позволяющем плавно регулировать количество подводимой тепловой энергии. Величина значения подводимой энергии определялась расчетным путем на основании измеренных значений величины тока и напряжения с поправкой на тепловые потери. Температура жидкости измерялась посредством термометра, а ее масса — весами.

Эксперименты проводились следующим образом. Сосуд с определенным количеством залитой в него жидкости (100 г) устанавливался в емкость с предварительно нагретой до 100 °С водой. По изменению температуры жидкости в сосуде фиксировался момент времени выхода на стационарный режим (при 100 °С). Затем при этой температуре сосуд с жидкостью выдерживался в течение 2–3 часов. Далее сосуд снимали с нагревателя и производили взвешивание. Количество испарившейся жидкости определялось как разность между исходным и остаточным количеством жидкости.

Результаты экспериментального исследования процесса испарения жидких углеводородов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Скорость испарения жидких углеводородов в зависимости от температуры жидкости

Температура жидкости, °С	40	50	60	70	80	90
Скорость испарения, г/(м ² ·с)	0,8	0,95	1,05	1,10	1,30	1,42

У полученных при разных температурах выдержки исходной жидкости проб температура вспышки определялась стандартным методом.

В табл. 2 представлены экспериментальные данные зависимости температуры вспышки от количества испарившихся углеводородов.

Таблица 2

Зависимость температуры вспышки от количества испарившихся углеводородов

Количество испарившихся углеводородов, % масс.	3	5	8	18
Температура вспышки, °С	37	39	50	80



Фото 1. Шнековая установка термоллиза резиновых отходов:

1 — реактор термоллиза; 2 — система конденсации продуктов термоллиза; 3 — оборудование разделения жидких продуктов; 4 — топка для сжигания газов термоллиза; 5 — пульт управления

Данные табл. 2 указывают на рост температуры вспышки в зависимости от количества испарившихся углеводородов. При этом необходимо отметить корреляцию температуры вспышки с температурой нагрева жидких углеводородов. В отдельных случаях при длительной выдержке (10–12 часов) температура вспышки жидких углеводородов практически равнялась температуре (82–85 °С), при которой жидкость выдерживалась в сосуде.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о возможности получения жидких углеводородов с заданной температурой вспышки посредством смешивания определенных фракций в требуемом количественном соотношении.

Одной из проблем термолитической переработки отходов является наличие в продуктах непредельных углеводородов и серы. Предлагаемый технологический вариант решения данной проблемы представлен на рис. 1. При этом для полу-

чения газа, содержащего восстановительные компоненты (СО и Н₂), применяется газогенератор с использованием в качестве топлива твердых продуктов термолитической переработки.

В реактор 1 из емкости 16 через кран 17 подают жидкую фракцию и создают слой 2, в который из емкости 5 через решетку 3 подают газ, регулируя его расход краном 4. В емкость 5 газ закачивают с помощью компрессора 6, который подключен к газогенератору 7.

В газогенераторе 7 из бункера 8 постоянно загружают твердые продукты термолитической переработки отходов. Температуру в реакторе 1 контролируют по показаниям датчика 9. Подвод тепла в газогенератор 7 осуществляют через рубашку 10, в которую подают продукты сгорания из горелки 11, выводимые далее в дымовую трубу 15. От парогенератора 13 через кран 12 в газогенератор в необходимом количестве подают водяной пар, необходимый для получения водяного газа (смесь СО и Н₂О).

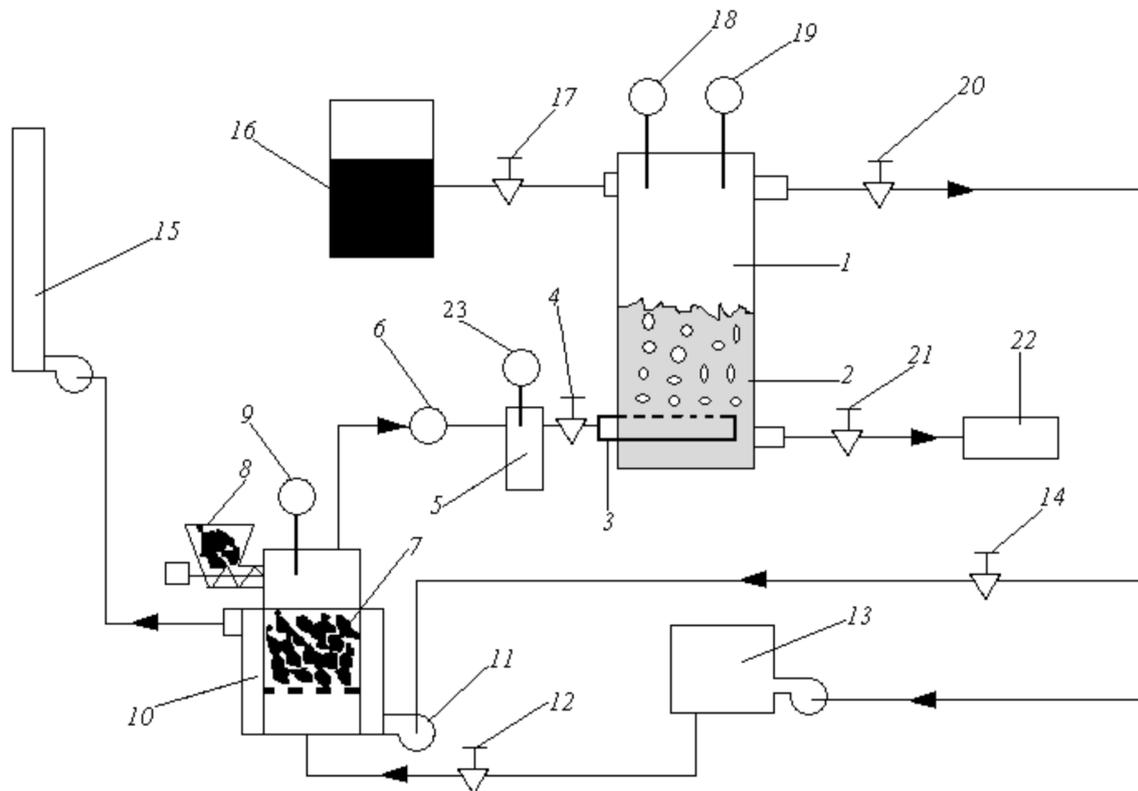


Рис. 1. Технологическая схема очистки жидкой фракции термолитической переработки шин от серы и непредельных углеводородов:

- 1 — реактор; 2 — жидкая фракция; 3 — барботер; 4 — кран; 5 — емкость с газом; 6 — компрессор; 7 — газогенератор; 8 — бункер со шнеком; 9 — датчик температуры; 10 — нагревательная рубашка; 11 — горелка; 12 — кран; 13 — парогенератор; 14 — кран; 15 — дымовая труба; 16 — емкость с жидкой фракцией термолитической переработки отходов; 17 — кран; 18 — датчик температуры; 19 — датчик давления; 20 — кран; 21 — кран; 22 — емкость-накопитель для обработанной жидкой фазы; 23 — датчик давления

В качестве топлива для работы горелки *II* используются выводимые из реактора *I* через краны *14* и *20* пары легких углеводородов. Температуру и давление в реакторе *I* контролируют по показаниям датчиков *18* и *19*. При барботаже водяного газа через слой жидкости

в реакторе *I* разрушаются непредельные соединения и снижается содержание серы (образуется H_2S). Обработанную таким образом жидкость через кран *21* выводят в накопитель *22*. Давление газа в емкости *5* контролируют по показаниям датчика *23*.

Список использованных источников

1. Паровой термолиз органических отходов / Д.В. Аристархов [и др.]. – Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2001.
2. Железная, Т.А., Гелетуха, Г.Г. Современные технологии получения жидкого топлива из биомассы быстрым пиролизом. Обзор. Часть 1 / Т.А. Железная, Г.Г. Гелетуха // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 27, № 4. – С. 91–100.
3. Железная Т. А., Гелетуха Г. Г. Современные технологии получения жидкого топлива из биомассы быстрым пиролизом. Обзор. Часть 2 // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 27. – № 5. – С. 79–90.
4. Rubber: Types, Properties and Uses / Н. Zhuravski [etc.] // Nova Science Publishers. – 2011. – 670 p.
5. Аристархов, Д.В., Журавский, Г.И. Технологии и оборудование для переработки резинотехнических отходов / Д.В. Аристархов, Г.И. Журавский // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Germany. – 2012. – 124 с.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ КОРОБКА ПЕРЕДАЧ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ

О.С. Руктешель, В.А. Кусяк, С.А. Сидоров

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Развитие электроники и создание микропроцессоров нового поколения, появление высокоскоростных коммуникационных бортовых сетей и разработка стандартов ISO по передаче данных между встроенными электронными модулями дали мощный толчок к созданию и внедрению на автотранспортные средства высокоэффективных мехатронных систем управления силовым агрегатом.

Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является разработка автоматизированной мехатронной системы управления силовым агрегатом на базе сухого фрикционного сцепления и механической ступенчатой коробки передач.

За рубежом проблеме автоматизации управления силовым агрегатом уделяется огромное внимание. На сегодняшний день над созданием и совершенствованием автоматизированных мехатронных систем работают исследовательские центры ведущих мировых автомобиле-

строительных концернов и специализированных фирм: Daimler-Chrysler (Германия-США), Volvo (Швеция), Scania (Швеция), ZF Friedrichshafen AG (Германия), Eaton (США). Современные АМСУСА Mercedes Telligent, Scania Opticruise, Iveco Euro Tronic automated, Volvo Geartronic, Volvo I-Shift, ZF AS-Tronic, Eaton Fuller Auto/UltraShift серийно устанавливаются на грузовые автомобили, автобусы и автопоезда, улучшая их тягово-скоростные показатели и топливную экономичность [1, 2, 3, 4, 5].

По данным концерна Daimler-Chrysler AG (Германия – США) разработка электронно-диагностической системы Telligent позволила на 3–7 % повысить топливную экономичность грузовых автомобилей нового поколения Mercedes-Benz ACTROS (рис. 1), значительно снизить затраты на их ремонт и обслуживание, а также уменьшить износ силового агрегата.