

УДК 628.475:662.6/.9

Д. В. Сталинский*, д-р техн. наук

А. Л. Скоромный*

А. М. Касимов*, д-р. техн. наук

А. М. Синозацкий**

* Украинский государственный научно-технический центр «Энергосталь»
(г. Харьков, E-mail: energostal@energostal.org.ua)

** ЧНПП «Фантомаш», г. Сарны
(г. Сарны, E-mail: fantom@sowa.com.ua)

МИНИМИЗАЦИЯ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ И ТЕРМОХИМИЧЕСКУЮ ДЕСТРУКЦИЮ ИЗНОШЕННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

Приведены результаты исследований удельных затрат энергии на измельчение и термохимическую деструкцию изношенных автомобильных шин. Поставлена и решена задача минимизации удельных энергозатрат на их измельчение и термохимическую деструкцию.

Наведені результати досліджень питомих витрат енергії на подрібнювання та термохімічну деструкцію зношених автомобільних шин. Поставлена та вирішена задача мінімізації питомих енерговитрат на їх подрібнювання та термохімічну деструкцію.

Введение

Утилизация изношенных автомобильных шин (ИАШ) является одной из важных задач защиты окружающей природной среды [1]. В настоящее время существуют различные технологии утилизации изношенных автомобильных шин, имеющие ограниченные области применения: восстановление шин, производство различных изделий из резиновой крошки, в т. ч. регенерация шинной резины, сжигание. Одним из перспективных методов утилизации ИАШ, исследованием и совершенствованием которого в последние годы занимается все большее количество ученых [2, 3], является термохимическая деструкция (ТХД).

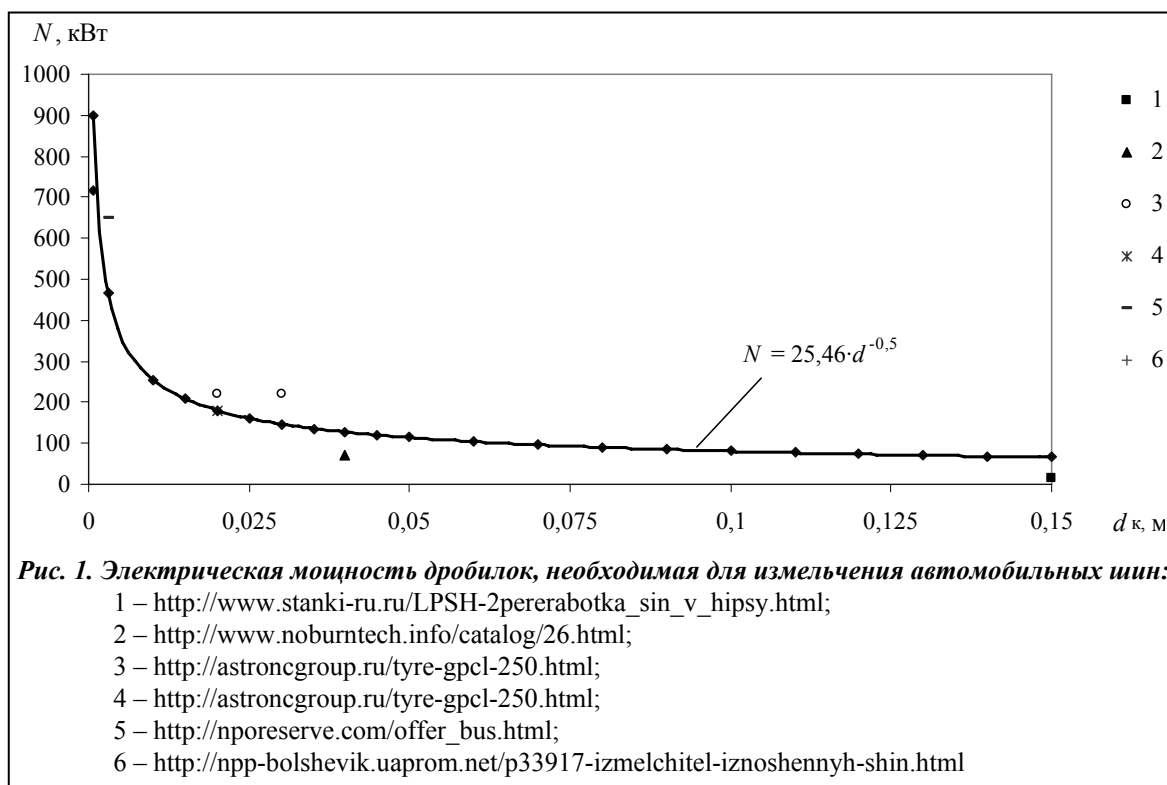
Метод ТХД заключается в разложении шинной резины при одновременном температурном и химическом воздействии с образованием твердого углеродсодержащего остатка и парогазовой смеси углеводородов. В дальнейшем парогазовую смесь углеводородов разделяют на жидкую фракцию, по своему составу и свойствам аналогичную топливу печному бытовому, и топливный газ. Твердый углеродсодержащий остаток, жидкие углеводороды, а также топливный газ используют в качестве альтернативных топливных энергоресурсов [4].

Основная часть

В работе [5] отмечено, что для увеличения экономической привлекательности переработки ИАШ в энергоресурсы целесообразно повышение энергетической эффективности комплексов ТХД. Поэтому данная задача является актуальной.

Цель данной работы – исследовать факторы, влияющие на затраты энергии при переработке ИАШ методом ТХД, и определить рациональные с точки зрения удельной энергоёмкости параметры работы комплексов ТХД.

Переработка ИАШ в альтернативные топливные энергоресурсы в комплексах ТХД включает две основных стадии: измельчение и термохимическую деструкцию. При этом важно отметить, что измельчение шин перед ТХД является неизбежным этапом переработки, поскольку для переработки крупногабаритных шин целиком необходимы реакторы диаметром до 4,5 м, строительство которых связано с большими капитальными затратами, обу-



славливающими отрицательную рентабельность утилизации ИАШ. Кроме того, переработка целых шин требует большего времени для их нагрева до температуры начала разложения.

Рассмотрим затраты энергии на измельчение изношенных автомобильных шин. Эмпирическая формула (1) для расчета мощности электродвигателя дробилок имеет вид [6]

$$N = 0,13 \cdot E_i \cdot K_m \cdot \Pi_m \cdot (\sqrt{i} - 1) / \sqrt{d_n}, \text{ кВт} \quad (1)$$

где E_i – энергетический показатель, зависящий от физико-механических свойств измельчаемого материала при максимальной производительности дробилки, кДж/кг; K_m – коэффициент масштабного фактора, зависящий от начального размера фракций материала, $m^{0,5}$; i – отношение средневзвешенного начального d_n и конечного d_k размера фракций материала; Π_m – производительность, кг/с.

При прочих равных условиях (физико-механические свойства материалов, производительность, начальный размер материала), влияние которых можно выразить в виде обобщающего коэффициента k , максимальная потребляемая электрическая мощность дробилки является функцией (2) средневзвешенного конечного размера кусков материала и имеет вид

$$N = k / \sqrt{d_k}, \text{ кВт} \quad (2)$$

где k – обобщающий коэффициент, $\text{кВт} \cdot m^{0,5}$; d_k – конечный размер кусков материала, м.

На рис. 1 приведены фактические данные мощностей электродвигателей серийно выпускаемых дробилок [7–12] (в пересчете на производительность 1 т/ч) для измельчения автомобильных шин в зависимости от конечных размеров кусков. Кривая N , изображенная на рис. 1, построена по формуле (2), в которой обобщающий коэффициент $k = 25,46 \text{ кВт} \cdot m^{0,5}$ рассчитан исходя из фактической мощности электродвигателя дробилки перерабатывающей ИАШ $N = 180 \text{ кВт}$ до фракции 0,02 м.

Из анализа данных, приведенных на рис. 1, следует, что фактические значения мощности электродвигателей серийно выпускаемых дробилок для измельчения ИАШ хорошо согласуются с расчетными данными при обобщающем коэффициенте $k = 25,46 \text{ кВт} \cdot m^{0,5}$, учитывающем влияние одинаковых физико-механических свойств автомобильных шин, производительностей и начальных размеров шин.

Пересчет мощности электродвигателя в удельные фактические затраты энергии, израсходованной на измельчение изношенных автомобильных шин массой $G = 1$ т за время $\tau_{др} = 1$ час, осуществляется по формуле (3)

$$Q_{др} = \tau_{др} \cdot N = 3,6 \cdot 25,46 \cdot d^{-0,5} = 91,656 \cdot d^{-0,5}, \text{ МДж/т} \quad (3)$$

Рассмотрим затраты энергии (4) на термохимическую деструкцию ИАШ. Для анализа удобно представить количество теплоты, затрачиваемое на разложение шин, в виде четырех слагаемых: затраты энергии на нагрев резины и металлокорда до температуры начала разложения резины, нагрев металлокорда до температуры конца разложения резины и затраты непосредственно на разложение (деструкцию) резины

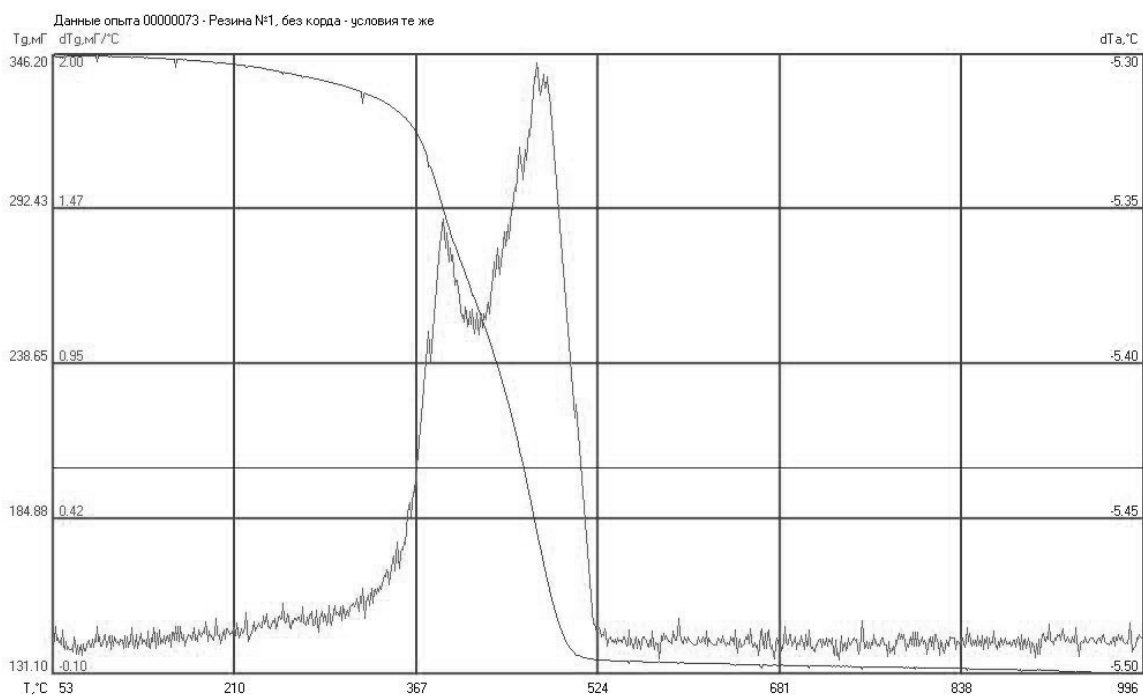
$$Q_{ТХД} = (G_p C_{p_p} (t_{н.р.} - t_{о.с.}) + G_k C_{p_k} (t_{н.р.} - t_{о.с.}) + G_k C_{p_k} (t_{к.р.} - t_{н.р.}) + r_p G_p) \frac{\tau}{3600}, \text{ МДж/т} \quad (4)$$

где G_p – расход резины, кг/ч; C_{p_p} – средняя удельная теплоемкость резины, кДж/(кг·°C); $t_{н.р.}$ – температура начала разложения резины, °C; $t_{о.с.}$ – начальная температура сырья (температура окружающей среды), °C; G_k – расход металлокорда, кг/ч; C_{p_k} – средняя удельная теплоемкость металлокорда, кДж/(кг·°C); $t_{к.р.}$ – температура конца разложения резины, °C; r_p – удельная теплота деструкции резины, кДж/кг; τ – длительность процесса ТХД, с.

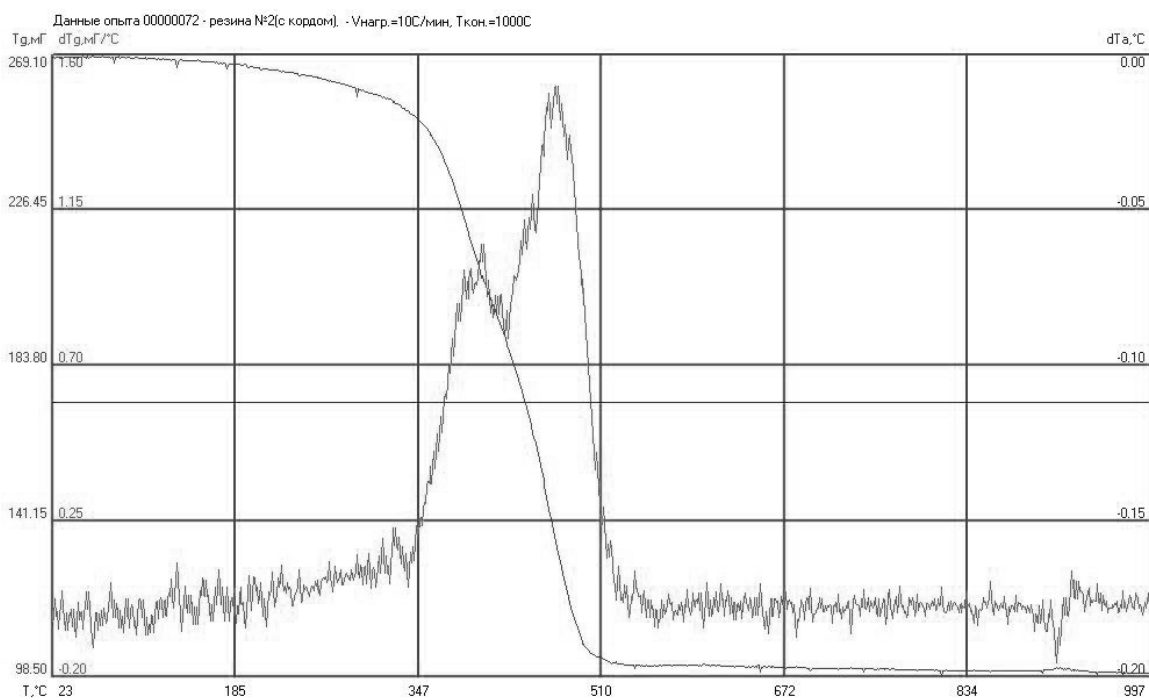
Температуры начала и конца разложения шинной резины, а также удельную теплоту деструкции определили путем термогравиметрических исследований фрагментов автомобильных шин с металлическим и текстильным кордом. Важно отметить, что металлическим кордом в шинах грузовых автомобилей армируют протектор, боковые части и бортовые кольца, а в шинах легковых автомобилей – только бортовые кольца. Протектор и боковые части шин легковых автомобилей армируются текстильным кордом. Термогравиметрические исследования проводили с помощью дериватографа марки Q 1500 (Венгрия) при следующих условиях: конечная температура нагрева 1000 °C; скорость нагрева 10 °C/мин; атмосфера N_2 чистотой 99,9%; скорость потока азота 0,5 дм³/мин. Термограммы фрагментов шин с металлическим и текстильным кордом приведены на рис. 2, из анализа которых следует, что термограммы для шин с металлическим и текстильным кордом носят близкий характер, а разложение ИАШ включает три стадии: нагрев шин, интенсивное разложение, формирование структуры твердого остатка. Результаты обработки термограмм приведены в табл. 1, из которой следует, что при нагреве ИАШ интенсивное термическое разложение шинной резины с текстильным кордом начинается при более низких 285 °C, а заканчивается при более высоких 550 °C температурах, по сравнению с разложением шин с металлическим кордом (310 и 510 °C соответственно). Вследствие деструкции текстильного корда при температурах конца разложения потеря массы шин легковых автомобилей по сравнению с шинами грузовых автомобилей больше на 1,6%.

Таблица 1. Результаты термогравиметрического исследования

Наименование параметра	Изношенные автомобильные шины	
	грузовых автомобилей	легковых автомобилей
Температура начала разложения $t_{н.р.}$, °C	310	285
Температура первого максимума разложения $t_{1м.р.}$, °C	392	400
Температура второго максимума разложения $t_{2м.р.}$, °C	476	471
Температура конца разложения $t_{к.р.}$, °C	510	550
Расстояние между пиками $t_{2макс.} - t_{1макс.}$, °C	84	71
Диапазон температур разложения Δt , °C	200	265
Потеря массы к концу интервала интенсивного разложения, %	60,5	62,05
Удельная теплота деструкции, кДж/кг	52,4	81,5

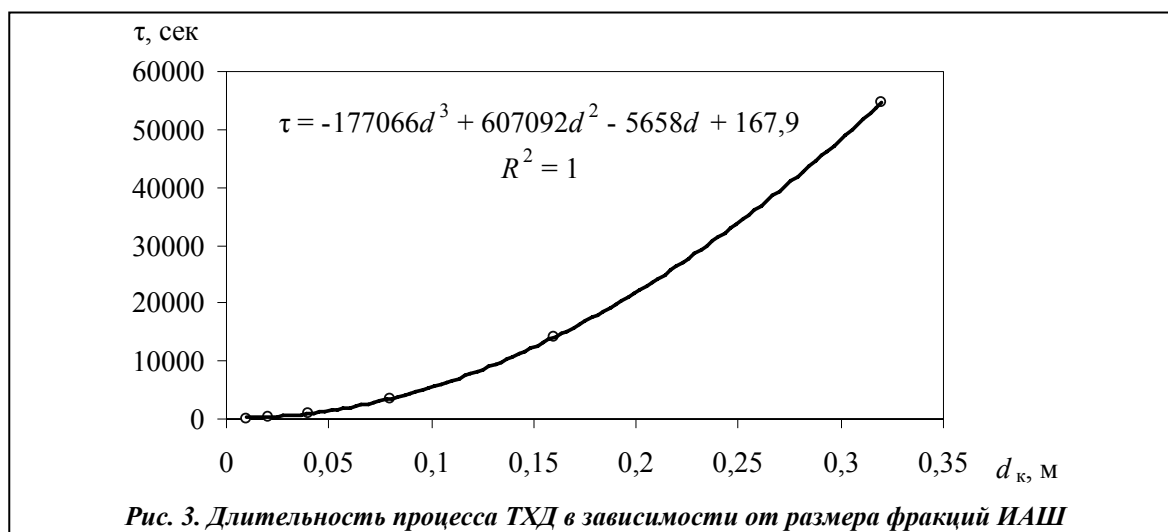


а)



б)

Рис. 2. Термограммы фрагментов резины автомобильных шин:
 а) – грузовых автомобилей (резина с металлическим кордом);
 б) – легковых автомобилей (резина с текстильным кордом)



При интенсивной потере массы наблюдается эндотермический эффект, связанный с деструкцией шинной резины и текстильного корда. Расчет удельной теплоты деструкции шин показал, что данная величина в 1,6 раза больше для шин легковых автомобилей по сравнению с шинами грузовых автомобилей. Это, по-видимому, обусловлено затратами энергии на разложение текстильного корда.

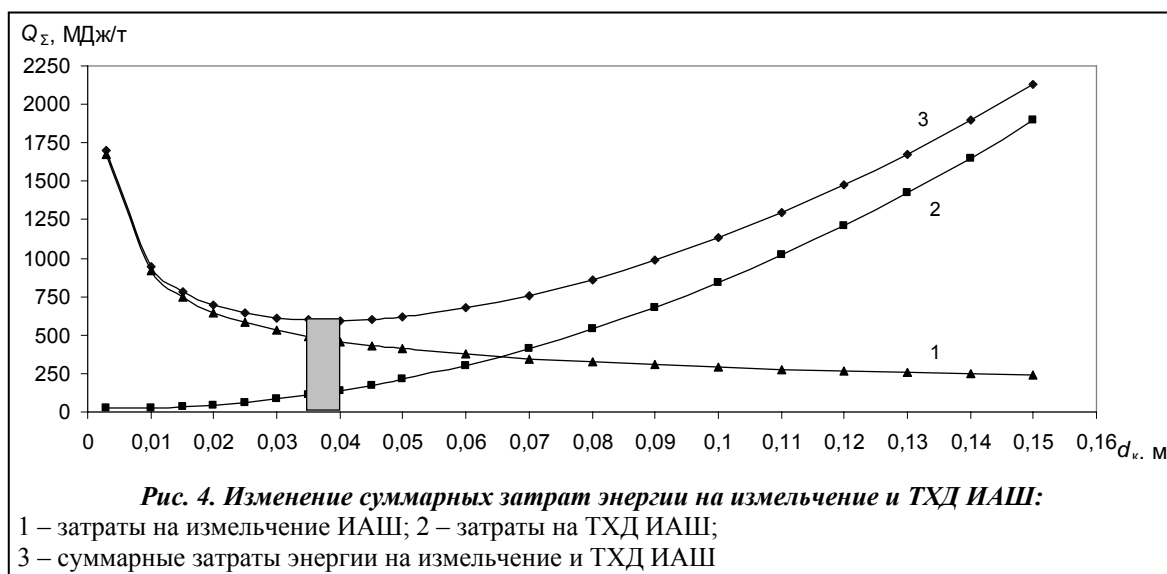
Полученные результаты (табл. 1, рис. 2) термогравиметрических исследований фрагментов шин с металлическим и текстильным кордом целесообразно использовать при расчетах и проектировании комплексов термохимической деструкции ИАШ. В случае отсутствия прогнозных данных о типе перерабатываемых шин целесообразно задаваться следующими исходными данными для проектирования:

- температура начала разложения 285 °С;
- температура конца разложения 550 °С;
- выход твердого углеродсодержащего остатка 39,5% мас;
- выход парогазовых продуктов из реактора 62,0% мас;
- удельная теплота деструкции 81,5 кДж/кг.

Следует отметить, что для определения параметров, гарантирующих необходимую производительность конденсаторов жидких фракций углеводородов и устройства для охлаждения твердого углеродсодержащего остатка, рационально задавать максимальными выход парогазовой смеси углеводородов и твердого углеродсодержащего остатка.

Одной из важных характеристик переработки ИАШ является длительность процесса ТХД. Для определения этой характеристики были проведены экспериментальные исследования процесса ТХД ИАШ на лабораторной установке при температуре в реакторе 600 °С, которую обеспечивали электронагревом. В ходе опытов фиксировали длительность процесса, массу фрагментов шин до и после опытов. С учетом данных термограмм (рис. 2) по выходу твердого остатка, после обработки экспериментальных данных, получили аппроксимирующее уравнение (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 1$) для определения длительности процесса в зависимости от размера фракций ИАШ (рис. 3).

Анализируя выражение (4) и зависимость длительности процесса ТХД от размера фракций ИАШ, приведенную на рис. 3, можно сделать вывод о том, что затраты энергии на процесс ТХД при прочих равных условиях зависят от размера фракций ИАШ. При увеличении размеров фракций ИАШ затраты энергии на их ТХД будут увеличиваться. Выше было отмечено, что затраты энергии на измельчение увеличиваются при уменьшении конечного размера фракций ИАШ. На рис. 4 приведены данные по изменению затрат энергии на измельчение и термохимическую деструкцию, а также суммарные затраты в зависимости от конечного размера фракций ИАШ.



Поиск минимума функции Q_{Σ} графическим путем позволил определить диапазон (выделен цветом на рис. 4) рационального размера фракций ИАШ $d=0,035-0,04$ м, при котором обеспечиваются минимальные суммарные затраты 596-598 МДж/т на измельчение и термохимическую деструкцию.

Полученные данные по рациональному размеру фракций ИАШ целесообразно использовать при проектировании комплексов термохимической деструкции. Минимизация энергозатрат на переработку шин методом ТХД, обеспечиваемая рациональным значением размера фракций ИАШ, позволит уменьшить эксплуатационные затраты и повысить экономическую привлекательность комплексов ТХД ИАШ.

С учетом данных термогравиметрических исследований и содержания металлокорда в шинах легковых и грузовых автомобилей были выполнены расчеты затрат энергии на процесс деструкции ИАШ с размером фракций $d = 0,035$ м и длительностью $\tau = 705$ с, результаты которых приведены в табл. 2.

Таблица 2. Затраты энергии на процесс ТХД ИАШ

Статьи затрат теплоты	Изношенные автомобильные шины			
	для грузовых автомобилей		для легковых автомобилей	
	удельные затраты энергии, МДж/т	% от затрат энергии на ТХД	удельные затраты энергии, МДж/т	% от затрат энергии на ТХД
нагрев резины до температуры начала разложения шинной резины $t_{н.р.}$	79,8	79,1	85,0	79,7
нагрев металлокорда до температуры начала разложения шинной резины $t_{н.р.}$	8,1	8,0	4,1	3,8
нагрев металлокорда до теплоты конца разложения шинной резины $t_{к.р.}$	5,5	5,5	4,1	3,8
разложение шинной резины	7,5	7,4	13,5	12,7
Итого	100,9	100	106,7	100

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что основное количество теплоты (83,5–87,1 %) расходуется на нагрев ИАШ до температуры начала разложения. При этом

на нагрев шинной резины затрачивается 79,1–79,7 % теплоты, а на нагрев металлокорда – всего 3,8–8,0 %. Непосредственно на разложение резины затрачивается 7,4–12,7 % теплоты, а на нагрев металлокорда от температуры начала до температуры конца разложения шинной резины – 3,8–5,5 %. Исходя из этого, дальнейшие исследования целесообразно сконцентрировать на интенсификации нагрева ИАШ до температур начала разложения.

Также важно отметить, что несмотря на большую удельную теплоту деструкции шинной резины, вследствие более низкой температуры начала разложения шин с текстильным кордом и меньшим содержанием металлокорда, сосредоточенном только в бортовых кольцах шин легковых автомобилей, затраты энергии на процесс ТХД для шин легковых и грузовых автомобилей отличаются всего на 5,4 % и в среднем составляют 103,8 МДж/т.

Выводы

1. Проанализировано изменение затрат энергии на измельчение и термохимическую деструкцию изношенных автомобильных шин и установлен основной фактор – размер фракций ИАШ, от которого зависят показатели удельных энергозатрат на измельчение шин и длительности термохимической деструкции.

2. Определена зависимость для расчета фактической потребляемой мощности электродвигателей дробилок при одинаковых физико-механических свойствах изношенных автомобильных шин, производительности дробилок и начального размера ИАШ, влияние которых учитываются обобщающим коэффициентом $k = 25,46 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{0,5}$, рассчитанным в ходе исследований.

3. Выполнены экспериментальные исследования процесса ТХД и термогравиметрические исследования образцов ИАШ, на основе которых разработаны рекомендации по исходным данным для проектирования комплексов термохимической деструкции изношенных автомобильных шин.

4. Поставлена и решена задача минимизации удельных энергозатрат на измельчение и термохимическую деструкцию ИАШ легковых и грузовых автомобилей. Поиск минимума функции Q_{Σ} графическим путем позволил определить диапазон рациональных значений размера фракций ИАШ $d = 0,035\text{--}0,04$ м, при котором обеспечиваются минимальные суммарные затраты энергии 596–598 МДж/т на измельчение и термохимическую деструкцию.

5. Выполнен анализ затрат энергии на нагрев и термохимическую деструкцию шин грузовых и легковых автомобилей, который показал, что основное количество теплоты 83,5–89,2% расходуется на нагрев ИАШ до температур начала разложения. Поэтому дальнейшие исследования целесообразно сконцентрировать на интенсификации нагрева ИАШ до температур начала разложения.

Литература

1. *Твердые бытовые отходы. Технологии, оборудование. Проблемы и решения* / А. М. Касимов, В. Т. Семенов, А. М. Александров, А. М. Коваленко. – Харьков: Харьк. нац. академия городского хозяйства, 2006. – 301 с.
2. *Особенности переработки отходов РТИ в термохимических процессах* / В. А. Лихоманенко, И. В. Цветкова, С. М. Русалин, В. Л. Юшко // Экология и здоровье человека. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов : Сб. науч. статей XV Междунар. науч.-практ. конф.: В 2-х т. Т. 2. – УкрГНТЦ «Энергосталь». – Харьков: Сага, 2007. – С. 395–401.
3. *Сталинский Д. В.* Опытная установка для термохимической деструкции органической части твердых бытовых и производственных отходов / Д. В. Сталинский, А. Л. Скоромный, А. М. Синозацкий // Там же. – 2008. – С. 197–200.
4. *Сталинский Д. В.* Получение альтернативных видов топлива из резиносодержащих отходов / Д. В. Сталинский, А. Л. Скоромный, А. М. Синозацкий // Экология и пром-сть. – 2009. – № 2. – С. 8–12.
5. *Скоромный А. Л.* Снижение энергозатрат на утилизацию изношенных автомобильных шин методом термохимической деструкции // Экология и пром-сть. – 2008. – № 4. – С. 68–71.
6. *Борщев В. Я.* Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы : Учеб. пособ. – Тамбов : Изд-во Тамбов. техн. ун-та, 2004. – 75 с.

7. *Линия* по переработки шин в чипсы ЛПШЧ-1 [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.stanki-ru.ru/LPSH-2pererabotka_sin_v_hipsy.html.
8. *Механическая* переработка шин [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.noburntech.info/catalog/26.html>.
9. *Линия* по переработке шин [Электронный ресурс] // Режим доступа:
10. <http://astroncgroup.ru/tyre-gpcl-250.html>.
11. *Линия* по переработке шин [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://astroncgroup.ru/tyre-recycling.html>.
12. *Предложения* по организации производства по переработке изношенных шин [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://nproreserve.com/offer_bus.html.
13. *Измельчитель* изношенных шин ИШ 560×1500 (ШРЕДЕР), Киев [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://npp-bolshevik.uaprom.net/p33917-izmelchitel-iznoshennyh-shin.html>.

Поступила в редакцию
23.03.10