

circuit is perspective from a point of sight of ecological safety, and enables technically rather simply to process any firm C-containing waste without their preliminary preparation.

УДК 536.246.2

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРОВОГО ТЕРМОЛИЗА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

Г.И. Журавский, А.С. Матвейчук

Одним из видов отходов, которые накапливаются в огромных количествах на территории многих государств, являются отработавшие свой ресурс автомобильные шины, ежегодный мировой прирост которых оценивается в 7 млн. т. (например, США – около 1 млн. 725 тыс. т/год, Россия – 1 млн. т/год, Германия – 450 тыс. т/год, Беларусь – 60 тыс. т/год) [1]. С другой стороны, автомобильные шины представляют собой ценное вторичное сырье, эффективное использование которого позволит не только решить экологические проблемы, но и обеспечит высокую рентабельность перерабатывающих производств. В развитых странах мира прилагаются значительные усилия к разработке экологически чистых технологий и оборудования для переработки шин, основными из которых являются: складирование, сжигание с целью получением энергии, переработка в резиновую крошку и порошки, применение в качестве строительных материалов для различных инженерных сооружений, пиролиз, термическая деструкция в растворителях и др. Но, не смотря на разнообразие методов утилизации, в мире только 23% отработавших шин находят применение, а остальные 77% никак не используются ввиду отсутствия рентабельного способа утилизации, различного компонентного химического состава, механической прочности и биохимической стойкости.

В научном плане технология парового термолитза твердых органических отходов делает первые шаги. Найдены некоторые кинетические закономерности термической деструкции резины в среде перегретого водяного пара; установлено, что термолитз резины является типичным для твердых органических материалов диффузионным процессом, скорость которого лимитируется (ограничивается) скоростью подвода теплоты и скоростью диффузии летучих продуктов деструкции [2]. На основании экспериментальных данных сформулирована физическая модель деструкции, позволяющая рассчитать такие параметры, как температура, время проведения процесса, выход продуктов и др.

Ниже представлен расчет возможности увеличения производительности термокамеры установки паротермической деструкции отходов от 600 до 1000 кг/ч по использованным автомобильным шинам. Дымовые газы вдоль камеры термолитза движутся в трубе кольцевого сечения при наружной теплоизоляции.

Произведем расчет теплоотдачи конвекцией при турбулентном течении дымовых газов. Определим число Нуссельта по формуле:

$$Nu = Nu_{tr} \left[1 - \frac{0,45}{24 + Pr} \right] \cdot \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^{-n} \quad (1)$$

Pr – число Прандтля (для многоатомных газов $Pr = 1$);

d_1 – наружный диаметр внутренней трубы ($d_1 = 1640$ мм);

d_2 – внутренний диаметр наружной трубы ($d_2 = 1820$ мм);

Nu_{tr} – число Нуссельта для круглой трубы:

$$Nu_{tr} = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,4}, \quad (2)$$

Re – число Рейнольдса.

$$Re = \frac{\omega \cdot d_x}{\nu} \quad (3)$$

ω - средняя скорость движения дымовых газов в межтрубном пространстве ($\omega = 10$ м/с);

ν - кинематическая вязкость дымовых газов ($\nu = 174,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с);

d_x - характерный размер трубы кольцевого сечения:

$$d_x = d_2 - d_1 = 1820 - 1640 = 180 \text{ мм.} \quad (4)$$

По формуле (3) определим численное значение числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{10 \cdot 0,18}{174,3 \cdot 10^{-6}} = 10327.$$

Определим поправочный коэффициент n для формулы (1):

$$n = 1 + 7 \cdot \left(\frac{d_2 - 4}{d_1} \right)^{0,6} = 1 + 7 \cdot \left(\frac{1820 - 4}{1640} \right)^{0,6} \approx 1. \quad (5)$$

Подставив полученные численные значения в формулы (2) и (1) получим:

$$Nu_{gr} = 0,021 \cdot (10327)^{0,8} \cdot 1^{0,4} = 34,1,$$

$$Nu = 34,1 \cdot \left[1 - \frac{0,45}{2,4 + 1} \right] \cdot \left(\frac{1640}{1820} \right)^{-1} = 32,9.$$

Определим коэффициент теплопередачи конвекцией:

$$\alpha_g = \frac{Nu \cdot \lambda_g}{d_x} \quad (6)$$

λ_g - коэффициент теплопроводности дымовых газов ($\lambda_g = 10,9 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К)).

Таким образом, по формуле (6) коэффициент теплопередачи будет равен:

$$\alpha_g = \frac{32,9 \cdot 10,9 \cdot 10^{-2}}{0,18} = 19,9 \text{ Вт/м}^2.$$

Произведем расчет теплоотдачи излучением. Определим удельный тепловой поток излучением по формуле:

$$q = C_o \cdot \varepsilon \left[\left(\frac{T_g^c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{c1}^c}{100} \right)^4 \right], \quad (7)$$

T_g^c - средняя температура дымовых газов, $T_g^c = 1000^\circ\text{C}$;

T_{c1}^c - средняя температура стенки камеры термоллиза (при нагреве $T_{c1}^c = 450^\circ\text{C}$,

при термоллизе $T_{c2}^c = 600^\circ\text{C}$);

C_o - излучательная способность абсолютно черного тела ($C_o = 5,67$ Вт/(м²·К⁴))

ε - степень черноты дымовых газов ($\varepsilon = 0,18$).

Полный тепловой поток определяем по формуле:

$$Q = q_1 \cdot F_k \quad (8)$$

F_k – площадь поверхности нагрева камеры термоллиза, определяемая по формуле:

$$F_k = \pi \cdot d_1 \cdot l, \quad (9)$$

l – длина камеры термоллиза ($l = 3,3$ м).

Подставив численные значения в (8) и (9), получим:

- при нагреве: удельный тепловой поток излучением q_1 :

$$q_1 = 5,67 \cdot 0,18 \cdot \left[\left(\frac{1273}{100} \right)^4 - \left(\frac{723}{100} \right)^4 \right] = 24013,3 \text{ Вт.}$$

Полный тепловой поток излучением Q_1 :

$$Q_1 = 24013,3 \cdot 3,14 \cdot 1,64 \cdot 3,3 = 408\,075 \text{ Вт.}$$

Коэффициент теплоотдачи излучением α_1 :

$$\alpha_1 = \frac{q}{T_g^c - T_{cl}^c} = \frac{24013,3}{1000 - 450} = 43,6 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}. \quad (10)$$

- при термоллизе: удельный тепловой поток излучением q_2 :

$$q_2 = 5,67 \cdot 0,18 \cdot \left[\left(\frac{1273}{100} \right)^4 - \left(\frac{873}{100} \right)^4 \right] = 20874 \text{ Вт.}$$

Полный тепловой поток излучением Q_2 :

$$Q_2 = 20874 \cdot 3,14 \cdot 1,64 \cdot 3,3 = 354\,726,5 \text{ Вт.}$$

Коэффициент теплоотдачи излучением α_2 по аналогии с (10):

$$\alpha_2 = \frac{20874}{1000 - 600} = 52,1 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}.$$

Суммарный коэффициент теплоотдачи:

- при нагреве:

$$\alpha_1^c = \alpha_g + \alpha_1 = 19,9 + 43,6 = 63,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}, \quad (11)$$

- при термоллизе:

$$\alpha_1^c = \alpha_k + \alpha_{n2} = 19,9 + 52,1 = 72 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}. \quad (12)$$

Учитывая, что коэффициент теплообмена от водяного пара выше, чем от газа (воздуха) при прочих равных условиях, а также принимая во внимание турбулентность среды, создаваемую струями перегретого водяного пара, можно

принять значение коэффициента теплоотдачи от внутренней стороны стенок камеры термоллиза $\alpha_b = 50 \text{ Вт/м}^2$.

Определим коэффициент теплопередачи по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_b}} \quad (13)$$

δ – толщина стенки ($\delta = 0,006 \text{ м}$);

λ – коэффициент теплопроводности стенки ($\lambda = 22 \text{ Вт/(м·К)}$).

Подставив численные значения в (13) получим значение коэффициента теплопередачи:

- при нагреве:

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{63,5} + \frac{0,06}{22} + \frac{1}{50}} = 26 \text{ Вт/(м·К)},$$

- при термоллизе:

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{72} + \frac{0,06}{22} + \frac{1}{50}} = 27,3 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Определяем температуру стенки по формуле:

$$t_{c1} = T_g^c - \frac{K_i \cdot (T_g^c - T_{ci}^c)}{K_i} \quad (14)$$

Подставив в (14) численные значения получим величину температуры стенки:

- при нагреве:

$$t_{c1} = 1000 - \frac{26 \cdot (1000 - 450)}{43,6} = 672 \text{ }^\circ\text{C}.$$

- при термоллизе:

$$t_{c2} = 1000 - \frac{27,3 \cdot (1000 - 600)}{52,1} = 790,4 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Определяем количество передаваемого тепла при нагреве:

$$Q_1 = K_i \cdot F \cdot (T_g^c - T_{ci}^c) = 26 \cdot 17 \cdot (1000 - 450) = 243 \text{ 100 Вт}. \quad (15)$$

По аналогии с (15) определяем количество передаваемого тепла при термоллизе:

$$Q_2 = 27,3 \cdot 17 \cdot (1000 - 600) = 185 \text{ 640 кДж / 3600 с} = 51,6 \text{ кВт}.$$

Количество тепла, необходимое на нагрев резиновых отходов от 100 до 500 $^\circ\text{C}$ определяем по формуле:

$$Q_n = G_p \cdot C_p \cdot \Delta T_p \quad (16)$$

G_p – масса перерабатываемых резинотехнических отходов, кг;

C_p – удельная теплоемкость резинотехнических отходов ($C_p = 1,7 \text{ кДж/(кг·К)}$);

ΔT_p – разность температур нагрева резинотехнических отходов, $^\circ\text{C}$.

Подставив в (16) численные значения получим:

$$Q_n = 1000 \cdot 1,7 \cdot 400 = 680\,000 \text{ кДж} / 3600 \text{ с} = 188,9 \text{ кВт.}$$

Количество тепла, необходимое на пиролиз резиновых отходов, с учетом того, что на деструкцию 1 кг резинотехнических отходов необходимо затратить 600 кДж теплоты:

$$Q_{\text{пир}} = G_p \cdot q_{\text{пир}} = 1000 \cdot 600 = 600\,000 \text{ кДж} / 3600 \text{ с} = 166,7 \text{ кВт.}$$

$q_{\text{пир}}$ – поглощаемое тепло термоллиза резинотехнических отходов, кДж.

Из расчета видно, что тепла, поступающего через стенки термокамеры данного размера, недостаточно для термообработки 1000 кг/час резиновых отходов. Процесс нагрева принципиально может быть решен за счет тепла пара и за счет предварительного нагрева резинотехнических отходов перед подачей в камеру термоллиза. Для ускорения процесса термоллиза большое значение имеет возможность перегрева пара до 610°C. При охлаждении пара в камере термоллиза от 610 до 500°C высвобождается:

$$Q_{\text{пар}} = G_{\text{пар}} \cdot C_{p \text{ пар}} (T_2 - T_1) = 1000 \cdot 2 (500 - 610) = 220\,000 \text{ кДж} / 3600 \text{ с} = 61,1 \text{ кВт.}$$

$G_{\text{пар}}$ – количество водяного пара, подаваемого в камеру термообработки, кг;

$C_{p \text{ пар}}$ – удельная теплоемкость водяного пара ($C_{p \text{ пар}} = 2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$)

Знак «минус» указывает на то, что пар при остывании отдает тепло. Таким образом, имеется потенциальная возможность повысить производительность термокамеры.

Список использованных источников

1. Дроздовский В.Ф. Состояние и перспективы переработки и использования изношенных шин за рубежом // Каучук и резина. 1982. С. 23-30.
2. Аристархов Д.В., Егоров Н.Н., Журавский Г.И., Полесский Э.П., Шаранда Н.С. Паровой термоллиз органических отходов. Минск, Институт тепло- и массообмена им А. В. Лыкова НАНБ, 2001.
3. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. М.: Энергия, 1971. – 560с.
4. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник // Общ. ред. Григорьев В.А., Зорин В.М. – 2-е издание, книга 2. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 558с.
5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов // М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416с.

SUMMARY

Is developed and the trial installation on realization термоллиза C-containing waste in environment high-temperature water pair by productivity of 600 kg / h on processed raw material is created. The experiments on thermal decomposition of the used automobile trunks carried out. The process of decomposition is investigated and such parameters are determined, as temperature, time of realization of process, the output of products etc. On the basis of the received data is submitted account of an opportunity of increase of productivity the thermal chamber of installation pair thermal decomposition waste from 600 up to 1000 kg / h on the used automobile trunks.