



УДК 628.475:662.6/9

Д.В. СТАЛИНСКИЙ, д.т.н., профессор, генеральный директор, **А.Л. СКОРОМНЫЙ**, заведующий лабораторией Украинский государственный научно-технический центр «Энергосталь» (УкрГНТЦ «Энергосталь»), г. Харьков
А.М. СИНОЗАЦКИЙ, директор ЧНПП «Фантомаш», г. Сарны

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТОРА ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ ИЗНОШЕННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

В статье приведены результаты исследования изменения значений объемного коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления слоя измельченных изношенных автомобильных шин в зависимости от соотношения диаметра D и высоты H реактора термохимической деструкции. На основании анализа изменения отношения мощности нагнетателя к тепловой мощности реактора обоснован выбор рационального значения соотношения конструктивных параметров $D/H \geq 0,373$.

изношенные автомобильные шины, утилизация, термохимическая деструкция, реактор, диаметр, высота, рациональное соотношение

Одним из методов утилизации изношенных автомобильных шин (ИАШ) является термохимическая деструкция (ТХД) [1]. Данный метод позволяет путем одновременного температурного и химического воздействия на ИАШ получить жидкие углеводороды (аналогичные топливу печному бытовому), твердый углеродсодержащий остаток (аналогичный каменному углю), металлолом (в виде металлокорда) и топливный газ, используемый для частичного энергообеспечения процесса ТХД [2, 3]. Авторы работы [4] отмечают, что одним из сдерживающих факторов широкого внедрения установок для утилизации ИАШ методом ТХД является отсутствие научно обоснованных инженерных критериев для обеспечения аппаратурного оформления процесса ТХД, поэтому их поиск является важной и актуальной задачей.

Основная составная часть установок ТХД – реактор. На основе анализа научно-технической и патентной литературы авторами разработана классификация реакторов ТХД, которая приведена в работе [5]. В соответствии с классификацией можно выделить основные типы реакторов ТХД:

- по ориентации в пространстве – горизонтальные или вертикальные;
- по форме реактора – цилиндр или призма.

Анализ различных конструкций реакторов позволил определить преимущества вертикальных цилиндрических реакторов:

- при одинаковой производительности вертикальные реакторы занимают меньше производственной площади, чем горизонтальные;
- при одинаковой площади поперечного сечения площадь наружной поверхности цилиндра меньше площади поверхности призмы, что обуславливает меньшие потери теплоты с наружной поверхности цилиндрических реакторов;
- цилиндрический реактор более прост в изготовлении, поскольку может быть выполнен из стандартной трубы.

Цель данной работы – определение рационального соотношения внутреннего диаметра камеры реактора (D , м) и ее высоты (H , м). Решение данной задачи было найдено при исследовании влияния соотношения D/H на процессы теплообмена и гидродинамики, совместное изменение которых оценивалось по соотношению мощности N нагнетателя для транспортировки теплоносителя через слой шихты к тепловой мощности Q реактора.

Рассмотрим процесс теплообмена между газообразным теплоносителем и измельченными ИАШ.

В настоящее время [6] для расчета объемного коэффициента теплоотдачи α_v , Вт/(м³·К) в слое кусковых материалов используется формула Б.И. Китаева [7], полученная при обобщении теоретических и экспериментальных исследований процесса теплообмена в слое частиц диаметром 0,05–0,1 м для различных материалов. Поскольку в реакторе ТХД происходит процесс конвективного теплообмена между газообразным теплоносителем ($t < 600$ °С) и измельченными ИАШ ($d_{\text{ших}} = 0,035$ м), правомерно использование формулы Б.И. Китаева для расчета объемного коэффициента теплоотдачи, Вт/(м³·К)

$$\alpha_v = A_F \frac{\bar{w}_0^{0,3} \cdot t_{\text{ших}}^{\text{ср} 0,3}}{d_{\text{ших}}^{0,75}} \cdot M', \quad (1)$$

где A_F – коэффициент, характеризующий материал кусков (по рекомендациям [7] для кусковых материалов принимается $A_F = 160$);

\bar{w}_0 – средняя скорость газа в свободном сечении реактора в пересчете средней температуры газа на 0 °С, м/с;

$t_{\text{ших}}^{\text{ср}}$ – средняя температура шихты (средняя температура измельченных ИАШ при ТХД – $t_{\text{ших}}^{\text{ср}} = 285$ °С), °С;

$d_{\text{ших}}$ – средний размер фракций шихты (оптимальное значение $d_{\text{ших}} = 0,035$ м), м;

M' – коэффициент, учитывающий содержание мелочи в шихте (при содержании в шихте больше 20 % частиц с размером фракций $d_{\text{ших}} < 0,01$ м коэффициент $M' = 0,3$).

Анализ выражения (1) показывает, что при прочих равных условиях (средняя температура шихты, размер фракций шихты, содержание мелочи в шихте) объемный коэффициент теплоотдачи зависит от скорости газообразного теплоносителя в степени 0,9.

При постоянном расходе газообразного теплоносителя и объеме рабочего пространства реактора скорость газообразного теплоносителя зависит от площади поперечного сечения, т.е. является функцией диаметра реактора D . Поэтому для увеличения объемного коэффициента теплоотдачи за счет увеличения скорости газообразного теплоносителя необходимо уменьшать диаметр реактора. Поскольку при постоянном объеме реактора уменьшение диаметра D приводит к соответствующему увеличению высоты реактора H , целесообразно исследовать изменение объемных коэффициентов теплоотдачи в зависимости от соотношения D/H .

По формуле (1) были выполнены расчеты объемных коэффициентов теплоотдачи для реакторов ТХД емкостью 200–1000 кг шихты при различных значениях соотношения D/H . Результаты расчетов представлены на рис. 1.

Анализ данных (рис. 1) показывает, что увеличение объемного коэффициента теплоотдачи от газообразного теплоносителя к шихте наблюдается при уменьшении

соотношения D/H и при увеличении массы шихты с 200 до 1000 кг ИАШ. В обоих случаях это происходит только за счет увеличения скорости газообразного теплоносителя, следовательно, при одинаковой емкости реактора с целью интенсификации процесса теплоотдачи от газов к шихте в реакторах ТХД необходимо увеличивать скорость газообразного теплоносителя путем уменьшения соотношения D/H .

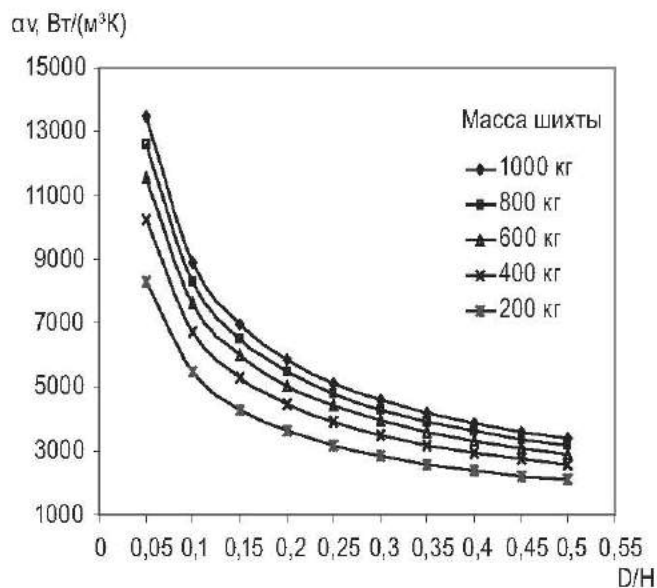


Рисунок 1 – Зависимость объемного коэффициента теплоотдачи в слое от соотношения диаметра и высоты реактора ТХД ИАШ

С учетом данных, приведенных на рис. 1, по уравнению теплопередачи [8] рассчитывали тепловую мощность реакторов емкостью 200–1000 кг шихты, Вт

$$Q = k_v \cdot V \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где k_v – объемный коэффициент теплопередачи $k_v = 1/\alpha_v + (d_{\text{ших}}/2)^2 / (9 \cdot \lambda_{\text{ших}})$, Вт/(м³·К) [7]; $\lambda_{\text{ших}}$ – средневзвешенный коэффициент теплопроводности (для шин легковых автомобилей $\lambda_{\text{ших}} = 7,55$ Вт/(м·К)), Вт/(м·К); V – объем камеры реактора, м³; Δt – среднелогарифмический температурный напор (при переработке ИАШ методом ТХД $\Delta t = 180$ °С), °С.

Рассмотрим процесс транспортировки теплоносителя через слой измельченных ИАШ.

Измельченные ИАШ, равномерно распределенные по сечению реактора, создают гидравлическое сопротивление при движении газообразного теплоносителя. Важно отметить, что затраты электроэнергии на привод нагнетателя для прокачки газообразного теплоносителя пропорциональны расходу газообразного теплоносителя и гидравлическому сопротивлению контура, включающе-



го гидравлическое сопротивление слоя шихты в реакторе. Значение гидравлического сопротивления слоя зависит от плотности газообразного теплоносителя (ρ – для газообразного теплоносителя, состоящего из топливного газа и продуктов сгорания при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 0,5$, $\rho = 1,289 \text{ кг/м}^3$), скорости теплоносителя в живом сечении слоя шихты (w_1 , м/с) и коэффициента сопротивления ζ [9], Па

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} \tag{3}$$

Коэффициент сопротивления ζ для слоя из тел сферической или неправильной формы определяется по выражению [9]

$$\zeta = \left(\frac{360 \cdot (1 - \xi')^2}{\xi'^3 \cdot \text{Re}} + \frac{B' \cdot (1 - \xi')}{\xi'^3} \right) \cdot \frac{H}{d_s} \tag{4}$$

где ξ – пористость слоя шихты;
 $\text{Re} = w_1 \cdot d_s / \nu$ – число Рейнольдса;
 $d_s = \varphi_1 \cdot d_{\text{ших}}$ – средний размер кусков, м;
 φ_1 – коэффициент формы куска;
 ν – коэффициент кинематической вязкости газообразного теплоносителя, $\text{м}^2/\text{с}$;
 B' – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности тела (для тел с шероховатой поверхностью $B' = 4,0$).

Как известно [9], пористость ξ и коэффициент живого сечения f (от которого зависит скорость газообразного теплоносителя) не зависят от размера фракций кусковых материалов $d_{\text{ших}}$ и являются функциями взаимного расположения частиц шихты. Граничные варианты взаимного расположения частиц шихты [9] приведены на рис. 2.

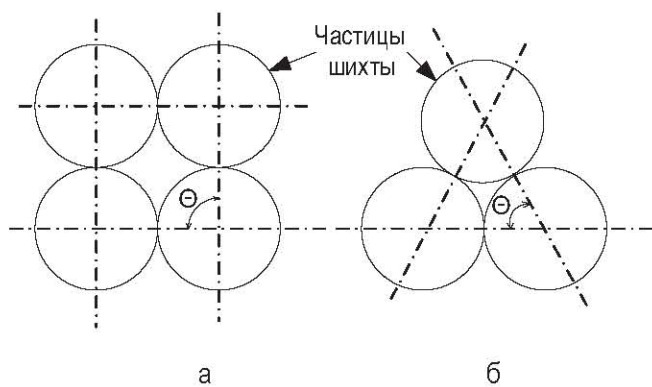


Рисунок 2 – Граничные варианты взаимного расположения частиц шихты:
 а) $\Theta = 90^\circ$; б) $\Theta = 60^\circ$

При величине угла между осями, проходящими через центры частиц шихты, $\Theta = 60^\circ$ значение пористо-

сти составляет $\xi = 0,259$, а коэффициент живого сечения $f = 0,0931$. При $\Theta = 90^\circ$ пористость $\xi = 0,476$, а коэффициент живого сечения $f = 0,2146$. Очевидно, что большее гидравлическое сопротивление будет иметь место при меньшей пористости и коэффициенте живого сечения, поэтому для инженерных расчетов и выбора нагнетателя, который бы гарантировал необходимое давление газообразного теплоносителя, целесообразно рассчитывать гидравлическое сопротивление слоя при минимальных значениях ξ и f .

Важно отметить, что гидравлическое сопротивление слоя кусковых материалов зависит от двух факторов – скорости газообразного теплоносителя, которая, как было отмечено выше, является функцией диаметра реактора D , а также от высоты слоя кусковых материалов (в данном случае от высоты реактора H). При одинаковом объеме реактора параметры D и H взаимосвязаны, поэтому для оценки общего влияния этих параметров на гидравлическое сопротивление реакторов ТХД емкостью 200–1000 кг по формулам (3), (4) были выполнены расчеты показателей гидравлического сопротивления при различных значениях соотношения D/H . Результаты расчетов приведены на рис. 3.

Анализ данных (рис. 3) позволяет сделать вывод об увеличении гидравлического сопротивления слоя шихты:

- при одинаковом соотношении D/H и увеличении массы перерабатываемой шихты;
- при уменьшении соотношения D/H и одинаковой массе перерабатываемой шихты.

В обоих случаях увеличение гидравлического сопротивления объясняется увеличением скорости и высоты столба шихты (высоты реактора).

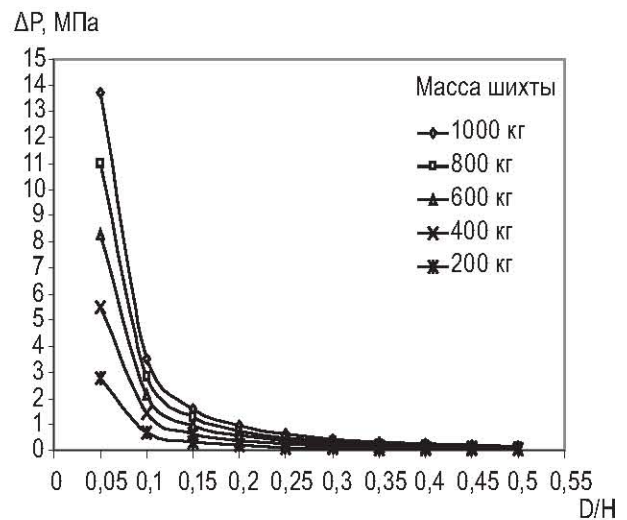


Рисунок 3 – Зависимость гидравлического сопротивления слоя от соотношения диаметра и высоты реактора ТХД ИАШ

Из анализа выражений (3) и (4) следует, что при прочих равных условиях – плотность газообразного теплоносителя, размер фракций ИАШ, пористость и коэффициент живого сечения слоя шихты, коэффициенты, учитывающие шероховатость поверхности и форму частиц шихты – характер увеличения гидравлического сопротивления при уменьшении соотношения D/H обусловлен соответствующим увеличением величин w_p и H/D.

Мощность нагнетателя для транспортировки теплоносителя через слой шихты является функцией гидравлического сопротивления контура и расхода теплоносителя; определяется по формуле, Вт

$$N = K_3 \cdot \frac{G_r \cdot \Delta P}{3600 \cdot K_n \cdot \eta}, \quad (5)$$

где G_r – расход теплоносителя, м³/час;

ΔP – гидравлическое сопротивление, Па;

η – коэффициент полезного действия нагнетателя ($\eta = 0,85$);

K_3 – коэффициент запаса ($K_3 = 1,1$).

Результаты расчетов отношения мощности N нагнетателя для транспортировки теплоносителя через слой измельченных ИАШ и тепловой мощности Q реактора ТХД, характеризующего количество энергии, расходуемой на передачу единицы теплоты к шихте, в зависимости от различных значений соотношения D/H при массе шихты 200–1000 кг приведены на рис. 4.

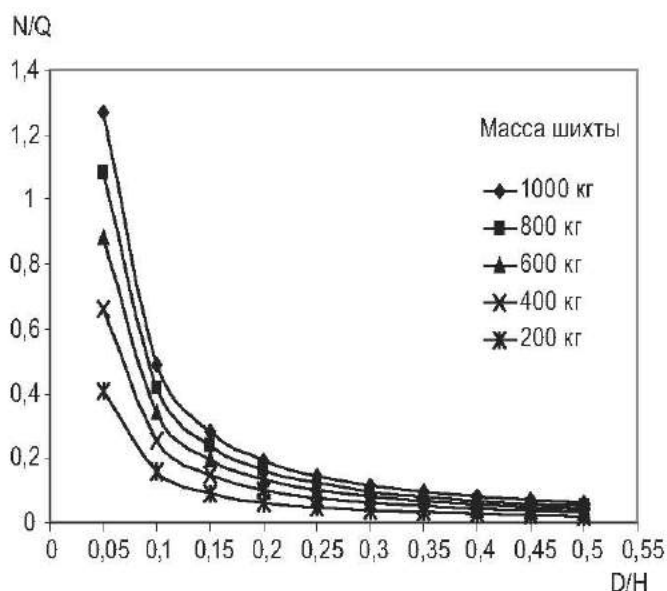


Рисунок 4 – Изменение затрат энергии, расходуемой на передачу единицы теплоты к ИАШ

Дифференцирование функций $N/Q = f(D/H)$ для реакторов ТХД емкостью 200–1000 кг ИАШ (рис. 4) показало, что ощутимое (более 1 %) увеличение скорости изменения отношения N/Q имеет место при среднем соотношении D/H = 0,373. Поэтому (с целью обеспечения

интенсификации процесса теплоотдачи при уменьшении соотношения D/H без значительного увеличения гидравлического сопротивления слоя и мощности нагнетателя) для инженерных расчетов рационально использовать соотношение конструктивных параметров реакторов ТХД ИАШ $D/H \geq 0,373$. Определенное в ходе исследований рациональное соотношение D/H будет использовано в расчетах и при проектировании промышленных установок термохимической деструкции изношенных автомобильных шин.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования показали, что при уменьшении соотношения диаметра камеры реактора D и высоты H и увеличении массы измельченных изношенных автомобильных шин наблюдаются увеличение объемного коэффициента теплоотдачи от газообразного теплоносителя к шихте, обусловленное увеличением скорости газообразного теплоносителя, и соответствующее увеличение тепловой мощности реактора ТХД. Вместе с тем, при уменьшении соотношения D/H и увеличении массы измельченных ИАШ увеличивается значение гидравлического сопротивления слоя шихты, что приводит к увеличению мощности нагнетателя для транспортировки теплоносителя через слой шихты.

2. С целью обеспечения интенсификации процесса теплоотдачи (при уменьшении соотношения D/H без значительного увеличения гидравлического сопротивления слоя и мощности нагнетателя) для инженерных расчетов рационально использовать соотношение конструктивных параметров реакторов ТХД ИАШ $D/H \geq 0,373$, при котором скорость изменения функции $N/Q = f(D/H)$ не превышает 1 %. Определенное в ходе исследований рациональное соотношение D/H будет использовано в расчетах и при проектировании промышленных установок термохимической деструкции изношенных автомобильных шин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сталинский, Д.В. Опытная установка для термохимической деструкции органической части твердых бытовых и производственных отходов / Д.В. Сталинский, А.Л. Скоромный, А.М. Синозацкий // Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов : сб. науч. статей XVI Междунар. науч.-практ. конф. в 2-х т. Т. 2. / УкрГНТЦ «Энергосталь». – Х. : Сага, 2008. – С. 197–200.



2. **Сталинский, Д.В.** Получение альтернативных видов топлива из резиносодержащих отходов / Д.В. Сталинский, А.Л. Скоромный, А.М. Синозацкий // Экология и промышленность. – 2009. – № 2. – С. 8–12.
2. **Скоромный, А.Л.** Снижение энергозатрат на утилизацию изношенных автомобильных шин методом термохимической деструкции / А.Л. Скоромный // Экология и промышленность. – 2008. – № 4. – С. 68–71.
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». – Х. : Сага, 2007. – С. 395–401.
2. **Сталинский, Д.В.** Новые технические решения для утилизации твердых бытовых отходов методом термохимической деструкции / Д.В. Сталинский, А.Л. Скоромный,

А.М. Синозацкий // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення : зб. наук. статей V Міжнар. наук.-практ. конф. у 2-х т. Т. 1. / УкрНДІЕП. – Х. : Райдер, 2009. – С. 51–55.

2. **Китаев, Б.И.** Теплообмен в шахтных печах / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, В.Д. Сучков. – Свердловск : Гос. научн.-техн. изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии, 1957. – 279 с.
2. Догна в енергетическом измерении / А.В. Бородулин, А.Д. Горбунов, В.И. Романенко, С.П. Суцев. – Днепродзержинск : Изд-во Днепродзержинского технического ун-та, 2006. – 450 с.
2. **Швец, И.Т.** Общая теплотехника / И.Т. Швец, В.И. Толубинский, Н.Ф. Кираковский, И.А. Недужий, И.М. Шелудько. – К. : Изд-во киевского ун-та, 1963. – 562 с.
2. **Идельчик, И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М. : Машиностроение, 1992. – 672 с.

Поступила в редакцию 15.04.2010

У статті наведено результати дослідження зміни значень об'ємного коефіцієнта тепловіддачі та гідравлічного опору шару подрібнених зношених автомобільних шин залежно від співвідношення D і висоти H реактора термохімічної деструкції. На основі аналізу зміни відношення потужності нагнітача до теплової потужності реактора обґрунтовано вибір раціонального значення співвідношення конструктивних параметрів $D/H \geq 0,373$.

Investigation of change of heat transfer factor and hydraulic resistance of the shredded worn tires layer, depending on diameter D and height H ratio of the reactor for thermochemical destruction is resulted. Based on analysis of change of supercharger power - reactor thermal power ratio we grounded the choice of rational design values ratio $D/H \geq 0,373$.