

Сталинский Д.В.,* Скоромный А.Л.,* Синозацкий А.М.**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ РЕАКТОРА ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ ИЗНОШЕННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

* Украинский государственный научно-технический центр «Энергосталь» (УкрГНТЦ «Энергосталь»),
г. Харьков

** Частное научно-производственное предприятие «Фантомаш» (ЧНПП «Фантомаш»),
г. Сарны, Ровенская обл.

Актуальность исследования. Одним из сдерживающих факторов развития и широкого внедрения технологии термохимической деструкции (ТХД) изношенных автомобильных шин (ИАШ) [1], которая предполагает получение альтернативных топливных энергоресурсов (жидкого и твердого топлива), а также металлолома, является отсутствие достаточного количества инженерных критериев для расчета и проектирования основного и вспомогательного оборудования комплексов ТХД ИАШ [2]. В предыдущих работах [3–9] авторами был обоснован критерий для выбора рациональных параметров (диаметра и высоты) камеры реактора ТХД, определено количество теплоты для нагрева и деструкции ИАШ, установлена температура начала и конца разложения шинной резины, определены значения размера фракций измельченных ИАШ, переработка которых обеспечивает минимум суммарных затрат энергии на дробление шин и ТХД, выполнена оценка технико-экономических показателей работы комплексов ТХД ИАШ. На основе проведенных исследований разработаны новые технические и технологические решения для утилизации ИАШ методом ТХД [10–13]. Однако, вопрос рационального расположения трубчатых электронагревателей (ТЭНов) по периметру камеры реактора ТХД ИАШ остался нерешенным. Расположение ТЭНов с большим шагом неизбежно приведет к неравномерности температурного поля на поверхности камеры реактора и ухудшению нагрева ИАШ, увеличению длительности процесса ТХД и, как следствие, увеличению потерь теплоты и общих затрат топливно-энергетических ресурсов на переработку ИАШ. Расположение ТЭНов с маленьким шагом приведет к увеличению затрат на покупку большего количества ТЭНов, что увеличит капитальные затраты на строительство комплекса ТХД ИАШ и уменьшит его инвестиционную привлекательность. Учитывая это, определение рационального значения шага между ТЭНами в установках ТХД ИАШ является актуальной и важной научно-практической задачей.

Основным элементом установок ТХД ИАШ является реактор ТХД, который представляет собой вертикальную цилиндрическую камеру (в данном случае $\varnothing 1,032$ м – выбор диаметра реактора обусловлен производительностью установки ТХД ИАШ, которую выбрал потенциальный Заказчик) из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Для уменьшения потерь теплоты с наружной поверхности камеры, а также обеспечения температуры наружной поверхности в пределах санитарных норм (не более 45 °С), реактор изолируется современными легковесными огнеупорными материалами – матами из базальтового супертонкого волокна (БСТВ).

Как известно, стоимость 1 кВт·ч электроэнергии в 1,3–1,5 раза меньше, чем эквивалентное в энергетическом плане количество природного газа [14]. Поэтому, с целью уменьшения эксплуатационных затрат на утилизацию ИАШ, нами было принято решение на начальной стадии процесса ТХД осуществлять подвод теплоты к измельченным ИАШ с помощью трубчатых электронагревателей (ТЭН), установленных по периметру камеры реактора.

Цель работы – обеспечение равномерного подвода теплоты к ИАШ на начальной стадии процесса ТХД путем рационального расположения ТЭНов по периметру камеры реактора.

Методология. Решение вышеуказанной задачи осуществляли путем моделирования температурного состояния реактора ТХД и анализа полей температур при различных значениях шага между ТЭНами.

Постановка задачи. При периодической работе установок ТХД ИАШ, процесс утилизации можно разделить на три стадии:

1. Начальная стадия – подвод теплоты с помощью ТЭНов и нагрев фракций ИАШ и воздуха.
2. Промежуточная стадия – подвод теплоты с помощью ТЭНов и выделение парогазовой смеси углеводородов.
3. Основная стадия – подвод теплоты к фракциям ИАШ путем подачи газообразного теплоносителя внутрь реактора.

На начальной стадии процесса ТХД подвод теплоты осуществляется с помощью трубчатых электронагревателей диаметром 0,01 м, установленных с шагом S по периметру камеры реактора параллельно оси z . Учитывая незначительную полутолщину ТЭНа 0,005 м по сравнению с общей толщиной системы корпус-ТЭНы-изоляция-кожух (0,1855 м), а также возможность автоматического регулирования температуры ТЭНа с точностью до 5 °С, термическим сопротивлением ТЭНа можно пренебречь и считать температуру поверхности контакта ТЭНа и изоляции постоянной и равной $t_{\text{ТЭН}}=600$ °С. Температура поверхности ТЭНа обусловлена необходимостью обеспечения температуры поверхности камеры реактора в пределах 550–590 °С – что соответствует температуре протекания процесса ТХД ИАШ.

Расчет необходимой толщины изоляции (0,18 м) осуществлялся на основании решения уравнений теплового баланса и теплопередачи через трехслойную стенку. Поверх изоляции устанавливается кожух толщиной 0,005 м из стали марки Ст.20. Наружный диаметр реактора ТХД составляет 1,403 м. Поскольку отношение наружного диаметра реактора к внутреннему составляет $1,403/1,032=1,36 < 2$ [15], – цилиндрическая стенка является тонкостенной и ее кривизной можно пренебречь с достаточной для инженерных расчетов точностью. Учитывая постоянство граничных условий по высоте реактора, перетеканием теплоты по высоте реактора (по оси z) также можно пренебречь и рассматривать систему корпус-ТЭНы-изоляция-кожух (рис. 1) только в двух плоскостях (x, y).

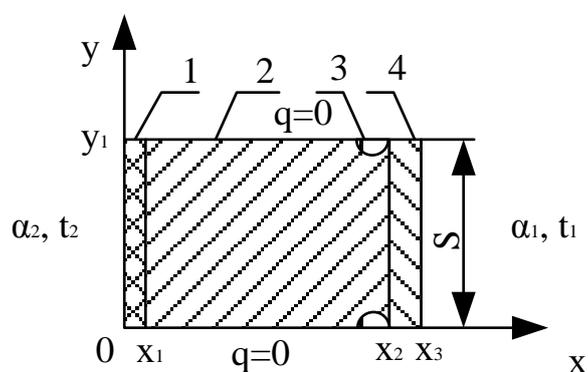


Рисунок 1 – Схема системы корпус-ТЭНы-изоляция-кожух
1 – кожух, 2 – изоляция; 3 – ТЭНы; 4 – корпус реактора

В общем виде дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид [15]:

$$C \cdot \rho \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где $\frac{\partial t}{\partial \tau}$ – градиент температуры во времени, для нестационарной задачи в установившемся состоянии системы $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; ρ – плотность, кг/м³, C – теплоемкость, кДж/кг·К; t – искомая температура в точке, °С; x, y, z – координаты точки, м.

В прямоугольных координатах для двумерной задачи уравнение (1) преобразуется в:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) = 0. \quad (2)$$

При решении уравнения (2) используются следующие условия I-го, III-го и IV-го рода на внешних поверхностях исследуемой системы [15]:

- на границе системы, обращенной к внутреннему пространству камеры реактора, условия теплообмена между камерой реактора и шихтой:

при $x = x_3$
$$-\lambda_4 \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=x_3} = \alpha_1 \cdot (t - t_1), \quad (3)$$

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

где t_1 – температура шихты, °С; α_1 – приведенный коэффициент теплоотдачи между поверхностью камеры реактора и шихтой, Вт/м²·К; $\lambda_4=f(t)$ – коэффициент теплопроводности корпуса реактора, Вт/м·К;

• на границе системы, обращенной к окружающей среде, условия теплообмена между кожухом и воздухом окружающей среды:

$$\text{при } x = 0 \quad \lambda_1 \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_2 \cdot (t - t_2), \quad (4)$$

где t_2 – температура окружающей среды, °С; α_2 – коэффициент теплоотдачи (при естественной конвекции) между наружной поверхностью кожуха и окружающей средой, Вт/м²·К; $\lambda_1=f(t)$ – коэффициент теплопроводности кожуха, Вт/м·К;

• на боковых торцах системы тепловой поток отсутствует (выполняется условие симметрии):

$$\text{при } y = 0 \quad \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad (5)$$

$$\text{при } y = y_1 \quad \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=y_1} = 0; \quad (6)$$

• на поверхности контакта ТЭНов и теплоизоляции:

$$t = t_{\text{ТЭН}}; \quad (7)$$

• на границах контакта слоев с различными теплофизическими свойствами:

$$\text{при } x = x_1 \quad \lambda_1 \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=x_1}, \quad (8)$$

$\lambda_2=f(t)$ – коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/(м·К);

$$\text{при } x=x_2 \quad \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=x_2} = \lambda_4 \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=x_2}. \quad (9)$$

Удовлетворительное аналитическое решение дифференциального уравнения теплопроводности (1) с начальными и граничными условиями имеется только для тел канонической формы. В настоящее время решение дифференциальных уравнений теплопроводности для сложных систем осуществляется с помощью разностных методов, одним из которых является метод конечных элементов (МКЭ), развитие которого началось еще в 50-х годах XX века [16]. При использовании МКЭ, условия теплообмена на внутренней поверхности камеры реактора можно задать с помощью приведенного к единице поверхности коэффициента теплоотдачи, учитывающего перенос теплоты теплопроводностью (в местах контакта камеры реактора и фракций шин), излучением (от внутренней поверхности камеры реактора к поверхности фракций шин) и конвекцией (при движении воздуха, парогазовой смеси углеводородов, образующихся при ТХД ИАШ, или продуктов сгорания к фракциям шин).

Приведенный коэффициент теплоотдачи (α_1 , Вт/м²·К) определяется по формуле [17]:

$$\alpha_1 = \alpha_{\text{ТП}} + \alpha_{\text{ИЗЛ}} + \alpha_{\text{К}}, \quad (10)$$

где $\alpha_{\text{ТП}}$ – условный коэффициент теплоотдачи, учитывающий передачу теплоты теплопроводностью в местах контакта фракций измельченных ИАШ и внутренней поверхности площадью 1 м² стенки камеры, Вт/м²·К; $\alpha_{\text{ИЗЛ}}$ – условный коэффициент теплоотдачи, учитывающий передачу теплоты излучением с 1 м² поверхности стенки камеры, Вт/м²·К; $\alpha_{\text{К}} = \alpha_v \cdot V/F = \alpha_v \cdot \pi \cdot D^2 \cdot L / 4 \cdot \pi \cdot D \cdot L = \alpha_v \cdot D/4$ – условный коэффициент теплоотдачи, учитывающий передачу теплоты конвекцией при движении воздуха/парогазовой смеси углеводородов/продуктов сгорания сквозь слой шихты вдоль поверхности площадью 1 м² стенки камеры реактора, Вт/м²·К, где α_v – объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/м³·К, F – площадь внутренней по-

верхности камеры реактора, м²; V – объем камеры реактора, м³; L – высота камеры реактора (в данном случае $L=2,767$ м), м.

Условный коэффициент теплоотдачи, учитывающий передачу теплоты теплопроводностью, определяется из соотношения [17]:

$$-\lambda_3 \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) \cdot F_1 = \alpha_{\text{ТП}} \cdot F \cdot (t_{x3} - t_{cp}), \quad (11)$$

где F_1 – площадь контакта внутренней поверхности стенки камеры реактора и фракций изношенных автомобильных шин, м²; $F_1 = F \cdot (1 - \varepsilon)$, где $\varepsilon = 0,512$ – порозность измельченных изношенных автомобильных шин при размере фракций 0,035–0,04 м.

Преобразуя уравнение (11), получим:

$$\alpha_{\text{ТП}} = (1 - \varepsilon) \cdot \frac{\lambda_3}{\delta_3} \cdot \frac{(t_{x2} - t_{x3})}{(t_{x3} - t_{cp})}. \quad (12)$$

Условный коэффициент теплоотдачи, учитывающий передачу теплоты излучением, определяется из соотношения [17]:

$$Q_{\text{ИЗЛ}} = \alpha_{\text{ИЗЛ}} \cdot F \cdot (t_{x3} - t_{cp}). \quad (13)$$

Предполагая расположение фракций измельченных ИАШ у поверхности камеры реактора ТХД, как показано на рис. 2, и рассматривая передачу теплоты излучением в плоской постановке, поскольку определение средних угловых коэффициентов облучения в трехмерной постановке является весьма сложной задачей, количество теплоты, передаваемой излучением ($Q_{\text{ИЗЛ}}$, Вт) составляет:

$$Q_{\text{ИЗЛ}} = 2 \cdot Q_{1,2}, \quad (14)$$

где $Q_{1,2}$ – результирующий тепловой поток между поверхностью камеры реактора и четвертой частью фракции измельченных ИАШ, Вт.

Результирующий тепловой поток между поверхностью камеры реактора и фракцией измельченных ИАШ [17]:

$$Q_{1,2} = \frac{C_0 \cdot \left((T_1/100)^4 - (T_2/100)^4 \right) \cdot F_{\text{ИЗЛ}} \cdot \bar{\varphi}_{1,2}}{1 + (1/A_1 - 1) \cdot \bar{\varphi}_{1,2} + (1/A_2 - 1) \cdot \bar{\varphi}_{2,1}}, \quad (15)$$

где $A_1 = 0,85$, $A_2 = 0,86$ – поглощательные способности нержавеющей стали и резины соответственно; $C_0 = 5,67$ Вт/м²·К⁴ – постоянная Стефана-Больцмана; $\bar{\varphi}_{1,2}$ – средний угловой коэффициент облучения фракции ИАШ стенкой реактора; T_1 – температура поверхности камеры реактора, К; T_2 – температура фракции измельченных ИАШ, К; $F_{\text{ИЗЛ}} = F \cdot \varepsilon$ – площадь внутренней поверхности стенки камеры реактора, которая излучает теплоту к фракциям изношенных автомобильных шин, м².

Средние угловые коэффициенты облучения определяли с учетом схемы, приведенной на рис. 2. Кривизной корпуса пренебрегаем, поскольку отношение диаметра фракций измельченных ИАШ к внутреннему диаметру корпуса реактора незначительно и составляет $0,035/1,032 = 0,034$.

Средние угловые коэффициенты облучения фрагментов фракций ИАШ стенкой камеры реактора [17]:

$$\bar{\varphi}_{1,2} = \frac{F_{\text{ИЗЛ}} + F_2 - F_3}{2 \cdot F_{\text{ИЗЛ}}} = \frac{2 \cdot r_1 + 2 \cdot \pi \cdot r / 4 - 2 \cdot \pi \cdot r / 4}{2 \cdot 2 \cdot r} = 0,5; \quad (16)$$

$$\bar{\varphi}_{2,1} = \bar{\varphi}_{1,2} = 0,5 \quad (17)$$

Условный коэффициент теплоотдачи, учитывающий передачу теплоты излучением ($\alpha_{изл}$, Вт/м²·К), составляет:

$$\alpha_{изл} = \frac{2 \cdot Q_{1,2}}{F \cdot (t_{х3} - t_{ср})} \quad (18)$$

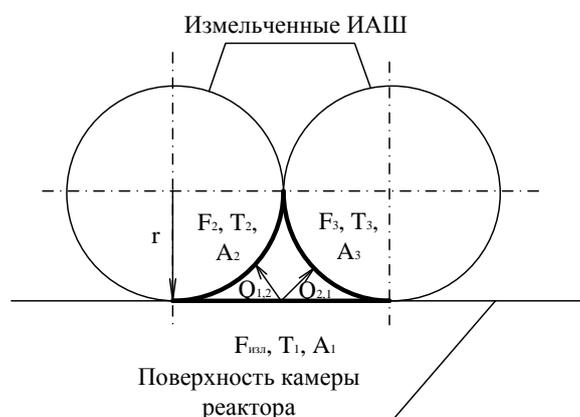


Рисунок 2 – Схема для определения средних угловых коэффициентов облучения

В настоящее время для расчета объемного коэффициента теплоотдачи α_v , Вт/м²·К в слое кусковых материалов используется формула Б.И. Китаева [18], полученная при обобщении теоретических и экспериментальных исследований процесса теплообмена в слое частиц диаметром 0,05–0,1 м для различных кусковых материалов. Поскольку в реакторе ТХД происходит процесс конвективного теплообмена между газообразным теплоносителем ($t < 600$ °С) и измельченными ИАШ ($d_{ших} = 0,035$ – $0,04$ м), использование формулы Б.И. Китаева для расчета объемного коэффициента теплоотдачи является правомерным:

$$\alpha_v = A_F \frac{\bar{w}_o^{0,9} \cdot t_{ших}^{cp\ 0,3}}{d_{ших}^{0,75}} \cdot M' \quad (19)$$

где A_F – коэффициент, характеризующий материал кусков (по рекомендациям [18], для кусковых материалов принимается $A_F = 160$); \bar{w}_o – средняя скорость газа в свободном сечении реактора в пересчете средней температуры газа на 0 °С, м/с; $t_{ших}^{cp}$ – средняя температура, °С; $d_{ших}$ – средний размер фракций шихты $d_{ших} = 0,035$ м; M' – коэффициент, учитывающий содержание мелочи в шихте (при содержании в шихте частиц с размером фракций $d_{ших} < 0,01$ м больше 20 %, коэффициент $M' = 0,3$).

Поиск температур на границах системы осуществляли итерационным путем. Задав коэффициентом теплоотдачи, по модели рассчитывали температуры на границах системы, уточняли коэффициенты теплоотдачи и делали пересчет полей температур до тех пор, пока температуры в граничных точках в текущем и предыдущем расчетах не отличались менее чем на 1 %.

Результаты исследования. Значения приведенных коэффициентов теплоотдачи α_1 и их составляющих – условных коэффициентов теплоотдачи ($\alpha_{тп}$, $\alpha_{изл}$, α_k) для начальной промежуточной и основной стадий процесса ТХД ИАШ представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения приведенных коэффициентов теплоотдачи

		Стадия процесса ТХД ИАШ		
		начальная	промежуточная	основная
Значение коэффициента теплоотдачи, Вт/м ² ·К	$\alpha_{тп}$	39	45	50
	$\alpha_{изл}$	24	36	60
	α_k	3	184	362
	α_1	66	265	472

Из анализа данных, приведенных в табл. 1, следует, что на начальной стадии процесса ТХД теплота от поверхности стенки камеры реактора к фракциям ИАШ в основном передается путем теплопроводности (59,1 % от α_1) и излучения (36,4 % от α_1), а доля конвективного теплообмена в приведенном коэффициенте теплоотдачи незначительна – 4,5 %. На промежуточной стадии в приведенном коэффициенте теплоотдачи конвективная составляющая возрастает до 69,4 % от α_1 , уменьшается составляющая передачи теплоты теплопроводностью до 17 %, а доля передачи теплоты излучением уменьшается до 13,6 %. На основной стадии процесса ТХД ИАШ конвективная составляющая увеличивается до 76,7 %, а доля передачи теплоты теплопроводностью и излучением уменьшаются до 10,6 и 12,7 % соответственно.

В данной работе решение дифференциального уравнения (2) с краевыми условиями (3)–(9) осуществляли методом конечных элементов. На исследуемой системе (рис. 1) выполняли построение сетки из треугольных элементов, в узлах которых производился поиск значений температур (при этом вблизи расположения ТЭНов размер граней треугольников уменьшен до 0,00197 м, что позволило заменить криволинейную поверхность ТЭНов прямыми отрезками. Вблизи кожуха размер граней треугольников составлял 0,00343 м), для каждого узла сетки определяли коэффициенты, учитывающие теплофизические характеристики материалов системы, а также начальные и граничные условия, после чего осуществляли решение системы полученных уравнений итерационным путем с помощью компьютерной программы на ЭВМ.

Для разных стадий процесса ТХД ИАШ при значениях шага между ТЭНами $S=0,1-0,82$ м по разработанной математической модели выполнены расчеты температурных полей (см. табл. 2) фрагментов реактора.

Таблица 2 – Результаты моделирования температурного состояния реактора ТХД ИАШ на разных стадиях процесса

Температура, °C	Стадия процесса ТХД ИАШ								
	начальная при S , м			промежуточная при S , м			основная при S , м		
	0,1	0,3	0,82	0,1	0,3	0,82	0,1	0,3	0,82
t_{\max}	551	504	569	540	504	576	600	600	600
t_{\min}	293	36	20	341	285	285	600	600	599
$t_{\text{пов}}$	35	25	20	35	33	31	41	41	40

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показал, что при значениях шага между ТЭНами $S=0,1-0,82$ м начальная стадия характеризуется наибольшим перепадом температур на внутренней поверхности реактора и, как следствие, наибольшей неравномерностью передачи теплоты от поверхности реактора к измелченным изношенным автомобильным шинам. Это объясняется тем, что на начальной стадии теплота от ТЭНов передается через камеру реактора к ИАШ в основном теплопроводностью, а сама камера реактора хорошо прогревается только вблизи установленных ТЭНов. Важно отметить, что уменьшение шага между ТЭНами с 0,82 до 0,1 м приводит к уменьшению перепада температур на поверхности камеры реактора с 549 до 258 °C. На промежуточной стадии процесса ТХД камера реактора и ИАШ, помимо ТЭНов, нагреваются от парогазовой смеси углеводородов (температура 285 °C), образующихся в процессе ТХД ИАШ, поэтому перепад температур на рабочей поверхности камеры реактора уменьшается. На основной стадии камера реактора и ИАШ нагреваются ТЭНами и газообразным теплоносителем (смеси топливного газа и продуктов его сгорания) с температурой 600 °C.

С целью выравнивания температур на внутренней поверхности реактора на начальной стадии процесса ТХД ИАШ была проведена серия расчетов температурных полей при различных значениях шага между ТЭНами. На основе расчетов температурных полей реактора ТХД на начальной стадии процесса установлена зависимость изменения максимального перепада температур Δt на внутренней поверхности реактора ТХД ИАШ от шага между ТЭНами S и выполнено сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными (см. рис. 3). Установленная зависимость аппроксимируется логарифмической функцией:

$$\Delta t = 169 \cdot \ln(S) - 536. \quad (20)$$

Предварительный статистический анализ показал, что обе совокупности (S , мм и Δt , °C) имеют примерно нормальное распределение. Корреляционный анализ, проведенный для нормально распределенных совокупностей, свидетельствует о статистически существенном влиянии шага между ТЭНами на изменение максимального перепада температур на внутренней поверхности реактора ТХД ИАШ. Коэф-

коэффициент парной корреляции между ними составил $r=0,879$. Эта связь статистически значима (достоверна), а не порождена случайными факторами, поскольку $k=14,4 > 2,6$. Получение оценок коэффициентов регрессионных моделей осуществлялось методом наименьших квадратов, а значимость этих оценок проверялась по t -распределению Стьюдента. Среднее отклонение экспериментальных данных от результатов моделирования составляет 4,1 %, что подтверждает корректность постановки задачи и адекватность математической модели эксперименту.

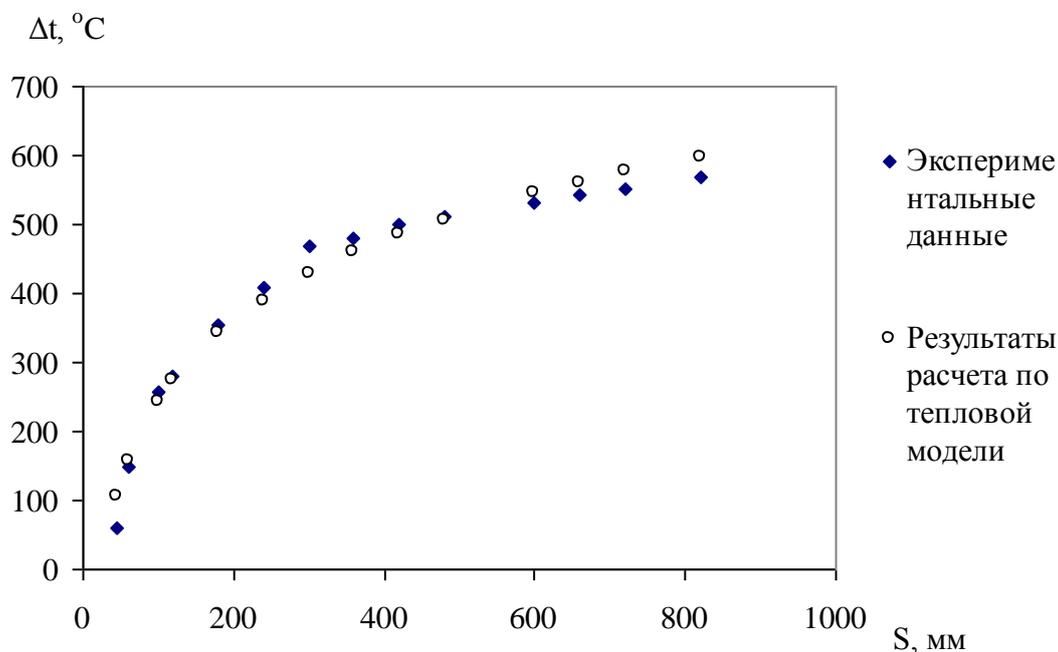


Рисунок 3 – Зависимость максимального перепада температур на внутренней поверхности реактора ТХД ИАШ от шага между ТЭНами

Анализ данных, приведенных на рис. 3 показал, что увеличение шага между ТЭНами с 0,1 до 0,82 м приводит к существенному увеличению максимального перепада температур на рабочей поверхности реактора с 43 до 549 °С. С целью уменьшения перепада температур на рабочей поверхности реактора целесообразно уменьшать шаг между ТЭНами. Рациональное значение шага между ТЭНами, при котором обеспечивается максимальный перепад температур не более 10 % от температуры процесса ТХД, составляет $S = 0,042$ м. Важно отметить, что при таком значении шага между ТЭНами температура наружной поверхности реактора на всех стадиях процесса ТХД ИАШ не превышает 41 °С.

Перспективы дальнейшего развития направления. Установленные в ходе исследований закономерность и рациональное значение шага между ТЭНами будет использовано при разработке научно обоснованной методики расчета основных параметров оборудования комплексов ТХД ИАШ, а также в расчетах и при проектировании промышленных установок ТХД ИАШ.

Выводы

1. Разработана двумерная математическая модель температурного состояния фрагмента реактора ТХД ИАШ, которая позволяет рассчитывать температурное поле системы корпус–ТЭНы–изоляция–кожух с целью последующего анализа и выбора рациональной конструкции реактора ТХД ИАШ.

2. Анализ температурных полей реактора ТХД ИАШ на начальной, промежуточной и основной стадиях процесса ТХД показали, что начальная стадия характеризуется максимальным перепадом температур на внутренней поверхности реактора $\Delta t=549$ °С и, как следствие, наибольшей неравномерностью передачи теплоты от поверхности реактора к измельченным изношенным автомобильным шинам.

3. На основе серии экспериментов и расчетов температурных полей реактора ТХД ИАШ на начальной стадии процесса подтверждена корректность постановки задачи теплопроводности и адекватность математической модели, а также установлена закономерность изменения максимального перепада тем-

ператур Δt на внутрішній поверхні реактора от шага между ТЭНами S , анализ которой позволил определить рациональное значение шага между ТЭНами $S = 0,042$ м. При этом значении шага между ТЭНами обеспечивается максимальный перепад температур на поверхности камеры реактора не более 10 % от температуры процесса ТХД. Установленные в ходе исследований закономерность и рациональное значение шага между ТЭНами будет использовано при разработке методики расчета основных параметров оборудования комплексов ТХД ИАШ, а также в расчетах и при проектировании промышленных установок ТХД ИАШ.

Литература

1. Сталинский Д.В., Скоромный А.Л., Синозацкий А.М. Опытная установка для термохимической деструкции органической части твердых бытовых и производственных отходов // Экология и промышленность. – 2008. – № 3. – С. 42–44.
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. научн. статей XV Междунар. научн.-практ. конф. в 2-х т. Т. 2. / УкрГНТЦ «Энергосталь». – Харьков : «Изд-во Сага», 2007. – С. 395–401.
3. Скоромный А.Л. Повышение энергетической эффективности переработки твердых бытовых отходов в установках термохимической деструкции // 36. наук. ст. IV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення» у 2-х т. Т. 2. / УкрНДІЕП. – Х.: Райдер, 2008. – С. 96–100.
4. Скоромный А.Л. Снижение энергозатрат на утилизацию изношенных автомобильных шин методом термохимической деструкции // Экология и промышленность. – 2008. – № 4. – С. 68–71.
5. Сталинский Д.В., Скоромный А.Л., Синозацкий А.М. Получение альтернативных видов топлива из резиносодержащих отходов // Экология и промышленность. – 2009. – № 2. – С. 8–12.
6. Сталинский Д.В., Скоромный А.Л., Мантула В.Д., Рудюк А.С., Бирюков Д.Б., Бараненко В.С. Оборудование для утилизации изношенных автомобильных шин методом ТХД // Сб. науч. ст. XVII Международной научно-практической конференции «Экология, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей среды и здоровье человека, утилизация отходов»: 1–5 июня 2009 г., г. Щелкино, А.Р. Крым: в 2 т. Т.2. / УкрГНТЦ «Энергосталь». – Харьков: «Издательство САГА», 2009. – С. 449–453.
7. Сталинский Д.В., Скоромный А.Л., Синозацкий А.М. Новые технические решения для утилизации твердых бытовых отходов методом термохимической деструкции // 36. наук. ст. V Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення» у 2-х т. Т. 1. / УкрНДІЕП. – Х.: Райдер, 2009. – С. 51–55.
8. Скоромный А.Л. Комплексы для утилизации изношенных автомобильных шин легковых автомобилей и карьерных самосвалов // Сб. материалов IV Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Эколого-правовые и экономические аспекты техногенной безопасности регионов». Харьков: ХНАДУ, 2009. – 230 с. – С. 49–51.
9. Сталинский Д.В., Скоромный А.Л., Синозацкий А.М. Определение рациональных конструктивных параметров реактора термохимической деструкции изношенных автомобильных шин // Сб. науч. ст. XVIII Международной научно-практической конференции «Экология, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей среды и здоровье человека, утилизация отходов»: 7–11 июня 2010 г., г. Щелкино, А.Р. Крым: в 2 т. Т. 2. / УкрГНТЦ «Энергосталь». – Харьков: «НТМТ», 2010. – С. 413–419.
10. Пат. 34152 Україна, МПК⁸ F23G5/027, F23G7/00. Реактор для термохімічної переробки твердих органічних відходів / Сталінський Д.В., Скоромний А.Л., Сінозацький А.М., Ботштейн В.А., Мантула В.Д., Рудюк О.С., Сінозацький Ю.А., Бараненко В.С., Поляков Ф.М., Борох О.В.; УкрДНТЦ «Енергосталь». – № у 2008 03801; заявл. 26.03.08; опубл. 25.07.08, Бюл. № 14. – 4 с. : іл.
11. Пат. 36824 Україна, МПК⁸ C10L5/48, F23G5/027. Спосіб переробки органічної сировини в термохімічному реакторі / Сталінський Д.В., Скоромний А.Л., Сінозацький А.М., Мантула В.Д., Рудюк О.С., Пірогов О.Ю., Стасевський С.Л., Бараненко В.С., Сінозацький Ю.А.; УкрДНТЦ «Енергосталь». – № у 2008 06530; заявл. 15.05.08; опубл. 10.11.08, Бюл. № 21. – 4 с.
12. Пат. 36989 Україна, МПК⁸ C10L5/48, F23G5/027. Установка для термохімічної переробки органічної сировини / Сталінський Д.В., Скоромний А.Л., Сінозацький А.М., Мантула В.Д., Рудюк О.С.,

Бараненко В.С., Сінозацький Ю.А.; УкрДНТЦ «Енергосталь». – № у 2008 07952 ; заявл. 12.06.08 ; опубл. 10.11.08, Бюл. № 21. – 5 с. : іл.

13. Заявка у 2008 12862 Україна, МПК⁸ F23C3/00. Пристрій прискореного повітряного охолодження / Сталінський Д.В., Скоромний А.Л., Сінозацький А.М., Рудюк О.С., Бараненко В.С., Сінозацький Ю.А.; УкрДНТЦ «Енергосталь». – № у 2008 12862 ; заявл. 04.11.08 ; рішення про видачу патенту від 14.01.09.– 5 с. : іл.

14. Рудюк А.С., Солений В.К., Бараненко В.С. Решение проблемы энергосбережения в термическом оборудовании // Сб. науч. ст. XVIII Международной научно-практической конференции «Экология, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей среды и здоровье человека, утилизация отходов»: 7–11 июня 2010 г., г. Щелкино, А.Р. Крым: в 2 т. Т. 1. / УкрГНТЦ «Энергосталь». – Харьков: «НТМТ», 2010. – С. 57–63.

15. Тепловое оборудование и тепловые сети: Учебник для ВУЗов / Г.В. Арсеньев, В.П. Белоусов, А.А. Дранченко и др. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 400 с.

16. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М. : Мир, 1979. – 392 с.

17. Акмен Р.Г. Тепло- и массообмен. Текст лекций и задачи с комментариями к решению. Для студентов специальностей 7.090510 «Теплоэнергетика» и 7.000008 «Энергетический менеджмент». – Харьков: НТУ "ХПИ", 2007. – 148 с.

18. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Сучков В.Д. Теплообмен в шахтных печах. –Свердловск : Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1957. – 279 с.

УДК 628.475:662.6/9

Сталінський Д.В., Скоромний А.Л., Сінозацький А.М.

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАНУ РЕАКТОРУ ТЕРМОХІМІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ ЗНОШЕНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ШИН

В статті розглянута математична постановка та рішення методом кінцевих елементів задача теплопровідності фрагменту реактора термохімічної деструкції зношених автомобільних шин. Встановлена залежність зміни максимального перепаду температур на робочій поверхні реактора від кроку S між трубчастими електронагрівачами, які розташовані за периметром камери реактора та винайдено раціональне значення кроку $S = 0,042$ м.

Stalinsky D.V., Scoromnyi A.L., Sinozacky A.M.

MODELLING OF THE TEMPERATURE CONDITION OF THE REACTOR THERMOCHEMICAL DESTRUCTION FOR THE WORN OUT AUTOMOBILE TIRES

The statement of heat conductivity problem in the fragment of reactor thermo chemical destruction for waste tires utilization and solve by the finite element method are considered in the article. The dependence of change maximal differences of temperature on the reactor's work surface by the step between tubular electric heating element, which placed by perimeter of reactor's chamber is found and specified its magnitude $S = 0,042$ m.