

Секция 7. ТЕПЛООБМЕН В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВКАХ

Председатель – к.т.н., доц. В.Ю. ПРОНИН

Секретарь – студ. Т.В. ТАТАРИНОВА

Т.В. Татарина, студ.; В.А. Горбунов, к.т.н., доц.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ЗАДАЧ НАГРЕВА С ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ 1 И 2 РОДОВ В ПАКЕТЕ ANSYS

С развитием компьютерных технологий появилось множество вычислительных комплексов для решения различных задач. Преимуществами этих программ являются возможность работы с САД-пакетами и выбора метода математического решения. Но исследователь при постановке задачи сталкивается с необходимостью выбора количества шагов по времени и пространству, способа построения сетки, метода решения задачи для получения заданной точности результатов решения.

Для определения точности математической модели необходимо произвести верификацию полученных результатов. Это можно осуществлять двумя способами: сравнением с результатами физического эксперимента или сравнением с аналитическим решением. Первый способ требует наличия соответствующего оборудования, а также больших денежных затрат. Иногда физический эксперимент провести просто невозможно. Таким образом, наиболее простым способом верификации является сравнение полученных результатов с аналитическим решением.

Данная проблема была исследована на простейшем примере. В пакете ANSYS Fluent решалась задача нагрева заготовки в виде бесконечной металлической пластины в течение 1000 секунд при граничных условиях 1 и 2 рода. При решении учитывалась зависимость теплофизических коэффициентов от температуры. Для этой же задачи было составлено численно-аналитическое решение в пакете MathCAD. Считая аналитическое решение истинным легко определить погрешность решения.

Для исследования влияния количества шагов по времени и пространству эти параметры принимались в качестве варьируемых. И на основе полученных данных для различных толщины пластины и времени нагрева можно произвести обучение нейросети. Использование обученной нейросети позволяет облегчить выбор количества шагов по пространству на стадии построения сетки и количества шагов по времени при задании параметров решателя, которые бы обеспечивали заданную точность.

На основании проделанной работы можно сделать вывод, что для повышения эффективности оценки точности решения задач нагрева в вычислительном пакете можно использовать нейросетевые технологии.

Библиографический список

1. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
2. **Разработка** математических моделей камерных кузнечных печей для предприятий машиностроения. Дипломная работа / Ж.Н. Рыбакова; – Иваново, 2007. – 142 с.
3. **Разработка** модели кузнечного производства в многоцелевом вычислительном комплексе. Дипломная работа / М.С. Седов; - Иваново, 2009. – 127с.

С.В. Федосеев, студ.; В.А. Горбунов, к.т.н., доц.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ПРИ СОЗДАНИИ МОДЕЛИ УСТАНОВКИ ФИЛЬТРАЦИИ ТБО В ПАКЕТЕ ANSYS

Разработка нового оборудования сопровождается экспериментальными исследованиями, которые не всегда дают полную картину процессов, происходящих в исследуемом аппарате. При всём этом результаты моделирования позволяют визуализировать структуру потока в любой точке конструкции, а так же получить интегральные характеристики для рассчитываемых переменных.

Для моделирования процессов фильтрации слоя был выбран программный комплекс ANSYS Fluent. Слой ТБО имеет структуру с неопределённой формой и размером элементов. Его геометрическое описание сложная задача. Предлагается геометрию слоя ТБО описывать элементами фрактальной структуры. В 2D модели в качестве фрактальной структуры использовался фрактал “ковёр Серпинского” со значением фрактальной (Хаусдорфовой) размерности – D . $D = \ln 8 / \ln 3 = 1,8928$. При создании 3D модели слоя использовался пространствен-

ный аналог квадратного ковра Серпинского, называемый “губкой Менгера” со значением фрактальной размерности – D .
 $D = \ln 20 / \ln 3 = 2,7268$.

В качестве газовой среды в модели использовался воздух. На границе контакта геометрической фрактальной модели ТБО и газа скорость движения принималась равной нулю. При моделировании использовался турбулентный режим движения газа и производилось усреднение давлений в каждом сечении слоя по уровням.

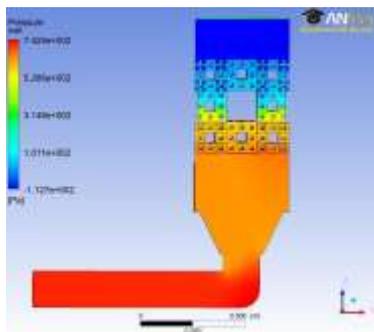


Рис.1 Поле давлений

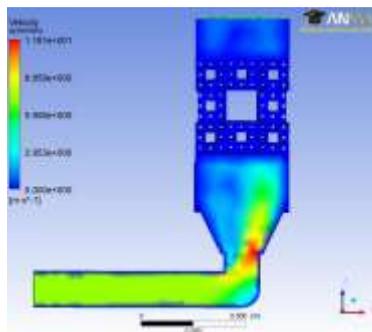


Рис.2 Поле скоростей

Полученные в модели параметры движения фильтрующего агента в дальнейшем можно использовать при создании установок фильтрации. Использование модели на ранних стадиях проектирования позволит обойтись без дорогостоящих экспериментов при выборе оптимальных значений скорости движения фильтрующего агента в проектируемой установке для фильтрации ТБО.

М.А.Новиков, студ.; В.А. Горбунов, к.т.н., доц.

ПРОГНОЗ ТОЧНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НАГРЕВА В ПАКЕТЕ FEMLAB ПРИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПЕРВОГО РОДА

Исследования проводились в конечно-элементном пакете Comsol Multiphysics 3.5a. Целью анализа является оценка решений задач нагрева пластин металла при граничных условиях первого рода. При этом учитывались те факторы, которые прямо или косвенно влияют на

точность: шаг по времени, шаг по пространству и время затраченное на решение, а так же граничные условия.

Femlab (Comsol Multiphysics 3.5a) – это интерактивная среда моделирования для расчета большинства научных и инженерных задач на основе дифференциальных уравнений в частных производных, которые решаются методом конечных элементов. Эта среда позволяет соединить и оптимизировать функциональные возможности для анализа различных механизмов передачи тепла [1,2,3,4].

Пакет Comsol Multiphysics 3.5a позволяет привлечь широкую аудиторию исследователей, разработчиков, преподавателей и студентов для качественно нового математического моделирования процессов теплообмена. Совмещение экспериментальной работы в лаборатории с теоретическими исследованиями на компьютерных моделях позволяет более полно и эффективно проводить научную работу и уменьшает затраты времени для разработки новых процессов. В прошлом сложные инструменты моделирования могли себе позволить только большие компании, в которых затраты на программное обеспечение и специализированных инженеров были оправданы при больших объемах производства. Сегодня моделирование на компьютере стало обязательным элементом исследования и развития процесса.

Femlab (Comsol Multiphysics 3.5a) – ценный инструмент при моделировании передачи тепла в различных теплотехнологических установках.

Использование любого вычислительного комплекса предполагает возможность определения точности решения, но даже у такого лидера – пакета Femlab (Comsol Multiphysics 3.5a) о точности нигде не упоминается. Вполне возможно, что разработчики не задумываются над этой проблемой, рассуждая так, что любой пользователь при желании получить более точное решение, просто увеличит «густоту сетки» модели или количество шагов по времени. Также абсолютно не учитывается время потраченное программой на решение задачи, которое при достаточно высоких параметрах расчета может сильно возрасти.

Самый простой способ определения точности решения это его сравнение с результатами физического эксперимента. Но проведение данных экспериментов в некоторых случаях вызывает сложности. Поэтому анализировать можно, основываясь на аналитическом решении, данного вида задач. В связи с тем, что данная работа берет за основу тела простейшей формы, это упрощает получение аналитического решения.

Проблема была исследована на примере нагрева пластины металла, толщиной $R=0,08\pm 0,25\text{м}$ с начальной температурой 273К в течении

250÷1500 секунд при граничных условиях первого рода с постоянными теплофизическими коэффициентами (температура на верхней поверхности принималась 1273 К, а на нижней - адиабатические условия нагрева).

На точность полученных в Femlab результатов, как уже было сказано, влияют: количество шагов по времени Δt и количеству узлов Δx . Для получения необходимой точности сложно определиться с величинами этих параметров. Для этого было проведено численное исследование по их влиянию на погрешность вычисления температуры в конце нагрева и время выполнения задачи. Его результаты были использованы для создания номограмм для граничных условий первого рода, по которым можно определить по требуемой точности размер количество шагов по времени Δt и количество узлов по пространству Δx .

В ходе исследований, были получены результаты на основе которых были созданы номограммы для определения точности и времени расчета в зависимости Δt и Δx . А так же была проведена проверка на точность пакета Femlab (Comsol Multiphysics 3.5a) при помощи аналитического решения [5,6].

Создание номограммы для различных толщин и разного времени нагрева приводит к некоторому неудобству их использования. Поэтому результаты лучше обрабатывать в нейросети [7].

Библиографический список

1. Heat Transfer Module User's Guide, Version COMSOL 3.2, 2005 – 216с.
2. www.nsu.ru/matlab/MatLab_RU/femlab/book/default.asp.htm. Femlab2.3 Руководство пользователя (перевод с английского с редакторской правкой В.Е. Шмелева).
3. Калинин, Е.Н. Методические указания по выполнению лабораторного практикума в системе мультифизического моделирования / Е.Н. Калинин. – Иваново: ГОУВПО «Ивановская государственная текстильная академия», 2005.-85с.
4. Горбунов, В.А. Моделирование теплообмена в конечно-элементном пакете Femlab: Учеб. пособие / В.А. Горбунов – Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008.- 216с.
5. Лыков, А.В. Теория теплопроводности/ А.В. Лыков; Высшая школа. -Москва 1967.- 592с.
6. Лыков, А.В. Теплообмен. Справочник. – 2-е изд., переработанное и дополненное / А.В. Лыков; М.: Энергия . 1978.-462с.
7. Горбунов, В.А. Использование нейросетей для обработки экспериментальных данных / В.А. Горбунов, О.Ю. Нагорная; под ред. Н.П. Гусенковой . – Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2006.

О.А. Карпова, студ.; В.А. Горбунов, к.т.н., доц.

НАЛАДКА ГАЗОВОЙ ГОРЕЛКИ ФИРМЫ «DE DIETRICH»

В современных условиях развития энергетики теплотехнологий и теплоиспользующих установок актуальной задачей является повышение энергосбережения и повышение эффективности эксплуатации применяемого в отрасли энергоиспользующего оборудования. Поэтому особую важность приобретают снижение затрат энергии и повышение надежности работы горелок.

Для того, чтобы газовая горелка работала экономично и эффективно, необходимо производить её наладку, для чего надо получить её регулировочную характеристику, т. е. построить график соотношения давлений «газ–воздух».

Основой метода получения регулировочной характеристики газовой горелки является физический замер давления воздуха, давления газа и газовый анализ продуктов сгорания при минимуме содержания СО (меньше 100-150 ppm), кислорода O_2 , коэффициенте расхода воздуха, близкому к единице, и максимуму содержания углекислого газа CO_2 .

Испытания проводились на оборудование «De Dietrich» (Франция): газовой горелке серии «G» марки G 100 S, установленной на котельной установке серии «GT-120» марки GT-125 (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид котельной установки GT-125 и горелки G 100 S

В результате была построена регулировочная характеристика горелки (рис.2). Полученная регулировочная характеристика горелки показывает зависимость давления воздуха от давления газа в оптимальном режиме с максимальным использованием теплоты сгорания газа.

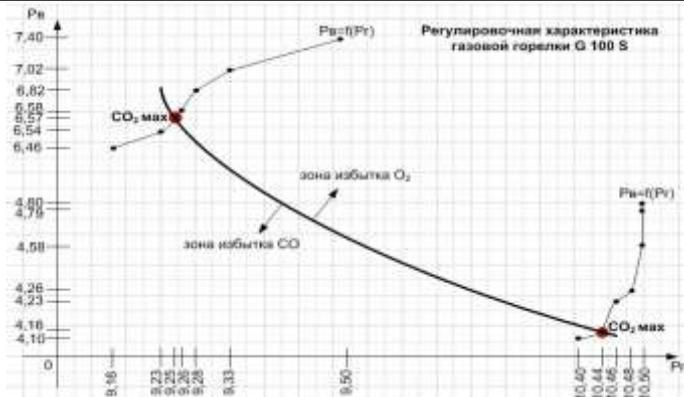


Рис. 2. Регулировочная характеристика горелки G 100 S

Вывод. В результате проделанной лабораторной работы «Наладка газовой горелки фирмы De Dietrich» была получена регулировочная характеристика горелки G 100 S, которую можно использовать для оптимальных режимов работы на котельной установке GT-125.

Библиографический список

1. www.dedietrich-otoplenie.ru

Н.М. Пугачев, студ.; В.А. Горбунов, к.т.н., доц.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНТАКТА НАГРЕВАЕМОГО ТЕЛА С ОГРАЖДЕНИЕМ НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ НАГРЕВАЕМОГО ТЕЛА В СРЕДЕ COMSOL FEMLAB

Исследования проводились в пакете COMSOL в подпрограммах FEMLAB.

Целью исследования является оценка влияния граничных условий четвертого рода в месте контакта нагреваемого тела с ограждением на температурное поле нагреваемого тела (поскольку обычно в месте контакта принимают граничные условия второго рода, то это ведет к значительным неточностям в расчетах).

Учет влияния сопряжения на температурное поле будем проводить на примере двумерной задачи нагрева заготовки толщиной 0,1 м с граничными условиями IV рода с трёх сторон (рис.1), примыкающих к кладке (в первом случае), и с граничными условиями II рода с трёх сторон (рис. 2), примыкающих к кладке (во втором случае). Тепловой поток совместно с отражённым радиационным потоком от кладки равен 212688 Вт/м^2 . Начальная температура нагрева $T_0 = 273,15 \text{ К}$, степень черноты поверхностей $\varepsilon = 0,8$, температура окружающей среды $T_n = 273,15 \text{ К}$. Толщина кладки 0,3 м, а расстояние между кладкой и нагреваемым металлом 0,6 м. Между источником и нагреваемой пластиной отсутствует среда взаимодействия. Время нагрева заготовки 1000 с.

Постановка задачи с учетом граничных условий IV рода:

Граничные условия для металла:

$$\lambda_{\text{кл}}(T) \frac{\partial T(0; y; \tau)}{\partial x} = \lambda_{\text{м}}(T) \frac{\partial T(0,3; y; \tau)}{\partial x}; 0,3 \leq y \leq 0,4 \quad 0 \leq \tau \leq 1000 \text{ с}$$

$$q(x; 0,3; \tau) = 0; 0,3 \leq x \leq 1 \quad 0 \leq \tau \leq 1000 \text{ с}$$

$$\lambda_{\text{кл}}(T) \frac{\partial T(1,3; y; \tau)}{\partial x} = \lambda_{\text{м}}(T) \frac{\partial T(1; y; \tau)}{\partial x}; 0,3 \leq y \leq 0,4 \quad 0 \leq \tau \leq 1000 \text{ с}$$

$$q(x; 0,4; \tau) = 57262 + \sigma \cdot (\varepsilon_{\text{клII}} T^4(0,3; y_{\text{I}}; \tau) - \varepsilon_{\text{м}} T^4(x; 0,4; \tau)) + \sigma \cdot (\varepsilon_{\text{клIII}} T^4(x_{\text{II}}; 1; \tau) - \varepsilon_{\text{м}} T^4(x; 0,4; \tau)) + \sigma \cdot (\varepsilon_{\text{клIII}} T^4(1; y_{\text{III}}; \tau) - \varepsilon_{\text{м}} T^4(x; 0,4; \tau))$$

$$0,4 \leq y_{\text{I}} \leq 1 \quad 0,3 \leq x_{\text{II}} \leq 1 \quad 0,4 \leq y_{\text{III}} \leq 1 \quad 0 \leq \tau \leq 1000 \text{ с}$$

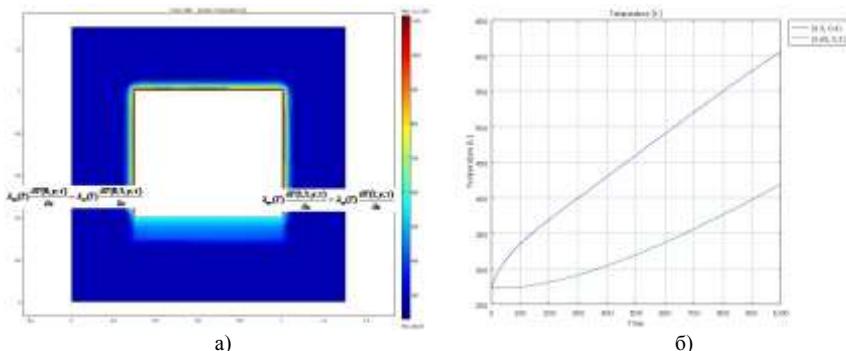


Рис. 1. Распределение температур по сечению заготовки и кладки (а) и изменение температуры теплового центра и самой разогретой точки заготовки во времени (с учетом граничных условий IV рода) (б)

Постановка задачи с учетом граничных условий II рода:

Граничные условия для металла:

$$q(0,3; y; \tau) = 0; \quad q(x;0,3; \tau) = 0; \quad q(1; y; \tau) = 0; \quad 0,3 \leq x \leq 1 \quad 0,3 \leq y \leq 0,4$$

$$0 \leq \tau \leq 1000 \text{ с}$$

$$q(x;0,4; \tau) = 57262 + \sigma \cdot (\varepsilon_{\text{кЛII}} T^4(0,3; y_I; \tau) - \varepsilon_M T^4(x;0,4; \tau)) + \sigma \cdot (\varepsilon_{\text{кЛIII}} T^4(x_{II}; 1; \tau) - \varepsilon_M T^4(x;0,4; \tau)) + \sigma \cdot (\varepsilon_{\text{кЛIII}} T^4(1; y_{III}; \tau) - \varepsilon_M T^4(x;0,4; \tau))$$

$$0,4 \leq y_I \leq 1 \quad 0,3 \leq x_{II} \leq 1 \quad 0,4 \leq y_{III} \leq 1 \quad 0 \leq \tau \leq 1000 \text{ с}$$

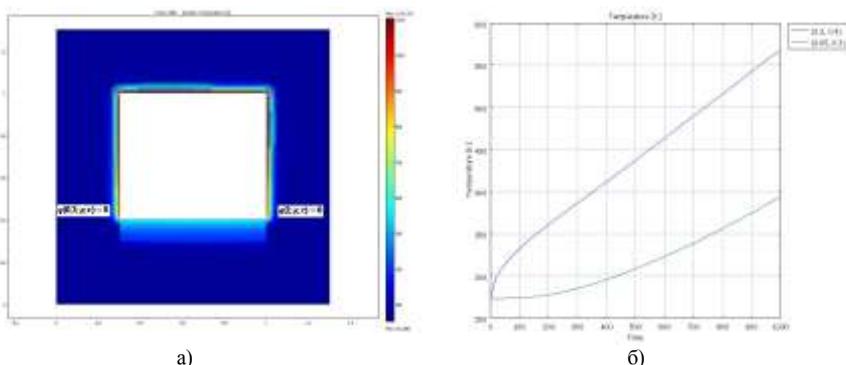


Рис. 2. Распределение температуры по сечению заготовки и кладки (а) и изменение температуры теплового центра и самой разогретой точки заготовки во времени (с учетом граничных условий II рода) (б)

Вывод: По результатам расчета видно, что температуры самых разогретых точек (0,3;0,4) и (1;0,4) заготовки при моделировании с учетом граничных условий IV рода (рис. 1) ($T=605\text{K}$) больше на 6%, чем при моделировании с учетом граничных условий II рода (рис. 2) ($T=568\text{K}$).

Ю.С. Коровкина, студ.; Н.П. Гусенкова, к.т.н., доц.

РАСЧЕТ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

Рассматривается нагрев стальной заготовки размерами $1\text{м} \times 1\text{м} \times 1\text{м}$, имеющей следующие теплофизические свойства: $\lambda=38,67 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $C=608,3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, $\rho=7850 \text{ кг/м}^3$. В области контакта металла с подом печи приняты условия адиабатического нагрева. На остальных поверхностях действует

тепловой поток $q = 146 \text{ кВт/м}^2$. Начальная температура нагрева $T_{\text{нач}} = 273 \text{ К}$. Заготовка нагревается в течение 2000 с.

Процесс теплообмена в теле описывается уравнением:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{C \cdot \rho} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]$$

Начальные условия:

$$T(x, y, z, 0) = 273 \text{ К}$$

Граничные условия:

$$q(x; 0; z) = 0; 0 \leq x \leq 1; 0 \leq z \leq 1$$

$$q(x; y; 0) = 146 \text{ кВт/м}^2; 0 \leq x \leq 1; 0 \leq y \leq 1$$

$$q(0; y; z) = 146 \text{ кВт/м}^2; 0 \leq y \leq 1; 0 \leq z \leq 1$$

$$q(1; y; z) = 146 \text{ кВт/м}^2; 0 \leq y \leq 1; 0 \leq z \leq 1$$

$$q(x; 1; z) = 146 \text{ кВт/м}^2; 0 \leq x \leq 1; 0 \leq z \leq 1$$

$$q(x; y; 1) = 146 \text{ кВт/м}^2; 0 \leq x \leq 1; 0 \leq y \leq 1$$

Построение геометрической модели нагреваемой заготовки осуществляется в пакете SolidWorks. После построения твердотельной модели и задания расчетной сетки переходим к расчету процесса нагрева. Расчет включает следующие этапы: разделение модели на грани, указание настроек решателя, указание модели решателя, задание свойств материала, задание граничных и начальных условий, настройка отображения графического окна при решении задачи, настройка решателя, задание размера шага по времени и указание количества шагов, запуск расчета.

В результате расчета получаем температурное поле заготовки. На рис. 1 представлено температурное распределение по сечению. В этой же постановке задача решалась в пакете Femlab. Распределение температурного поля по сечению представлено на рис. 2.

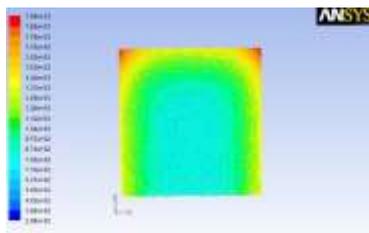


Рис. 1. Температурное распределение по сечению заготовки в пакете ANSYS

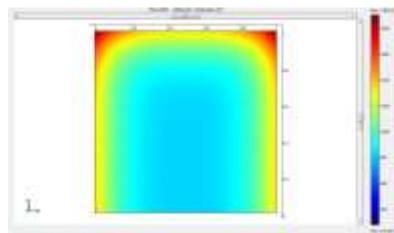


Рис. 2. Температурное распределение по сечению заготовки в пакете Femlab

Для сопоставления результатов решения в пакетах ANSYS и Femlab выбирались показательные точки. Сравнение результатов расчета приведено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение результатов расчета в пакетах ANSYS и Femlab

Координата, м			Температура, К		Погрешность, %
x	y	z	ANSYS	Femlab	
0	0	0	1800	1860	3,23
1	0	0	1450	1380	4,83
0	0	1	1900	1940	2,06
1	0	1	1400	1380	1,43
0,5	0	0,5	1040	1100	5,45
0	0	0,5	1450	1320	8,97
0,5	0	1	1750	1810	3,31
1	0	0,5	1450	1350	6,90
0,5	0	0	1900	1940	2,06
0	0,5	1	1420	1380	2,82
0	0,5	0,5	800	850	5,88
0	0,5	0	1400	1380	1,43
0,5	0,5	1	800	850	5,88
0,5	0,5	0	874	830	5,03
1	0,5	1	1450	1350	6,90
1	0,5	0,5	874	830	5,03
1	0,5	0	1450	1350	6,90
0	1	0	1370	1320	3,65
0,5	1	0	874	790	9,61
1	1	0	1450	1360	6,21
0	1	0,5	792	820	3,41
0,5	1	0,5	380	400	5,00
1	1	0,5	874	790	9,61
0	1	1	1370	1300	5,11
0,5	1	1	792	830	4,58
1	1	1	1450	1390	4,14

Как видно из табл. 1, погрешность расчетных температур не превышает 10%, что позволяет сделать вывод об относительной точности расчетов. Неточность может быть связана с погрешностью в задании сетки или точностью самого пакета.

Также была решена задача для цилиндра при граничных условиях 2 рода. При сопоставлении решений погрешность также не превысила 10%.

*А.Е. Зайцев, Р.Е. Цветков, студенты;
рук. Н.П. Гусенкова, к.т.н., доц., О.Ю. Нагорная, асп.*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОРИСТОГО СЛОЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве метода моделирования полученных результатов в ходе экспериментов выбирается метод моделирования на основе нейронных сетей с использованием нейропакета NeuroSolutions.

Искусственные нейронные сети представляют собой совокупность математических моделей, в которых используются алгоритмы биологической работы нервной системы человека и животных. Они представляют собой сеть элементов из искусственных нейронов, связанных между собой синоптическими соединениями. Нейронная сеть, получая входную информацию, изменяет в процессе этого свое состояние во времени и формирует совокупность выходных сигналов.

Для использования большинства моделей необходимо пройти обучение. Обучение – это адаптация параметров сети, при которых сеть лучше всего справляется с определением выходных параметров. Для обучения сети используют множество алгоритмов.

Искусственные нейронные сети как универсальный инструмент могут использоваться для решения задач обработки информации в следующем качестве:

1. Гибкая модель для нелинейной аппроксимации многомерных функций.
2. Средство прогнозирования во времени для процессов зависящих от многих переменных.
3. Классификатор по многим признакам дающий разбиение входного пространства на области.
4. Средство распознавания образов.
5. Инструмент для поиска по ассоциациям.
6. Модель для поиска закономерности в массивах данных.

Целью работы является исследование процесса фильтрации в зависимости от величины гидравлического сопротивления слоя ТБО.

Для создания математической нейросетевой модели используются такие экспериментальные данные как расход газа V , температура газа T , плотность газа $\rho(g)$, скорость потока газа C , пористость f , высота h ,

плотность $\rho(\text{tbo})$ и масса m слоя ТБО. Диапазон варьирования экспериментальных данных представлен в таблице 1.

При создании нейросетевой модели использовалась модель многослойного персептрона с четырьмя скрытыми слоями и количеством эпох равным 1000.

Таблица 1. Диапазон варьирования параметров влияющих на процесс фильтрации слоя ТБО

Параметры	Единица измерения	Диапазон варирования
расход газа V	м ³ /ч	138÷824
температура газа T	°С	5÷25
С	м/с	0,24÷1,44
пористость f	-	0,19÷0,5
высота h	м	0,1÷0,375
плотность $\rho(\text{tbo})$	кг/м ³	30÷125
масса m	кг	0,764÷4,25
давление P	Па	9÷829

Построенная нейросеть подвергалась процессу обучения на имеющемся множестве данных. Погрешность вычислений составила около 10%. Полученная нейросетевая модель может использоваться для прогнозирования величины гидравлического сопротивления пористого слоя ТБО. Ее применение позволило получить зависимость перепада давления в слое ТБО от расхода газа и плотности слоя ТБО (рис. 1).

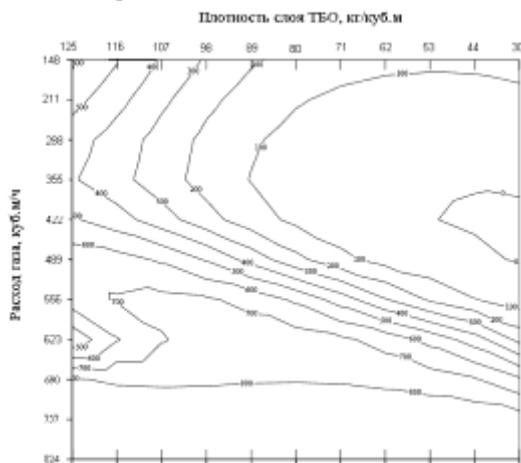


Рис. 1 Зависимость перепада давления в слое ТБО от расхода газа и плотности слоя ТБО

Вывод: На основе статистических экспериментальных данных была получена нейросетевая модель, которая позволила прогнозировать величины гидравлического сопротивления пористого слоя ТБО и устанавливать зависимость перепада давления в этом слое от расхода газа и плотности слоя. По результатам моделирования видно, что наибольший перепад давления соответствует расходу газа в интервале $824 \div 690 \text{ м}^3/\text{ч}$.

*К.В. Овчаренко, студ., Д.А. Долинин, асп. ;
рук. О.И. Горинев, к.т.н., проф.*

ТЕРМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ТБО С ЦЕЛЬЮ ПРОИЗВОДСТВА ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

Проблема переработки твердых бытовых отходов (ТБО) является остро актуальной, поскольку ее решение связано с экологическими, эпидемиологическими и энергетическими факторами. Содержание в ТБО до 60-70% органической (горючей) фракции создает предпосылки для их переработки энергоэффективными термическими способами. При этом необходимая для переработки энергия извлекается из самих ТБО с одновременным производством нового топлива, и, на его основе, тепловой и электрической энергии.

Наиболее перспективными термическими методами переработки ТБО являются пиролиз и газификация. Пиролиз и высокотемпературная газификация, по существу, есть вариант комплексной переработки ТБО, их полной экологически чистой утилизации с получением вторичных полезных продуктов (синтез-газа, шлака и других) и тепловой энергии. Появляется возможность экономически выгодно, экологически безопасно и технически доступно перерабатывать ТБО без предварительной их сортировки.

Осуществить эту возможность предлагается при помощи способа термического разложения ТБО и установки для его реализации в виде печи-реактора шахтного типа.

Схема предлагаемого термического реактора для термического разложения органической части ТБО с целью получения газообразного топлива представлена на рисунке 1. Газообразное топливо, или термогаз, состоит из смеси газов, полученных в результате процессов пиролиза органической части ТБО и газификации в слое твердого углеродистого остатка, оставшегося от пиролиза.

Корпус реактора представляет собой шахту, в которую через конусный затвор из бункера засыпаются ТБО (в том числе и депонированные). Слой ТБО поддерживается в шахте посредством заплечников. Ниже слоя ТБО располагается высокотемпературная зона – термокамера, в которой собираются газы, полученные от процессов пиролиза и газификации. Температура в термокамере поддерживается не ниже 1300°C . Внизу термокамеры располагается зона газификации, в которой находится наклонная колосниковая решетка, предназначенная для поддержания твердого углеродистого остатка. Неорганическая часть ТБО по наклонной колосниковой решетке, при поднятой заслонке, периодически выгружается из реактора. Процесс пиролиза осуществляется в частично слоевом режиме. Нижняя часть слоя ТБО имеет две зоны – зону пиролиза и зону сушки.

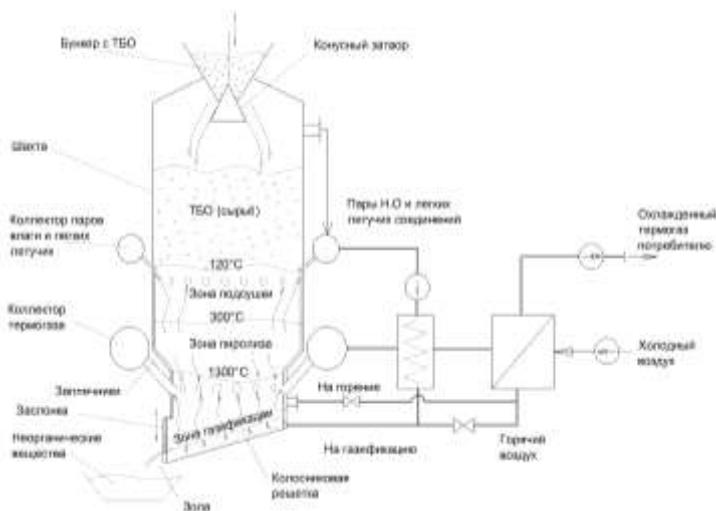


Рис. 1. Схема термического реактора для разложения ТБО и получения газообразного топлива

Верхняя часть зоны сушки, в районе температур 120°C , имеет каналы в стенке шахты для отвода смеси водяных паров и легких летучих соединений, которые могут образовываться в нижней зоне сушки при температурах 300°C .

В реакторе организован обращенный процесс движения пиролизного газа с отбором из зоны подсушки смеси водяных паров и лёгких летучих соединений. Удаляемая из ТБО влага собирается в коллектор и направляются в теплообменник для подогрева. Затем вместе с горя-

чим воздухом подается под слой твердого углеродистого остатка (ТУО) для организации процесса газификации. При дефиците тепловой энергии для обеспечения температурного режима в термореакторе часть синтез - газа, полученного от пиролиза и газификации ТУО, сжигается в термокамере, посредством подачи туда подогретого воздуха.

В соответствии с предложенным способом, ТБО загружаются в верхнюю часть печи (накопительную камеру), снабжённую разрыхлительным устройством. Затем, проходя процессы сушки, пиролиза и газификации в камере газификации, постепенно опускаются в нижнюю часть реактора уже в виде твердого углеродистого остатка (ТУО). Образующийся термогаз отбирается из реактора.

*К.Д. Ермолаев, студ.; рук. Е.С. Семин, инж.,
О.И. Горинов, к.т.н., проф.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГАЗИФИКАЦИИ В СЛОЕ ТВЕРДОГО УГЛЕРОДИСТОГО ОСТАТКА

В энергетике актуальной проблемой является разработка альтернативных источников энергии, поэтому любые исследования, проводимые в области получения энергии из органического сырья имеют важное значение.

Цель экспериментальных исследований – определение оптимальных режимных и технологических параметров процесса газификации в слое твердого углеродистого остатка (ТУО).

В основу экспериментальной установки положена вертикальная трубчатая печь с керамической трубой с внутренним диаметром $d = 50$ мм. На концы керамической трубы ставятся заглушки с штуцерами под трубки из нержавеющей стали с внутренним диаметром $d = 20$ мм для подвода и отвода газа. В нижней части керамической трубы, устанавливается подогреватель (9) поступающего на газификацию газа. Газ поступает с температурой около 300°C и подогревается до значения $800\div 1300^{\circ}\text{C}$. Выше подогревателя устанавливается решетка, на которую укладывается слой твердого углеродистого остатка. По высоте слоя твердого углеродистого остатка выделяются четыре уровня измерения состава генераторного газа и температуры слоя. Для этого в слой твердого углеродистого остатка помещены трубки из жаропрочной стали с наружным диаметром $d = 4$ мм для отбора газа на анализ и

термопары, которые выводятся наружу через специальные отверстия в верхней заглушке.

Установка работает в режиме динамического равновесия, когда слой твердого углеродистого остатка будет иметь постоянную высоту, за счет непрерывного добавления, такие режимы называться квази-стационарными. Экспериментальные исследования проводятся с применением твердого углеродистого остатка полученного в процессе пиролиза.

Пробные эксперименты на водяном пару показали, что процентный состав газа находится в пределах, указанных в табл. 1.

Расход водяного пара на газификацию твердого углеродистого остатка составил 0,300 кг/на кг сухой органической части твердых бытовых отходов.

Выход водяного газа составил 2,113 кг/на кг сухой органической части твердых бытовых отходов.

Таблица 1. Процентный состав газа

Наименование компонента	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂
Процентный состав, %	17,7- 19,7	34,4- 38,4	13,4-16,4	9,2-11,2

Вывод. Создана экспериментальная установка, позволяющая исследовать:

- а) тепловой эффект процесса газификации твердого углеродистого остатка.
- б) состав и количество газа полученного в процессе газификации твердого углеродистого остатка.
- в) оптимальное соотношение между сжиганием и генерацией твердого углеродистого остатка для получения максимального теплового эффекта процесса.

Библиографический список

1. **Результаты** экспериментальных исследований позволяют разработать оптимальные режимы эксплуатации термических реакторов и создать методику их проектирования.
2. **Гречко, А.В.** О месте твердых бытовых отходов в ряду естественных твердых топлив./А.В. Гречко // Промышленная энергетика.-1994.-№1.
3. **Печуро, Н.С.** Химия и технология синтетического жидкого топлива и газа./ Н.С Печуро, В.Д Капкин, О.Ю Песин. - М.: Химия, 1986.-352 с.

*С.А. Балова, студ.; рук. О.В. Самышина, инж.,
О.И. Горинев, к.т.н., проф.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ОРГАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ТБО

Твердые бытовые отходы - это богатый источник вторичных ресурсов, а также "бесплатный" энергоноситель, так как бытовой мусор - возобновляемое углеродсодержащее энергетическое сырье для топливной энергетики. В настоящее время в мировой практике реализовано более десятка технологий переработки твердых бытовых и промышленных отходов. Наиболее распространенными среди них являются термические способы – сжигание, газификация и пиролиз. В процессе пиролиза идет распад органической части, образование и перерождение газообразных веществ, сопровождающиеся выделением или поглощением тепловой энергии. Многокомпонентность органической составляющей ТБО порождает суммарный тепловой эффект процесса пиролиза, то есть появляется эффективная теплота. Эффективная теплота – это теплота процесса пиролиза, выделяющаяся в результате термического разложения органической части ТБО с выделением газообразных веществ. При выделении теплоты требуется меньше энергии на процесс разложения ТБО, при поглощении, наоборот, идет большее потребление энергии, что необратимо учитывать в расчетах и проектировании установок по термическому разложению ТБО.

Целью экспериментальных исследований является определение максимально возможного выхода газообразных горючих веществ полученных при пиролизе сухой органической части ТБО.

В задачу экспериментальных исследований входило определение количественного и качественного состава пиролизного газа, энергетического эффекта пиролиза (количество тепла, необходимое для разрыва молекулярных связей и образования новых газообразных химических соединений), а также определение удельного выхода газообразных продуктов пиролиза при различных режимах.

Для определения эффективной теплоты пиролиза нами была создана экспериментальная установка, состоящая из муфельной электрической печи, огнеупорного керамического тигля с крышкой, газоотводящей трубки, термоэлектрических термометров градуировки ХА, которыми измеряли разность температур в стенке тигля и в печи.

По результатам экспериментальных исследований проводился технический анализ органической части бытовых отходов, который

показал: зольность массы $A_p=20,5\%$; теплота сгорания низшая в массе $Q_n^{pTBO} = 16530$ кДж/кг.

В ходе экспериментов были получены следующие экспериментальные данные, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1. Состав пиролизного газа

Температура пиролиза	Состав пиролизного газа						
	CO ₂	C _n H _m	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂
400	27,35	4,85	1,85	27,7	1,2	6,9	21,95
500	14,4	7,55	1,9	35,45	1,4	20,5	8,15
600	14,8	6,75	1	33,25	1,6	21,25	3,7
700	9,45	3,65	1,6	32,55	1,8	22,65	2,1

Вывод: анализ теплового баланса экспериментальной установки позволили выявить, что качественный состав пиролизного газа зависит не только от морфологического состава ТБО, но и от температурного режима.

Библиографический список

1. **Калинин В.И.** Термическая утилизация твердых бытовых отходов. НИИ Стром-композит, Красноярск, 2006 г.
2. www.new-garbage.com

*Зайцев С.А., студ.; рук. Габитов Р.Н. инж.,
О.И. Горинов, к.т.н., проф.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗОВ В СЛОЕ ТБО

Процесс фильтрации газа в слое ТБО зависит от его гидравлического сопротивления. Определение сопротивления слоя ТБО сопряжено с затруднениями связанными с его неявно выраженной структурой.

Целью исследования является изучение гидравлического сопротивления слоя ТБО с различной плотностью (пористостью) для определения высоты продуваемого слоя - эта характеристика важна для расчета конструктивных особенностей термических реакторов.

В эксперименте определялась высота продуваемого слоя ТБО с плотностью от 125 до 180 кг/м³ и диаметром $d = 0,45$ м при изменении давления на входе в слой – Р, Па.

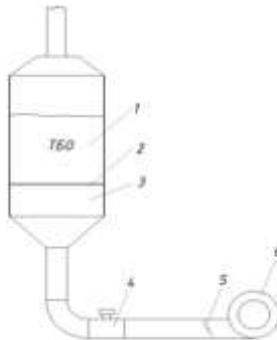


Рис. 1. Схема установки для исследования процессов фильтрации

Экспериментальная установка состоит из шахты 1, представляющей собой металлическую трубу диаметром $d = 0,45$ м, в нижней части которой закреплена металлическая сетка 2 для удержания слоя ТБО; участка выравнивания потока воздуха 3, состоящего из ряда направляющих сеток; расходомера 4; заслонки для регулирования расхода воздуха 5 и воздуходувки 6.

Проведение эксперимента: слой ТБО, предварительно высушенный, взвешивался на весах и загружался в шахту экспериментальной установки. Измерялась высота слоя. Воздуходувкой 6 подавали в шахту 1 воздух при температуре 20°C . Расходомером 4 фиксировался расход воздуха. Дифманометром замерялось среднее по сечению давление на входе в слой, в сечении по высоте и на выходе из него. Результаты экспериментов приведены на рис.2.

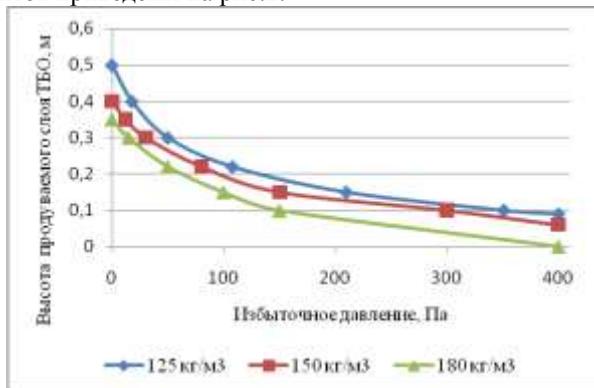


Рис.2 Зависимость высоты продуваемого слоя от его плотности

Из рис.2 видно, что с увеличением плотности от 125 до 180 кг/м³ высота продуваемого слоя уменьшается с 0,5 м до 0,34 м и при достижении максимальной высоты слой “запирается”.

Выводы: Полученное значение высот продуваемого слоя позволяет рассчитать конструктивные размеры термического реактора. Давление на входе в слой можно ограничить 50 – 70 Па для обеспечения необходимой газопроницаемости слоя ТБО.

Е.Е. Бурова, А.В. Туманова, О.И. Щеголева, И.А. Рябинин, студенты; рук. Е.Н. Гнездов, к.т.н., доц.

ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ОГРАЖДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ СОВРЕМЕННЫМИ

Через ограждающие конструкции промышленных печей происходят теплотери в окружающую среду. Уменьшение теплотерь позволяет экономить расход исходного топлива.

Из практики известно, что существует неравномерность распределения температур по поверхностям стен и свода печи. Для точного расчета величины теплотерь нужно правильно усреднять температуру на внутреннем расчетном участке. Это трудная задача, потому что либо нужно многократно измерять температуру на участке, либо иметь другие возможности оценки средней величины температуры, например, с помощью тепловизора.

В наших экспериментах использовались инфракрасные пирометры излучения С-300 «Фаворит» и тепловизионный приемник излучения IRISYS-1011. С помощью пирометра С-300 на внутренних участках туннельной печи измерялась температура в 30÷50 точках. Эти температуры затем усреднялись и по средней температуре рассчитывалась плотность теплового потока с учетом конвективной и лучистой составляющих. При этом оставалось неизвестным расположение наиболее горячих областей в пределах участка.

После определения расположения таких горячих и холодных областей с помощью тепловизора можно более обоснованно усреднять температуры в пределах выделенного участка. Кроме того, тепловизионное обследование областей позволяет находить места утечки тепла во внутренних невидимых местах разрушения кладки, как показано на рисунке.



Рис. Результаты тепловизионного обследования стенки печи

А. В. Саврасова, студ.; рук. Е. Н. Гнездов, к.т.н. доц.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТОПЛЕНИЯ ЭРКЕРА С «ФРАНЦУЗСКИМИ ОКНАМИ» В МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОМ ПАКЕТЕ COMSOL MULTIPHYSICS

В общей концепции строительства дома архитектурное решение и дизайн-проект занимают не последнее место. Различные декоративные архитектурные элементы (арки, балконы, эркеры) позволяют добиться выполнения эстетических требований на высоком уровне, но, в некоторых случаях, играют и обратную роль, повышая сложность при монтаже и эксплуатации.

В индивидуальном жилом доме по адресу д. Игнатово, ул. Соловьиная, д. 16 по просьбе заказчика на втором этаже здания были спроектированы и смонтированы «французские» окна (высокие окна в человеческий рост, начинающиеся от уровня чистого пола здания). Данное решение дало определенный эстетический эффект и значительно оживило фасад, однако, возникла трудность в отоплении таких окон из-за их расположения в зоне эркера, а значит более интенсивного промерзания по сравнению с другими зонами дома. Для отопления

эркера было выбрано напольное отопление по системе водяной теплый пол. Необходимо рассчитать достаточную мощность такого отопления.

Первым шагом было создание трехмерной модели отопляемого эркера в пакете SolidWorks. Трехмерная модель эркера была условно разбита на несколько подобластей. Первая подобласть – смлмкатная кирпичная кладка эркера, вторая - встраиваемые окна, третья подобласть – железобетонная плита перекрытия под эркером, четвертая – теплый пол в эркере (система водопроводных труб, залитых цементно-песчаной смесью и действующая как единый нагревающий элемент), пятая подобласть представляет собой черновой подшив потолка (гипсокартон и положенный сверху минераловатный утеплитель). Самая важная подобласть эркера – воздушный слой (нагревается вместе с эркером).

Для каждой из шести подобластей в мультифизическом пакете COMSOL Multyphysics были заданы параметры, необходимые для расчета, а именно: плотность, коэффициент теплопроводности, удельная теплоёмкость. С наружи эркера (окружающая среда) были приняты довольно жесткие граничные условия: температура воздуха -30°C ; коэффициент теплоотдачи принят равным $23 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{K}$ для наружной поверхности ограждающих конструкций стен. Внутри помещения температура воздуха была принята равной 20°C , а коэффициент теплоотдачи равным $8,7 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{K}$ для внутренних поверхностей ограждающих конструкций стен [1]. При расчете был принят стационарный режим. Результатом расчета является графическое представление распределения температур по объему эркера.

По вычисленной при расчетах мощности теплого пола был выбран тип напольного отопления, а именно: количество витков трубопровода, его диаметр и шаг укладки.

Библиографический список

1. СНИП II-3-79* «Строительная теплотехника»
2. Горбунов, В.А. Моделирование теплообмена в конечно-элементном пакете FEMLAB: Учеб. пособие / Горбунов В.А. – Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». 2008. -216с.

*А.В. Туманова, Е.В. Лаврентьева, Е.Е. Бурова, В.Н. Смирнов,
студенты; рук. Гнездов Е.Н., к.т.н., доц.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПOTЕРЬ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Для оптимизации работы туннельных печей необходимо знать теплотопери через ограждающие конструкции. Туннельная печь имеет большие поверхности кладки, так как ее длина более 100 метров.

Технологически печь состоит из 3-х зон: нагрева, обжига и охлаждения. Ограждающие конструкции разбиты на участки соответственно зонам, выделяя под, боковые стенки и свод печи. Потери рассчитываются по известным формулам [1] на каждом участке с учетом особенностей их расположения.

Для расчета необходимо знать температуры на отдельных участках, которые определялись с помощью современных приборов. Использовались, в частности, инфрокрасный пирометр излучения С - 300 «Фаворит» и тепловизор IRISYS - 1011. На каждом участке измерялись температуры в нескольких точках, которые потом усреднялись.

Измерения и расчеты показывают, что основная доля теплотоперь (до 80%) приходится на участки свода в зоне обжига изделий. Наблюдается существенная неравномерность температурного поля на поверхностях как свода так и боковых стенок, которая хорошо видна на тепловизионных снимках.

Библиографический список

1. Левченко, П.В. Расчет печей и сушил силикатной промышленности / П.В. Левченко. – М., Высшая школа, 1968.

Е.А. Зверева, студ.; рук. Е.Ню Гнездов, к.т.н., доц.

ИНТЕГРИРУЮЩАЯ ТРУБКА ПИТО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ПРОМЫШЛЕННЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Для качественного ведения технологического процесса сушки кирпича необходимо измерять расходы теплоносителя – горячего воздуха во многих местах.

Для одноразового измерения может использоваться обычная трубка Пито. Поскольку в поперечном сечении трубопровода в месте измерения наблюдается неравномерное распределение скоростей из-за рядом находящихся местных сопротивлений, приходится разбивать сечение на ряд равновеликих площадей-колец. В каждом кольце измеряется свой скоростной напор, потом они усредняются, и по средней величине рассчитывается скорость потока. По скорости с учетом диаметра трубы и температуры среды рассчитывается расход теплоносителя. При этом исследователь вынужден перемещать трубку Пито по сечению вручную.

Для обеспечения автоматического измерения скорости и расхода потока с выводом результатов на ПК необходимо обеспечить усреднение скоростного напора без участия наблюдателя. Это обеспечивает разработанная нами по рекомендациям [1] интегрирующая трубка Пито.

Конструктивно она состоит из двух элементов для снятия соответственно полного и статического давления. Для измерения полного давления в поперечном сечении технологического трубопровода диаметром 1200 мм устанавливается трубка диаметром 3/4" с рядом неравномерно расположенных отверстий. Статическое давление снимается с помощью четырех штуцеров, сваренных в том же поперечном сечении трубопровода равномерно по окружности и соединенных в общий коллектор. Эти отдельные импульсы полного и статического давления подаются на преобразователь перепада давления в электрический сигнал «Элемер-100» и далее через аналоговый модуль ввода

МВ 110 – 220. 8АС на программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК 150 и персональный компьютер.

Такая конструкция трубки Пито обеспечивает достаточно точное измерение скоростного перепада давления в промышленных трубопроводах.

Библиографический список

1. **Трембовля, В.И.** Теплотехнические испытания котельных установок. / В.И. Трембовля, Е.Д. Фингер., А.А. Авдеева. – М.: Энергия, 1977. – 296 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПОРИСТЫХ ОБЪЕКТАХ

Для расчета процессов пиролиза в нагреваемых пористых объектах предлагается математическая модель комбинированного теплообмена, включающая в себя два основных расчетных блока: блок расчета переноса теплоты теплопроводностью и блок расчета переноса теплоты конвективным потоком. Конвективный поток создается за счет нагрева объекта и частичного превращения его твердой составляющей в пиролизный газ.

Два расчетных блока совмещены в программе, выполненной в пакете «Mathcad». Модель учитывает внутренние источники или стоки тепловой энергии, что дает возможность отследить расположение зон фазовых переходов, например, зоны сушки изделия.

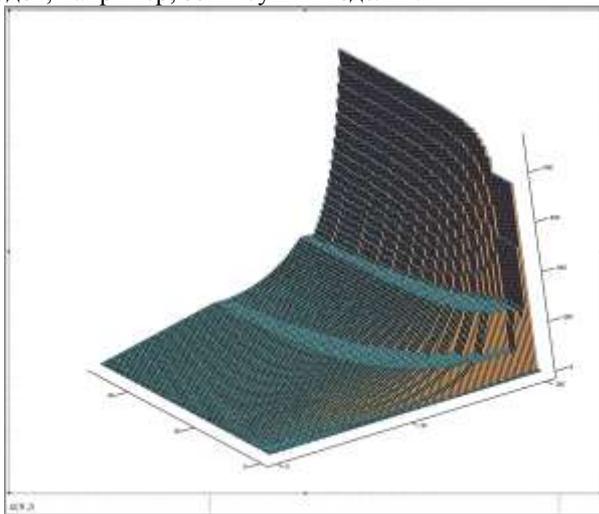


Рис.1. Температурное поле слоя при наличии двух зон фазовых переходов – пиролиза и сушки

Программа составлена для расчетов температурного поля в конкретных объектах, но работа еще не доведена до завершения по причине отсутствия достаточного количества экспериментальных данных для адаптации программы.

А.Е. Зайцев, Р.Е. Цветков, студ., Н.П. Гусенкова, к.т.н., доц., Р.Н. Габитов, инж.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СЛОЯ ТБО

Слой твердых бытовых отходов (ТБО) состоит из множества элементов, уложенных хаотично. Промежутки между элементами заполнены газом. Размеры слоя ТБО значительно больше размеров его элементов, поэтому слой загрузки можно рассматривать как пористое тело, через которое можно фильтровать газы.

В ходе эксперимента определялось сопротивление слоя в зависимости от высоты слоя, плотности слоя, размеров и формы элементов слоя.

Эксперимент проводился при атмосферном давлении и температуре окружающей среды 25°C, на сухих ТБО. Замеряли следующие параметры потока газа: на входе в шахту – давление, скорость, расход, температура и состав газа; в слое ТБО – температура ТБО, скорость газа в слое; на выходе из шахты – температура, скорость, давление и состав газа на выходе. Измерения проводились для двух значений пористости (0,37 и 0,46). Расход газа менялся в диапазоне от 496 до 824 м³/ч при пористости $f = 0,37$ и в диапазоне от 251 до 765 м³/ч при пористости $f = 0,46$. Полученные результаты сведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Результаты измерений при высоте слоя $H = 0.1$ м, пористости слоя $f = 0.37$ и изменении расхода газа от 496 м³/ч до 824 м³/ч

	$f = 0.37$ пористость слоя		$H = 0.1$, м высота слоя		$m_{\text{ТБО}} = 1.00$, кг масса ТБО		$\rho_{\text{ТБО}} = 63$, кг/м ³ плотность ТБО (бумага)		Атм: 99300Па
	Расход газа V , м ³ /ч	Температура газа на входе t_1 , °С	Плотность га- за на входе ρ_1 , кг/м ³	Температура газа на выходе t_2 , °С	Плотность га- за на выходе ρ_2 , кг/м ³	Давление газа на входе P_1 , Па	Давление газа на выходе P_2 , Па	Скорость газа w , м/с	
1	496	25	1.185	25	1.185	49	0	0.86	d=0.035
2	617	25	1.185	25	1.185	70	0	1.08	
3	643	25	1.185	25	1.185	78	0	1.12	
4	788	25	1.185	25	1.185	113	0	1.38	
5	824	25	1.185	25	1.185	121	0	1.44	

Таблица 2. Результаты измерений при высоте слоя $H = 0.12$ м, пористости слоя $f = 0.46$ и изменении расхода газа от $251 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $765 \text{ м}^3/\text{ч}$

№	$f = 0.46$ пористость слоя		$H = 0.12$, м высота слоя		$\rho_{\text{ТБО}} = 1.00$, кг масса ТБО		$\rho_{\text{ТБО}} = 52$, кг/м ³ , плотность ТБО (бумага)		Атм: 99300 Па
	Расход газа V , м ³ /ч	Температура газа на входе t_r^1 , °С	Плотность га- за на входе ρ_r^1 , кг/м ³	Температура газа на выходе t_r^2 , °С	Плотность га- за на выходе ρ_r^2 , кг/м ³	Давление газа на входе P_1 , Па	Давление газа на выходе P_2 , Па	Скорость газа w , м/с	Примечание
1	251	25	1.185	25	1.185	10	0	0.44	d=0.035
2	311	25	1.185	25	1.185	15	0	0.54	
3	360	25	1.185	25	1.185	20	0	0.63	
4	460	25	1.185	25	1.185	30	0	0.80	
5	523	25	1.185	25	1.185	38	0	0.91	
6	600	25	1.185	25	1.185	50	0	1.05	
7	6643	25	1.185	25	1.185	57	0	1.12	
8	667	25	1.185	25	1.185	60	0	1.17	
9	701	25	1.185	25	1.185	69	0	1.22	
10	765	25	1.185	25	1.185	81	0	1.34	

Выводы: В ходе эксперимента мы определили скорость газа в слое ТБО, сопротивление слоя в зависимости от материала ТБО, его формы и плотности.