

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАСЫПНОГО МАТЕРИАЛА, КАК НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Вархалев В.Ю., Лунева О.В

Донецкий национальный технический университет

Вархалев Ю.П., Горда В.И., Тесленко А.И.

Донецкий государственный научно-исследовательский и проектный институт цветных металлов

edudep@pop.dgtu.donetsk.ua

Предложенная в работе [1] математическая модель определения электрического сопротивления сыпного материала при его нагреве позволяет провести расчеты общего сопротивления всего объема нагреваемого материала любой геометрической конфигурации. Такие расчеты необходимы на стадии проектирования энергетических установок – реакторов высокотемпературного пиролиза твердых отходов нового типа (ВТУ) [2, 3]. На основе расчетов производится подбор необходимого электрического оборудования, определяется рациональная конфигурация зоны активного нагрева сыпного материала. Определяющей величиной, при расчетах по предложенной математической модели, является значение активного сопротивления между элементарными объемами сыпного материала при заданной степени разбиения всего объема.

Система уравнений, описывающая значения токов в эквивалентной электрической схеме (дугах ориентированного графа), аппроксимирующей полный токопроводящий объем сыпного материала, согласно закону Кирхгофа, имеет вид [1]

$$\begin{aligned} J_1 + A_1 J_2 + A_2 J_T &= 0, \\ R_2 J_2 - A_1^T R_1 J_1 &= 0, \\ A_2^T R_1 J_1 = J_T R &= U_T, \end{aligned} \quad (1)$$

здесь матрицы A_1 , A_2 описывают свойства ориентированного графа, R_1 , R_2 диагональные матрицы элементарных сопротивлений в ветвях и хордах графа, J_1 , J_2 диагональные матрицы соответствующих элементарных токов, J_T общий ток во вторичной обмотке питающего трансформатора, U_T питающее напряжение, R полное активное сопротивление всего объема нагреваемого сыпного материала. Запись A^T обозначает транспонированную матрицу.

Однотипность разбиения на элементарные объемы и предположение, что температура во всем объеме сыпного материала постоянна, позволяет матрицы представить в виде

$$R_1 = I_1 r(T), \quad R_2 = I_2 r(T)$$

где I_1 , I_2 единичные матрицы соответствующей размерности (количество ветвей и хорд дерева графа), а $r(T)$ активное сопротивление между элементарными объемами при температуре T . После несложных преобразований следует

$$R = B r(T), \quad (2)$$

где $B = A_2^T [I_1 + A_1 A_1^T]^{-1} A_2$ матрица однозначно определяется структурой графа и зависит только от конфигурации рассматриваемого объема сыпного материала и степени разбиения на элементарные объемы. Скобки в степени -1 соответствуют обратной матрице. Из вида уравнения (2) вытекают прямая и обратная задачи. Прямая задача - по известному удельному сопротивлению материала и геометрии элементарных объемов определяется общее сопротивление объекта (используется на стадии проектирования) и обратная задача - по измеряемым величинам - току и питающему напряжению эксплуатируемого объекта определяется активное сопротивление между элементарными сопротивлениями при заданной степени разбиения (определение удельного сопротивления сыпного материала). Таким образом, на простых экспериментальных установках может быть накоплен обширный материал по удельным сопротивлениям различного состава сыпного материала, что позволит решить экономичность производственных процессов при дальнейшем проектировании промышленных объектов. Отметим, что обратная задача также позволяет качественно получить распределение выделяемой мощности по всему объему нагреваемого материала.

Для сопоставления и подтверждения результатов математического моделирования проведены экспериментальные исследования на лабораторной установке.

Лабораторная установка. Схематично установка изображена на рис. 1. Установка включает в себя камеру нагрева 1 с графитовыми электродами 2 и крышкой 3, газоотвод 4, прижимное устройство электродов 5, термометр 6 с потенциометром 7, амперметр 8, вольтметр 9, реостат 10 и трансформатор питания 11.

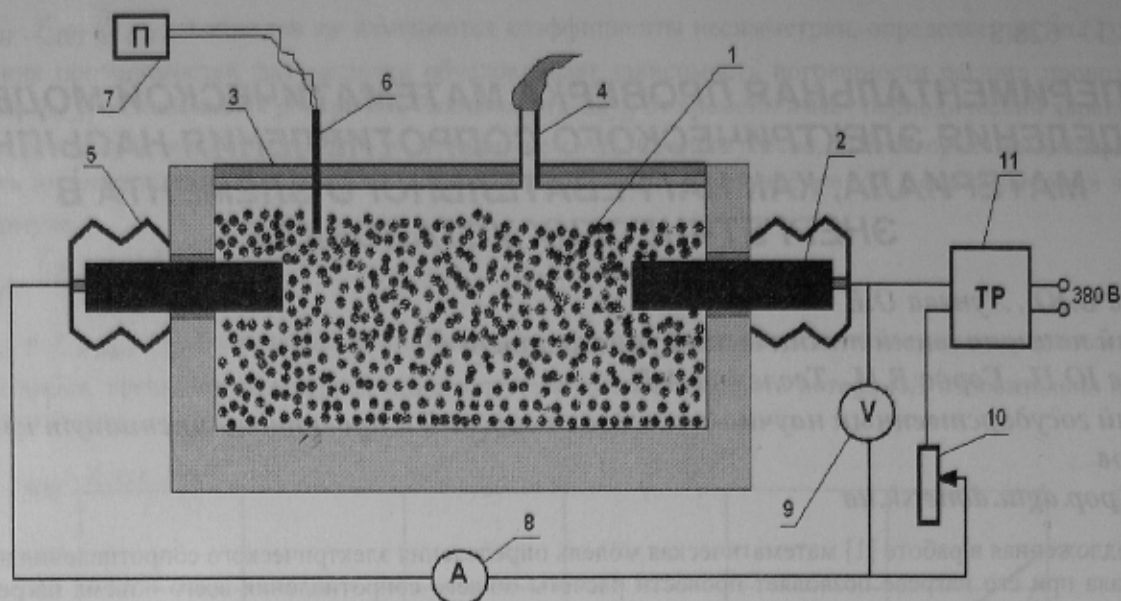


Рисунок 1 – Лабораторная установка

Камера 1 представляет собой емкость прямоугольной формы и футерована шамотным кирпичом, заключенную в стальной кожух из листовой стали. Внутренние размеры камеры 680x230x230 мм. Толщина футеровки 120 мм. В рабочую зону камеры противоположно друг другу с торцов сечения 230x230 мм через уплотнительные муфты введены два графитовых электрода диаметра 90 мм для непосредственного подвода электрического напряжения в слой кокса. Электроды заглублены в слой кокса на 115 мм, на расстояние между ними 350 мм. Рабочая атмосфера камеры изолирована от окружающей среды тепло и электроизоляционной крышкой 3. Крышка снабжена газоотводом в виде патрубка, дающего возможность сжигать отходящие газы непосредственно в свече. Для обеспечения постоянного контакта графитовых электродов и кокса служат прижимные пружинные устройства 5. Напряжение на графитовые электроды подается с помощью трансформатора 11 типа КИ002-500У и регулируется реостатом 10 типа РБ-302 У2. Значение напряжения контролируется вольтметром 9, а величина проходящего тока через слой кокса определяется амперметром 8. Изменение температуры в рабочей камере измеряется вольфрам-ренийовой термопарой 6, показания которой регистрируются самопишущим потенциометром 7, типа КСП-4.

При подаче напряжения на электроды слой насыпного кокса начинает прогреваться за счет прохождения электрического тока (Джоулево тепло). В рассматриваемом объеме кокса начинают происходить различные физико-химические преобразования: выделение летучих газообразных, тепловое расширение, уплотнение и спекания кусков кокса, плавление легкоплавких компонент минералогических составляющих кокса, возможны газовые разряды. Как показали проведенные эксперименты, активное сопротивление слоя кокса в значительной мере зависит от фракционного состава насыпного материала. Эксперименты проводились для трех фракций кокса (средние размеры): 70 мм; 20 мм; -3мм (коксик). Полученные зависимости средних величин сопротивления слоя кокса от фракционности и температуры нагрева показаны на рис. 2.

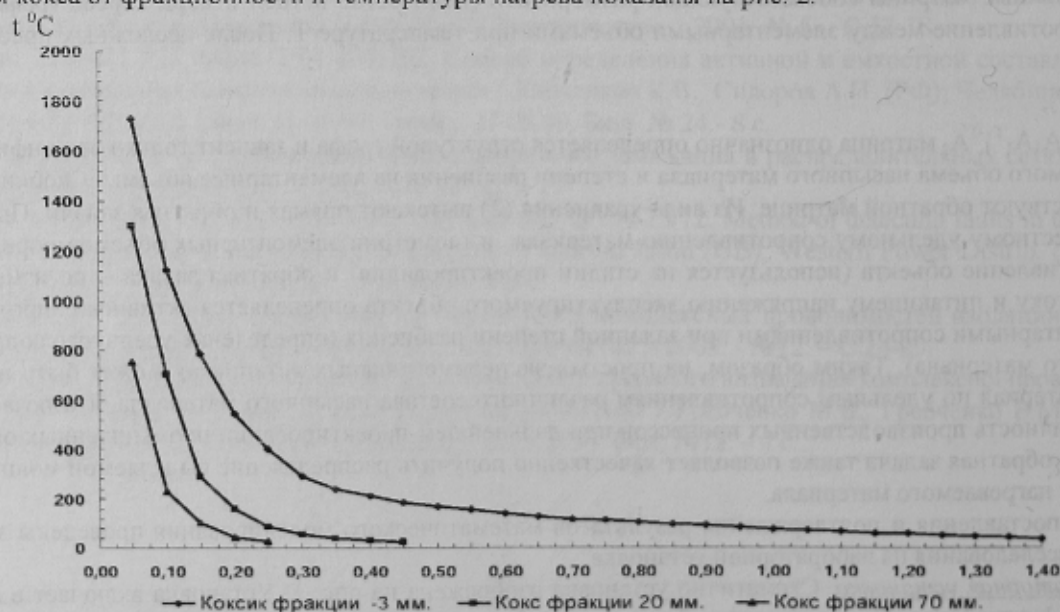


Рисунок 2 – Зависимость изменения электросопротивления слоя кокса (Ом) от температуры (°С)

В первом приближении для расчетов по принятой математической модели и построения граф эквивалентной электрической схемы рассмотрим однослойную структуру насыпного кокса. За элементарные объемы принимаем цилиндры диаметра d и высотой равной толщине насыпного слоя кокса, которые плотно заполняют область рабочего пространства лабораторной установки. Пример заполнения цилиндрами приведен на рис. 3.

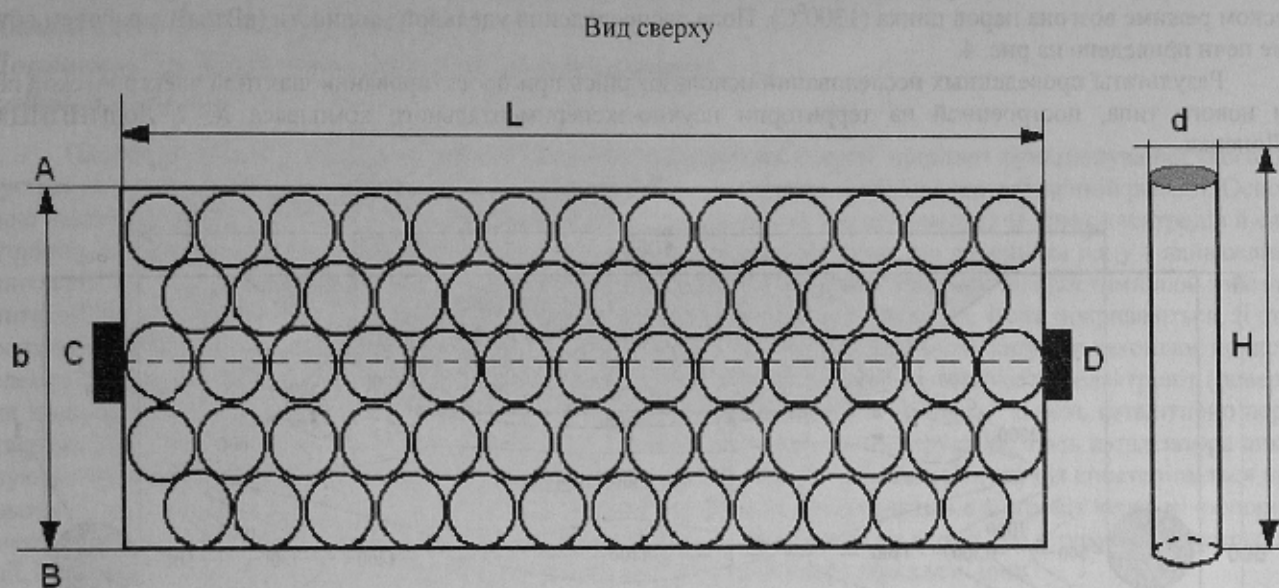


Рисунок 3 – Пример заполнения цилиндрами рабочего пространства объема кокса

Количество слоев цилиндров в горизонтальном сечении (вдоль линии АВ) всегда нечетное (симметрия относительно линии CD) и средний слой цилиндров вдоль линии CD соприкасается с электродами. Таким образом, при заданном значении диаметра цилиндров d количество слоев (вдоль линии АВ) будет $m=2k+1$, где $k=\text{int}[(b/d-1)\sqrt{3}/3]$, количество вдоль CD будет $n=\text{int}[L/d]$. Граф эквивалентной электрической схемы построим приняв за вершины осевые линии цилиндров, а за дуги примем сопротивления соприкасающихся цилиндров. Ориентация дуг произвольная. Здесь $\text{int}[\]$ целое значение выражения в скобках.

Расчеты проведены для ряда значений $k \geq 1$ при величинах $b=230$ мм и $L=350$ мм соответствующим размерам рабочего пространства лабораторной установки. Результаты расчетов даны в таблице для четных и нечетных значений k . Отличие значений для близких значений k определяются получаемой структурой графа эквивалентной схемы для четных и нечетных значений. Величина приближенного значения коэффициента В уравнения (2) ограничена сверху рядом значений определяемых при нечетном значении k , а снизу рядом значений определяемых при четном значении k .

Таблица – Зависимость коэффициента В от диаметра эквивалентных цилиндров

Диаметр d мм	k	m	В	Диаметр d мм	k	m	В
85	1	4	3,55618	51	2	7	1,94221
37	3	10	2,11474	29	4	12	1,66454
24	5	15	1,78351	20	6	18	1,60393

С увеличением значений k (уменьшение диаметра d элементарного цилиндра) значение коэффициента В уравнения (2) стремится к фиксированной величине B_0 , зависящей только от геометрии нагреваемого объема насыпного материала и независящей от степени разбиения на элементарные цилиндры. Действительно, величина сопротивления элементарного цилиндра не зависит от его диаметра:

$$r=2\rho \int_0^{d/2} \frac{dx}{H\sqrt{x(d-x)}} = \frac{\pi\rho}{2H},$$

здесь H – толщина слоя (высота элементарного цилиндра), ρ – удельное сопротивление насыпного материала, x – радиусы полых цилиндров, с толщиной стенки dx , из которых состоит рассматриваемый элементарный цилиндр. Таким образом, используя лабораторную установку можно определять с некоторой точностью значение удельных сопротивлений различных проводящих насыпных материалов различного фракционного состава. Аналогично можно определять удельные сопротивления токопроводящих шлаков пирометаллургического перелола различного минералогического состава, как в твердом, так и в расплавленном состоянии.

Используя математическую модель и результаты экспериментов на лабораторной установке по определению удельного сопротивления кокса различной фракции, даны рекомендации по проектированию рабочей зоны шахтной электрической печи (ПЭШ) для возгона паров цинка (предприятие ООО «Экоресурс» г. Константиновка). В частности, определены оптимальные рабочие расстояния между токоподающими подвижными графитовыми электродами в режимах запуска печи из холодного состояния и в основном технологическом режиме возгона паров цинка (1300°C). Поле распределения удельной мощности (kBt/m^3) в рабочем объеме печи приведено на рис. 4.

Результаты проведенных исследований использовались при проектировании шахтной электрической печи нового типа, построенной на территории научно-экспериментального комплекса № 2 ДонНИПИЦМ г.Донецка.

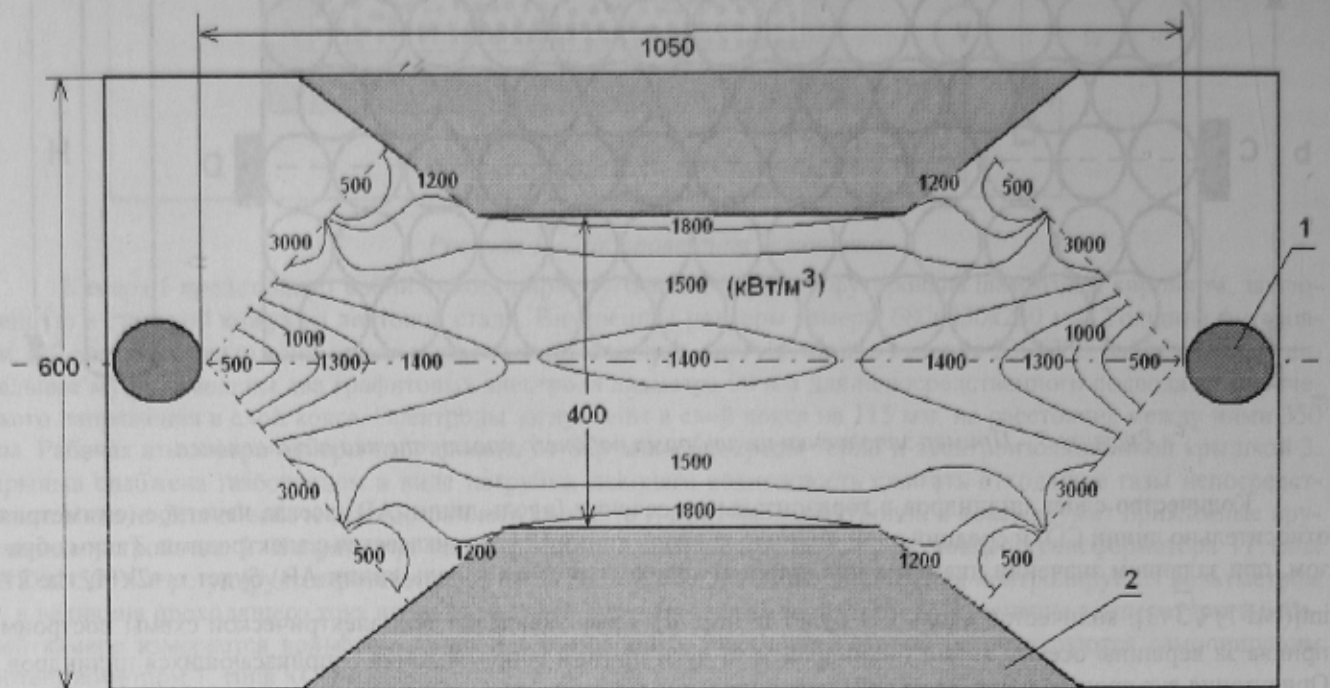


Рисунок 4 – Поле распределения удельной мощности в рабочем объеме ПЭШ.

1 – электроды диаметра 250 мм; 2 – пристеночные выступы (для уменьшения рабочего пространства ПЭШ)

ЛИТЕРАТУРА

1. О.В.Лунева, Ю.П.Вархалёв, А.И.Тесленко Математическая модель определения электрического сопротивления насыпного материала, как нагревательного элемента в энергетических установках/ Труды ДонНТУ, серия «Электротехника и энергетика», вып.112, 2006, 132-137 с.
2. В.И.Горда Патент № 44079А, Украина, на изобретение. Установка для термической переработки твердых отходов., заявлен 18.04.2001., опубликован 15.01.2002г., бюл. №1.
3. О.В.Лунева, В.К.Костенко, В.И.Горда, Е.С.Матлак, С.Ю.Приходько Патент № 79548, Украина, на изобретение. Способ утилизации отходов, заявлен 26.09.2005 г., опубликован 10.04.2007 г., бюл. №4.