

УДК 622.734.001.57

И.В. Тарабаева (ст. преподаватель)

Донецкий национальный технический университет

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
СУШКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В «КИПЯЩЕМ СЛОЕ»**

Представлены результаты сравнительного анализа теоретических и экспериментальных исследований процесса сушки в «кипящем слое» в натуральных условиях.

Ключевые слова: процесс, параметр, технология, модель

Актуальность работы. В ряде отраслей промышленности важной стадией является обезвоживание конечного продукта, который получается в виде увлажненной сыпучей массы, что особенно характерно для процессов обогащения углей, производства ряда химических материалов и др. При прочих равных условиях способ «кипящего слоя» является наиболее прогрессивным [1, 2], и на повестке дня стоит задача разработки современной аналитической базы для теоретических исследований процесса. Наиболее эффективным современным средством решения данной задачи является метод математического моделирования с применением детерминированных математических моделей, основанных на уравнениях математической физики.

В этой связи тема работа является актуальной.

Цель работы – идентификация математических моделей процесса сушки влажных сыпучих материалов в «кипящем слое» путем сравнительного анализа результатов моделирования и экспериментальных исследований в натуральных условиях.

Основное содержание работы. Для достижения поставленной цели проведены теоретические исследования процесса сушки в «кипящем слое» методом математического моделирования с использованием детерминированных моделей [3, 4].

Математическая модель распределения температуры в плоском сечении сушильного аппарата строится следующим образом.

В области G (сушильный аппарат, рис. 1) требуется определить распределение температуры при заданном количестве узлов (отверстий) на газораспределительной решетке.

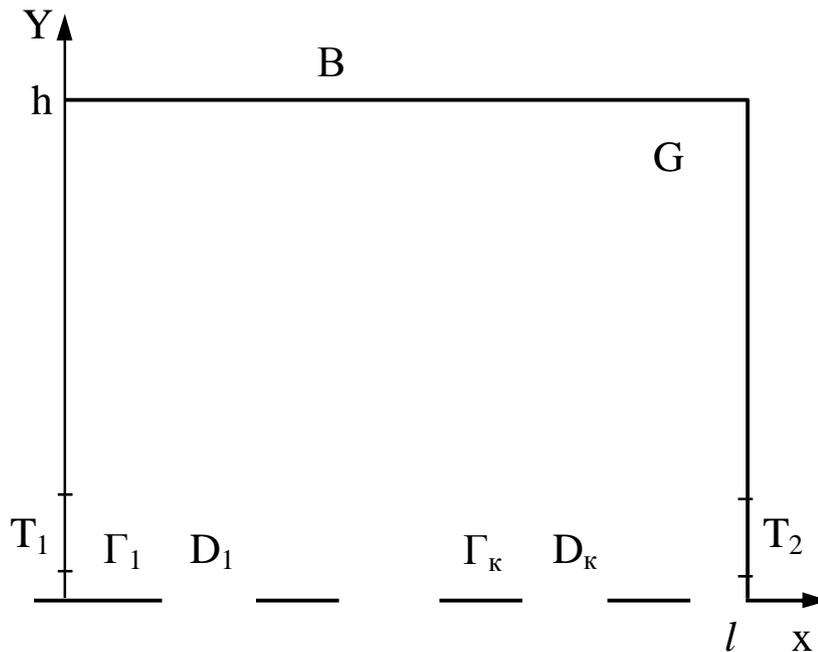


Рис. 1. Схема сушильного аппарата в плоском разрезе

Такие задачи относятся к классу краевых задач со смешанными краевыми условиями, а само уравнение есть уравнение эллиптического типа.

Дифференциальное уравнение распределения температуры и краевые условия имеют следующий вид [3, 4]:

$$\omega \cdot c \cdot \rho \frac{\partial u}{\partial x} = k \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \alpha \cdot (u - T_S). \quad (1)$$

Краевые условия:

$$\text{при } 0 \leq x \leq l \quad \left. \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} \right|_{y=h} = 0;$$

$$\text{при } 0 \leq y \leq h \quad \left. \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} \right|_{x=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} \right|_{x=l} = 0;$$

$$\text{при } (x, y) \in \Gamma_K \quad \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} = 0;$$

$$\text{при } (x, y) \in D_K \quad u(x, y) = U,$$

где U – температура поступающего газа; c – удельная теплоемкость сыпучей среды; ρ – плотность среды; ω – скорость поступающего газа; k – коэффициент теплопроводности среды; α – коэффициент теплообмена; T_S – температура внешнего слоя (окружающей среды).

Для решения полученной краевой задачи она сводится к безразмерному виду, когда $0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$, а переменные заменяются безразмерными аналогами путем деления на «характерные» (как правило, максимальные) значения. Полученная в результате сеточной аппроксимации система линейных алгебраических уравнений решается методом матричной прогонки.

При переходе от безразмерных величин к реальным значениям параметров в качестве начальных и граничных условий принимаются технические характеристики сушильного оборудования, находящегося в эксплуатации.

На рис. 2 приведены результаты численного решения задачи в безразмерном виде.

На рис. 3 приведены результаты решения задачи для следующих значений параметров:

$$c = 0,2 \text{ Дж/(кг град)}; \rho = 500 \text{ кг/м}^3; \omega = 0,5 \text{ м/с}; k = 0,05 \text{ Вт/(м град)};$$

$$\alpha = 0,5 \text{ Вт/(м град)}; T_S = 20^\circ\text{C}; l = 1 \text{ м}; h = 0,5 \text{ м}; U = 250^\circ\text{C}.$$

На рис. 2 изображена качественная картина процесса распределения температуры в плоскости осевого сечения Ox при двух фиксированных значениях координаты y .

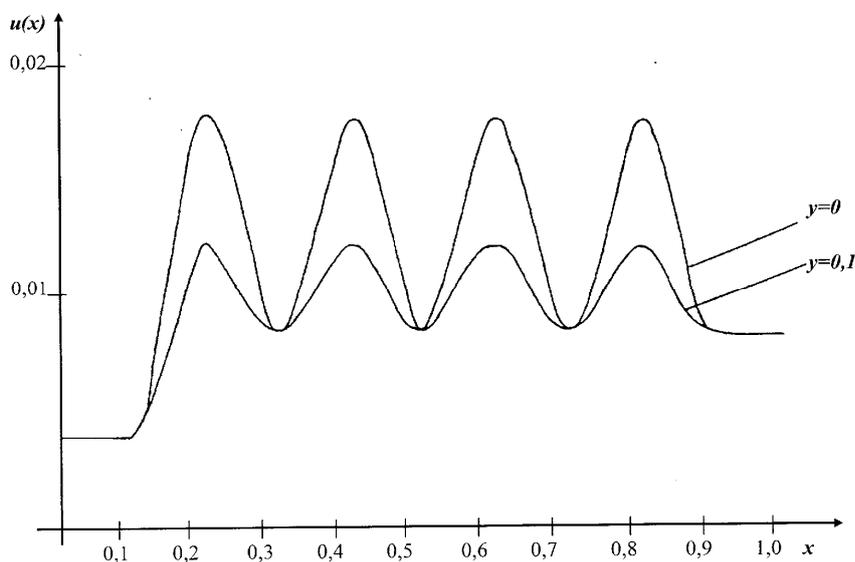


Рис. 2. График зависимости температуры $u(x)$ для $y=0$, $y=0,1$ в безразмерных величинах

На рис. 3 представлен пример моделирования для заданного набора значений физических характеристик, при этом геометрические размеры оставлены 1×1 , т.к. в данном случае значение имеет в первую очередь качественная картина. Поскольку функция распределения температуры является

двумерной $u(x,y)$, то графически результат придется представлять в виде поверхности с третьим измерением, если же рассматривать аппарат в объеме $u(x,y,z)$, то необходим инструмент четырехмерных изображений.

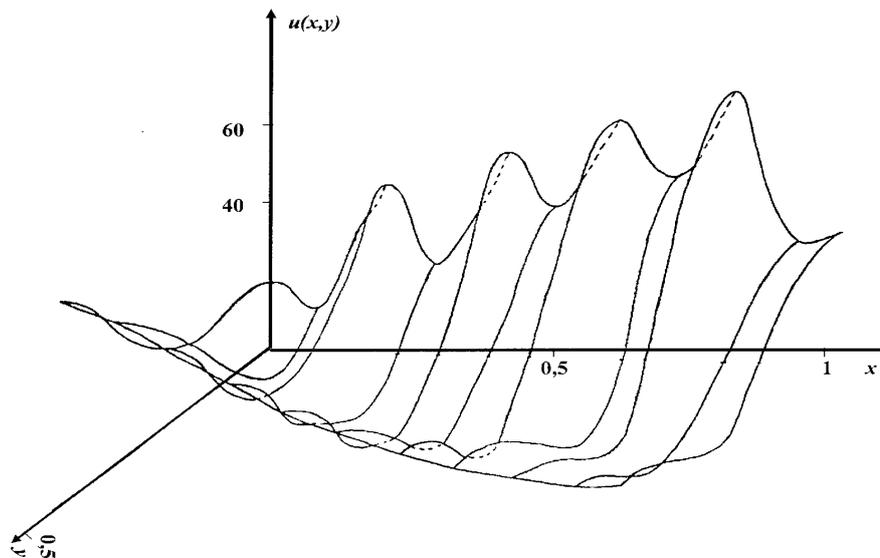


Рис. 3. Распределение температуры в камере сушилки

Из представленных результатов следует, что предложенная модель дает возможность исследовать влияние на распределение температуры таких параметров, как плотность газораспределительной решетки, температура поступающих газов, геометрические размеры сушильного аппарата, и обосновывать их рациональные значения при проектировании технологического оборудования.

Экспериментальные исследования выполнены с целью дальнейшего сравнительного анализа и установления степени адекватности моделей.

В условиях ЦОФ «Колосниковская» проведено исследование параметров процесса сушки угля в кипящем слое с топкой на твердом топливе.

Конкретные технические условия определяются конструкцией каждого сушильного агрегата.

Контролируемые параметры:

- скорость нагнетания псевдоожижающего агента (дымовых газов);
- температура нагнетаемого агента;
- давление и расход тягового дымососа.

Измеряемые величины:

- влажность поступающего на сушку материала;
- влажность материала на выходе сушилки;
- концентрация материала на выходе;
- температура отходящих дымовых газов;
- концентрация пыли.

Технологические схемы определяются согласно конкретным условиям каждой сушилки, тип оборудования определяется техническими возможностями предприятия.

Экспериментальные работы не требуют применения специальных мер безопасности и проводятся с соблюдением обычных требований правил безопасности [5].

Для отработки параметров процесса сушки угля в кипящем слое под разрежением ГП «УкрНИИУглеобогащение» проведены исследования, на основании которых был выполнен проект опытно-промышленной установки с топкой на твердом топливе. Проектная производительность установки по испаренной влаге до 10, а по исходному углю до 100 т/ч. Сушильная установка смонтирована на ЦОФ «Колосниковская» и скомпонована с топкой и системой пылеулавливания. Технологическая схема установки показана на рис. 4.

Теплоноситель из слоевой угольной топки 1, оборудованной решеткой БЦРМ 2000×6500 по борову 2 подается под газораспределительную решетку сушильной камеры 3. Влажный материал через шлюзовую затвор 4 с помощью разбрасывателя 5 равномерно распределяется по сечению сушильной камеры. Приведенный в псевдооживленное состояние материал подсушивается и разгружается через шибер донной разгрузки 6 и шлюзовую затвор 7 на конвейер сухого продукта 8.

Отработанный теплоноситель отсасывается высоконапорным дымососом 9 через систему пылеулавливания - разгрузочную камеру 10, сухой пылеуловитель 11 и мокрый пылеуловитель 12. В период розжига топки и во время остановки агрегата выброс горячих газов в атмосферу осуществляется через растопочную трубу 13. Во время остановок сушильная камера отключается от топки с помощью отсекающегошибера 14.

Сушильная камера представляет собой сварную конструкцию диаметром 2,5 м, расширяющуюся по высоте. Отношение высоты сепарационной зоны к диаметру камеры принято равным единице. В зоне подвода теплоносителя камера футерована шамотным кирпичом. Газораспределительная решетка провального типа укладывается на опорную металлоконструкцию, состоящую из балок, изготовленных из жаростойкого металла и установленных в обмуровке с зазором для температурного расширения.

Для поддержания необходимой высоты слоя и разгрузки высушенного продукта в камере имеется переливающий порог, позво-

ляющий поддерживать высоту слоя 570-800 мм. На уровне газораспределительной решетки установлен поворотный шибер донной разгрузки, предназначенный для удаления слоя угля при остановках сушки. Во время пуска и остановок в камеру через форсунки 15 передается тонкораспыленная вода.

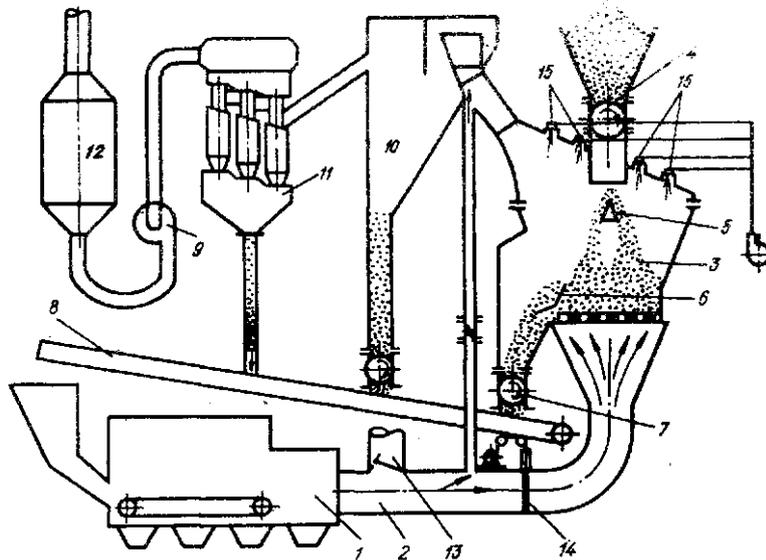


Рис. 4. Схема цепи аппаратов сушильной установки ЦОФ «Колосниковская».

В качестве шлюзовых затворов на подаче влажного материала и выгрузке продукта использованы скребково-барабанные питатели производительностью 150 т/ч.

Для обеспечения стабильной работы установки существующий дымосос Д15,5 Хабаровского завода «Энергомаш» был реконструирован по современной экономичной модели МО ЦКТИ с загнутыми назад лопатками под углом 40° и узким колесом. Реконструкция предусматривала увеличение напора дымососа до 900 кгс/м^2 и заключалась в изменении конструктивных элементов колеса, геометрии улитки, всасывающей воронки и ходовой части, а также в увеличении скорости рабочего колеса до 1500 об/мин.

Во время испытаний на сушку подавались флотационный концентрат и смесь флотационного и мелкого концентратов в соотношении 1:1. Гранулометрический состав смеси следующий: $> 6 \text{ мм}$ – 3,5%; 3-6 мм – 12%; 1-3 мм – 28,8%; 0,5-1 мм – 19,4%; $< 0,5 \text{ мм}$ – 36,3%. Испытания подтвердили предусмотренные проектом аэродинамические параметры.

Установка работала в режиме работы фабрики в течение тысячи часов, при этом было просушено более 100 тыс. т концентрата. Пока-

затели работы сушильной установки приведены в табл. 1.

При исследовании параметров на математической модели показатель влажности соответствует показателю концентрации вещества, распределение поля концентраций определяется в результате моделирования. Данные, полученные в результате моделирования, приведены в табл. 2. В колонке «Концентрация» приведена величина концентрации твердой фазы, в скобках указана соответствующая влажность.

Анализ данных, приведенных в таблицах 1 и 2, показывает, что расхождение результатов моделирования и соответствующих технологических показателей находится в пределах от 8% до 17%.

Таблица 1 - Показатели работы сушильной установки

Производительность			влажность, %		температура, град.			разрежение, кгс/м ³			сопротивление, кгс/м ²
по исходному углю, т/ч	по испаренной влаге		до сушки	после сушки	под решеткой	в топке	перед дымососом	в топке	под решеткой	перед дымососом	
	фактическая, т/ч	удельная, т/м ³									
80	11,2	2.24	19,8	6,7	690	685	76	4	18	700	350
110	8.8	1.76	15.6	8,3	550	620	72	5	19	710	390
115	11.1	2.22	6.0	7,0	700	740	75	5	13	680	360
120	9.5	1.90	6,2	9,0	620	660	72	3	17	720	390
130	9,1	1.82	12,5	5.9	600	640	68	5	18	715	350

Таблица 2 - Результаты моделирования процесса

№ опыта	Концентрация тв. фазы (влажн.), %		Температура, град.		
	до сушки	после сушки	под решеткой	в поле камеры	на выходе из сушилки
1	80(20)	93 (7)	700	90 95 70	75
2	85 (15)	93 (7)	550	75 80 60	70
3	85 (15)	94 (6)	700	90 95 70	75
4	85 (15)	92 (8)	650	80 85 65	70
5	88 (12)	94 (6)	600	75 80 65	70

Сравнение полученных результатов с показателями работы сушильной установки ОФ Днепродзержинского КХЗ, проведенное ГП «УкрНИИУглеобогащение», показывает, что независимо от вида топлива, используемого для получения теплоносителя и способа его подвода в сушильную камеру, удельная производительность установки по испаренной влаге составляет 1,8-2 т/м² по исходному углю – 20-25 т/м², суммарное сопротивление слоя и решетки 350-400 кгс/м², а температура слоя 65-80°.

Таким образом, промышленные испытания установки для сушки угля в кипящем слое на ЦОФ «Колосниковская» подтвердили возможность компоновки сушилок такого типа с топками, работающими на твердом топливе, а полученные в различных условиях одинаковые удельные показатели подтверждают моделируемость этого процесса, т.е. возможность применения детерминированных моделей процесса с распределенными параметрами на основе уравнений математической физики.

Выводы. Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований процесса сушки в «кипящем слое» в условиях ЦОФ «Колосниковская» и математического моделирования показывает, что математические модели детерминированного типа, представляющие технологию сушки как систему с распределенными параметрами, адекватно отражают процесс и могут быть использованы для дальнейших исследований и при проектировании сушильного оборудования с использованием способа «кипящего слоя».

Список литературы

1. Филиппов В.А. Конструкция, расчеты и эксплуатация устройств и оборудования для сушки минерального сырья / В.А.Филиппов. – изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: «Недра», 1989. – 309 с.
2. Дулиенко С.Г. Динамика конверсии днепроовского бурого угля в кипящем слое / С.Г. Дулиенко, А.В. Косячков, Н.В. Чернявский // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2005. – № 5. – С. 3-12.
3. Павлыш В.Н. Математическое моделирование динамических характеристик процесса сушки обогащенных углей / В.Н.Павлыш, И.В.Тарабаева // «Вісник Криворізького технічного університету»: Збірник наукових праць. – 2006. – Вип. 14. – С. 170 – 174.
4. Павлыш В.Н. Математическое моделирование процесса обезвоживания увлажненной горной массы / В.Н.Павлыш, И.В.Тарабаева // Физико-технические проблемы горного производства: Сб. научн. трудов. «Кинетика и термодинамика физических процессов в горном массиве». – 2009. – Вып. 12. – С. 103 – 107.
5. Руководство по проектированию угольных шахт. Государственный нормативный акт об охране труда. – К., 1994.

Стаття надійшла до редакції 24.09.2012

І.В. Тарабаєва. Донецький національний технічний університет

Ідентифікація математичних моделей сушки сипких матеріалів в «киплячому шарі». *Представлені результати порівняльного аналізу теоретичних і експериментальних досліджень процесу сушки в «киплячому шарі» в натурних умовах.*

Ключові слова: процес, параметр, технологія, модель.

I. Tarabayeva. Donetsk National Technical University

Identifying Mathematical Models of Drying Bulk Materials in a “Boiling Layer”. *The results of comparison analysis of theoretical and experimental studies of the drying process in a “boiling layer” in natural conditions are considered.*

Keywords: process, parameter, technology, model.