

УДК 662.641.047

СНЕЖКИН Ю.Ф., КОРИНЧУК Д.Н.

Ин-т технической теплофизики НАН Украины

МОДЕЛЬ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКИ СФЕРИЧЕСКИХ ТОРФЯНЫХ ЧАСТИЦ И ЕЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

Представлено спрощену модель ви-
сокотемпературної сушки сферичних
торф'яних часток та результати її експе-
риментального підтвердження.

Представлена упрощенная модель
высокотемпературной сушки сфериче-
ских торфяных частиц и результаты ее
экспериментального подтверждения.

The reductive mathematical model of
high temperature drying of peat particles
and its experimental confirmation results
are presented.

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;
 L – теплота парообразования Дж/кг;
 R – радиус частицы, м; ξ – радиус фронта испаре-
ния, м;
 r – локальный радиус частицы, м;
 t – температура, $^{\circ}\text{C}$;
 U – влагосодержание, кг вл./кг с.в.;
 α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$;

λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Дж}/\text{м}\cdot\text{с}\cdot^{\circ}\text{C}$;
 ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 τ – время, с;

Индексы:

i – порядковый номер итерации;
 $ст$ – стенка частицы;
 $о$ – начальное;
 $ср$ – среды.

Введение

В последнее время наблюдается рост цен на традиционные энергоносители – нефть и природный газ. Сегодня становится актуальным использование альтернативных и нетрадиционных восстанавливаемых источников энергии. Особенно это касается Украины, которая находится в настоящее время в состоянии энергетической необеспеченности. Известно, что Украина покрывает 53 % энергопотребления своими топливно-энергетическими ресурсами [1]. Поэтому огромное значение приобретает использование местных видов топлив, в том числе торфа.

Одним из направлений повышения эффективности торфобрикетного производства является совершенствование технологических процессов и оборудования. Особого внимания в этом отношении заслуживает искусственная сушка фрезерного торфа, от интенсивности которой в значительной степени зависит качество и себестоимость конечного продукта.

В настоящее время на торфобрикетных заводах (ТБЗ) Украины эксплуатируется несколько типов сушилок, использующих в качестве теплоносителя пар, нагретую воду или высокотемпературные топочные газы. Из них наиболее перспективны пневмогазовые сушилки (ПГС), которые более просты в изготовлении и не требуют сложного энергетического оборудования. Основным и общим недостатком существующих конструкций ПГС является сравнительно невысокая интенсивность тепло- и массообменных процессов, что увеличивает их габариты и расход тепла на сушку. Основные требования, предъявляемые к сушилке, состоят в том, что влагосодержание торфа не должно превышать 0,2 кг/кг а влагоразность отдельных фракций – 0,15 кг/кг с. в. Как показывает практика [2], большинство сушилок являются достаточно энергоемкими, и тем не менее, не обеспечивают нужного качества сушенки. Все это снижает эффективность работы ТБЗ,

оснащенных ПГС и сдерживает их широкое практическое использование.

Поэтому исследования по интенсификации процесса пневмогазовой сушки фрезерного торфа и созданию наиболее рациональной конструкции ПГС для торфобрикетного производства представляет собой большой практический и научный интерес.

Цели исследования

Процессы сушки торфа зависят от многих факторов: скорости и температуры газа-теплоносителя и его расхода; фракционного состава и влажности фрезерного торфа; условий внешнего и внутреннего теплообмена. Для детального анализа и оценки различных методов интенсификации сушки необходима математическая модель, описывающая теплообмен влажной частицы с высокотемпературным газом. Целью данной работы является разработка модели, описывающей теплообмен влажной частицы с высокотемпературным газом и определение ее корректности на основе экспериментальных исследований.

Физическая модель сушки сферических частиц

В общем случае исследование сушки пористого тела связано с решением весьма сложной задачи движения двухфазной газожидкостной смеси при наличии фазового перехода и одновременного переноса тепла в трехфазной системе. Эта задача нелинейная в связи с зависимостью коэффициентов в уравнениях движения и конвективной теплопроводности (например, проницаемости пористого тела для обеих движущихся фаз, эффективного коэффициента теплопроводности и т. п.) от температуры, влагосодержания и других неизвестных величин. Задача еще более усложняется необходимостью учета кинетики фазового превращения и межфазового теплообмена, капиллярных явлений, вызывающих перетекание жидкости из крупных пор в мелкие, а также явлений десорбции или перехода химически связанной жидкости в свободное состояние. Строгая теория сушки отсутствует, и имеются лишь попытки дать полуфеноменологическое описание этого процесса. Упрощенные модели сушки такого типа предложены в работах [3,4]. Однако эти модели также содержат большое число неизвестных величин, входящих в нелинейные

дифференциальные уравнения, решения которых могут быть получены лишь в частных случаях и имеют весьма громоздкий вид затрудняющий их практическое использование.

Вместе с тем в ряде случаев такие факторы, как, например, адсорбционно связанная влага, перемещение жидкости в порах и другие, несущественны, так что могут быть предложены вполне обозримые модели таких процессов, позволяющие получить корректные результаты, достаточные для практических целей. По аналогии с процессами, связанными с движением границ фазового раздела, можно предположить, что испарение жидкости осуществляется главным образом в узкой зоне, распространяющейся по мере сушки в глубь материала и разделяющей области, занятые паром и жидкостью. Ширина зоны испарения определяется характерным размером пор, капиллярными силами, вызывающими перераспределение жидкости в порах разных размеров, а также соотношением между теплом, затрачиваемым на нагрев тела и жидкости во «влажной» области, и теплом, идущим на испарение. При определенных условиях ширина зоны испарения оказывается значительно меньше характерного размера высушиваемого тела, так что эту зону можно заменить фронтом испарения пренебрежимо малой толщины.

Заметим, что расплыванию фронта испарения способствует увеличение среднего размера пор и дисперсия распределения пор по размерам, рост поверхностного натяжения жидкости и теплопроводности сухого пористого тела.

При пневмогазовой сушке испарение влаги из материала происходит в среде высокотемпературных газов. Рассмотрим сушку сферической частицы радиуса R , в которой сформировался фронт испарения $\xi = f(\tau)$ (рис. 1). Предположим, что при углублении фронта испарения материал делится на две области «сухую» и «влажную». В сухой области перемещается только пар, во влажной влагосодержание остается неизменным и равно начальному.

Учитывая что для высокотемпературных процессов характерное время τ соизмеримо со временем тепловой релаксации или значительно меньше его, распределение температур в сухой области $\xi(\tau) \leq r \leq R$ описывается уравнением нестационарной теплопроводности:

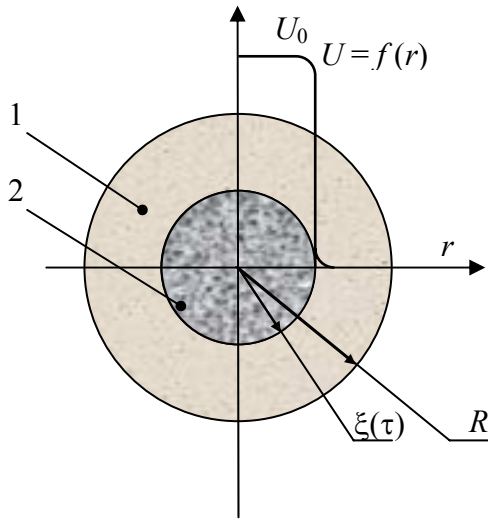


Рис. 1. Распространение фронта испарения в сферической частице: 1 - сухая область; 2 - влажная область.

$$a \left(\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dt}{dr} \right) = \frac{dt}{d\tau}; \quad (1)$$

с граничными условиями:

$$\lambda \frac{dt}{dr} \Big|_{r=R} = \alpha [t_{cp}(\tau) - t(R, \tau)]; \quad (2)$$

$$t(r) \Big|_{r=\xi} = t_f.$$

(3)

Уравнение баланса теплоты и влаги в пределах фронта испарения:

$$4\pi\xi^2\lambda \frac{dt}{dr} = 4\pi\xi^2 L \cdot U_0 \cdot \rho \frac{d\xi}{d\tau}; \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, учитывающий явления термодиффузии, конвективные токи в порах, теплоперенос парами воды.

Система уравнений решается методом конечных разностей по явной схеме:

$$a \left(\frac{T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k}{\Delta r^2} + \frac{2}{r} \frac{T_{i+1}^k - T_i^k}{\Delta r} \right) = \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta \tau}; \quad (5)$$

Граничные условия:

$$\lambda \frac{T_{ст}^{k+1} - T_1^k}{\Delta r} = \alpha(T_{ст}^k - T_{ст}^{k+1}); \quad (6)$$

$$T_{n+1}^{k+1} = t_f. \quad (7)$$

Уравнение баланса теплоты и влаги в пределах фронта испарения:

$$\lambda \frac{T_n^k - T_f}{\Delta r} = L \cdot U_0 \cdot \rho \frac{\Delta \xi}{\Delta \tau}. \quad (8)$$

Температура в точке предшествующей точке фронта при движении фронта определяется интерполяцией по неявной схеме:

$$T_n = \frac{(T_f \cdot \frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{\xi \Delta r} + \frac{1}{a \Delta \tau}) + T_{i-1}^{k+1} (\frac{1}{\Delta r^2} - \frac{1}{\xi \Delta r})}{\frac{2}{\Delta r^2} + \frac{1}{a \Delta \tau}}. \quad (9)$$

Экспериментальные исследования и их результаты

Решение поставленной задачи осуществлялось комплексным методом включающим экспериментальные и аналитические исследования. Была составлена программа решения системы уравнений. При определении коэффициента теплоотдачи использовались критериальные уравнения предложенные в [5]. Коэффициент теплопроводности определялся по данным [6].

Исследования проводили на экспериментальном стенде, рабочая камера которого представлена на рис. 2. В опытах использовался торф низинного типа степенью разложения 30...35 %. Плотность сухой части 200...350 кг/м³. Исходное влагосодержание 1 кг/кг с.в. Из торфа формовались образцы сферической формы диаметром 5...8 мм. Образец 2 крепился на игле 3, взвешивался, устанавливался в штатив и помещался в рабочую камеру на весы. Проводилась тарировка. В ходе эксперимента измерялась убыль массы шаров. Температура теплоносителя изменялась в пределах 120...150°С. Скорость теплоносителя составляла 4 м/с.

На рис. 3 приведено сравнение результатов экспериментальных данных и данных, полученных в результате расчета по математической модели.

Выводы

В результате проведенных исследований разработана модель сушки частиц торфа высокотемпературным теплоносителем. Максимальное рас-

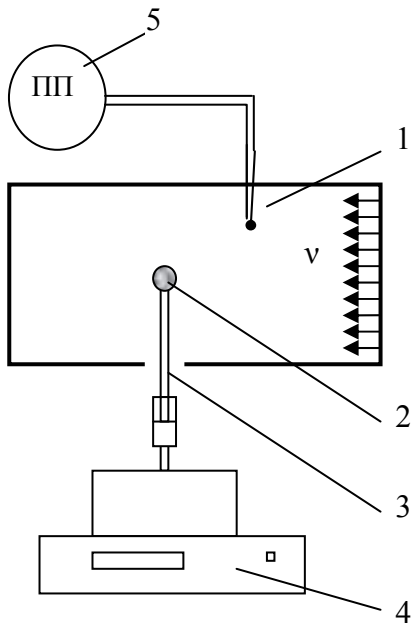


Рис. 2. Рабочий участок экспериментального стенда. 1 – сушильная камера; 2 – образец; 3 – игла в штативе; 4 – весы цифровые AD500; 5 – потенциометр.

хождение не превышает 10% среднестатистическое отклонение не более 3%, что позволяет сделать вывод о достаточной точности описания процесса сушки данной моделью и возможности ее применения для практических целей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Материалы научно-практического семинара "Комплексный подход к использованию местных видов топлив". - Житомир.- 2003.
2. Наумович В.М. Искусственная сушка торфа. М.: Недра, 1984.- 222 с.

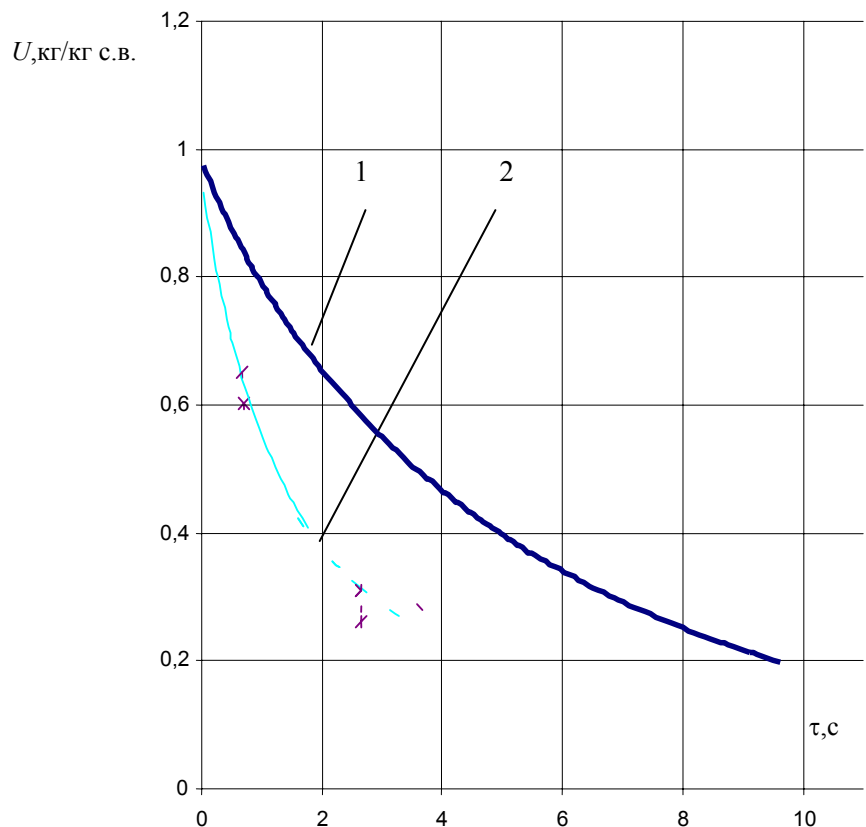


Рис. 3. Зависимость влагосодержания образца от времени сушки.

■ – экспериментальные данные для образца $d = 7$ мм $t = 120$ °С, ж – экспериментальные данные для образца $d = 7$ мм $t = 150$ °С. Рассчитанные согласно математической модели: 1 – $t = 120$ °С, 2 – 150 °С.

3. Лыков А.В. Теория сушки.- М: Энергия, 1968.
4. Бабенко В.Е., Буевич Ю.А., Шепчук Н.М. Квазистационарный режим сушки сферической частицы// Теоретические основы химической технологии.- Т. 9.- № 2 – М.: "Наука", 1975.- С. 274- 277.
5. Федосов С.В., Лебедев В.Я. Теплообмен между газом и дисперсным материалом// Реология, процессы и аппараты химической технологии.- М.- 1984.- С. 23-38.
6. Справочник по торфу. М.: Недра, 1982.- 760 с.

Получено 11.10.2004 г.