

ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ ВАКУУМ-ИМПУЛЬСНОЙ СУШКИ НА ПРИМЕРЕ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ

И.В. Попова, Ю.В. Родионов, А.А. Букин, Д.А. Шацкий

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Ключевые слова и фразы: вакуум-импульсная сушка; интенсивность процесса; продувка; релаксируемый градиент; фильтрационное движение; циклический метод.

Аннотация: Рассмотрены и проанализированы достоинства сушки конвективным вакуум-импульсным способом для активированных углей, по сравнению с конвективным способом сушки, широко используемым в химической промышленности.

Обозначения: c – удельная теплоемкость влаги, Дж/(кг·К); r – удельная теплота парообразования, Дж/(кг·К); t_0 – температура сухого материала, °С; t_c – температура греющего газа, °С; t_n – температура поверхности материала, °С; $t_{ц}$ – температура внутри материала, °С; α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К); ρ_0 – плотность сухого продукта, кг/м³.

Введение

В настоящее время в зависимости от сырья, качества готового продукта и скорости течения процесса используют различные виды сушки: конвективную, контактную, сублимационную, токами высокой частоты (СВЧ) и так далее. Все способы сушки имеют свои особенности. Для получения наилучших результатов проводят комбинированные процессы, например, СВЧ и конвективная сушка, конвективная вакуум-импульсная (КВИ) сушка, контактная и конвективная сушка и так далее.

Механизм внешнего тепло- и массопереноса в процессах КВИ сушки существенно отличается от других процессов сушки особенностями течения, математическим описанием, качеством готового продукта (строение, свойства, состав). При экспериментальной отработке различных режимов

Попова И.В. – ассистент кафедры «Теория машин, механизмов и детали машин», e-mail: aniri1901@yandex.ru; Родионов Ю.В. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория машин, механизмов и детали машин», e-mail: rodionov.u.w@ Rambler.ru; Букин А.А. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Переработка полимеров и упаковочное производство»; Шацкий Д.А. – студент, e-mail: shatskiy.tmb@ Rambler.ru, ТамбГТУ, г. Тамбов.

сушки объект исследования должен обладать стабильным фракционным составом, что позволяет проводить эксперимент с высокой степенью воспроизводимости. Для проведения опытов был выбран активированный уголь марки AR-1, представляющий собой зерна черного или темно-серого цвета, с конечной массовой долей влаги не более 3 %, с суммарным объемом пор не менее $0,7 \text{ см}^3/\text{г}$. Данный материал нашел широкое применение в качестве сорбентов при регенерации различных растворителей, в производстве различных средств защиты органов дыхания и в других областях. Для активированного угля характерны следующие виды физической адсорбции: для микропор, размер которых менее 3 мкм, главным образом преобладает механизм объемного заполнения; в изопорах, размер которых от 3 до 200 мкм происходит моно- и полимолекулярная адсорбция, и частично капиллярная конденсация; макропоры более 200 мкм выполняют транспортную функцию [1]. Для отработки режимов сушки активированного угля была изготовлена экспериментальная установка.

Описание экспериментальной установки и эксперимента

Установка КВИ (рис. 1) состоит из электродвигателя 1, двухступенчатого жидкостнокольцевого вакуумного насоса 3 с автоматической регулировкой проходного сечения нагнетательного окна [4]. Емкости 4 и 5 предназначены для подачи и отвода жидкости от насоса, ресивер 7 служит для увеличения скорости откачки. Кран 6 предотвращает попадание жидкости из двухступенчатого жидкостнокольцевого вакуумного насоса 3 в ресивер 7 при выключении. Краны 2 и 9 необходимы для избегания потерь вакуума в ресивере. Вакуумметр 8 стоит на выходе из ресивера 7, позволяя получать действительную информацию о вакууме, создаваемом насосом.

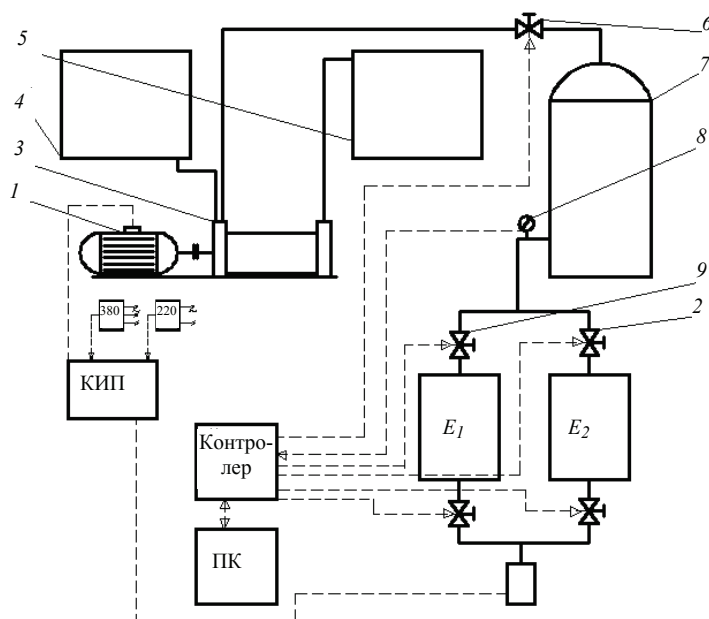


Рис. 1. Конвективная вакуум-импульсная сушилка

Экспериментальная установка оснащена датчиками давления и температуры. Соотношение времени выдержки под вакуумом и времени продувки изменяем пропорционально уменьшению влажности материала.

Конвективную вакуум-импульсную сушку целесообразно проводить циклическим методом, где каждый цикл включает стадию продувки [3] высушиваемого объекта горячим воздухом (1 стадия), во время которой в сушильную камеру подается предварительно нагретый воздух, и стадию вакуумирования (2 стадия), во время которой подача горячего воздуха прекращается и в сушильной камере создается вакуум. Температура воздуха для конвективной вакуум-импульсной сушки и для сушки обычным конвективным способом одинаковая.

На первой стадии происходит удаление поверхностной влаги при температуре мокрого термометра: градиент температуры направлен противоположно направлению переноса влаги, градиент концентрации влаги совпадает с направлением процесса переноса влаги, градиент давления равен нулю [2]. На второй стадии градиенты температуры, давления и концентрации влаги совпадают с направлением процесса. Чередование стадий, то есть цикличность, позволяет интенсифицировать процесс, не достигая равновесного состояния и исключая перегрев материала. Цикл осуществляем следующим образом: высушиваемый слой угля толщиной 2–3 мм продували воздухом, имеющим температуру 60...75 °С в течение 2 мин, выдерживали под вакуумом при остаточном давлении 7...4 кПа в течение 8 мин. Затем операции повторялись. Продувку осуществляем за счет перепада давления, получаемого при открытии клапана.

На первой стадии (конвективная сушка угля) массопередача между твердой фазой и движущейся парогазовой фазой складывается из двух процессов:

- перемещение влаги внутри пор твердого тела к поверхности раздела фаз;
- перенос влаги в газовую фазу путем внешней массопередачи.

Математическое описание процесса КВИ сушки

Процесс сушки ускоряется за счет комбинации конвективной и вакуум-импульсной стадии и его можно назвать высокоинтенсивным. В данном процессе внутри влажного тела возникает давление парогазовой смеси, превышающее давление влажного воздуха в окружающей среде (барометрическое давление). Наличие такого медленно релаксируемого градиента давления вызывает молярное движение парогазовой смеси по типу фильтрации. Наложенное фильтрационное движение парогазовой смеси на капиллярно-диффузионный перенос влаги приводит к перестройке механизма переноса и связанной с ней существенной интенсификации процесса.

Интенсивность конвективной сушки определяется следующим простым соотношением, представляющим собой балансовое уравнение тепла

$$\alpha(t_c - t_n) = rj_n + c\rho_0 R_g \frac{d\bar{t}}{d\tau}, \quad (1)$$

где j_n – интенсивность сушки материала, кг/(м²·с); R_g – отношение объема тела к площади его поверхности (гидравлический радиус), м³/м².

Одним из путей интенсификации конвективной сушки является увеличение температуры t_c газа. В результате создается значительный перепад температур, обеспечивающий интенсивную сушку. Разница между температурой поверхности и центра тел в период постоянной скорости равна

$$t_{\text{п}} - t_{\text{ц}} = (t_c - t_0) \frac{1}{2} K_{i_m} \varepsilon K_o L_u, \quad (2)$$

где K_{i_m} – массообменный критерий Кирпичева, $0 < K_{i_m} < 2$; K_o – критерий Коссовича, характеризующий изменение температуры материала в зависимости от его влагосодержания; L_u – критерий Лыкова, характеризующий интенсивность распространения влаги в теле по отношению к распространению тепла; ε – критерий фазового превращения, характеризующий величину испарения влаги внутри материала, $0 < \varepsilon < 1$; при $\varepsilon = 0$ – изменение влагосодержания происходит только за счет испарения влаги; $\varepsilon = 1$ – изменение влагосодержания происходит только за счет перемещения жидкости к границе двух сред (материал – сушильный агент).

Основным критерием переноса влаги в процессе сушки является критерий K_{i_m} . С увеличением интенсивности j_n критерий K_{i_m} увеличивается. Причем интенсивность j_n или общий поток влаги внутри материала равен:

$$j_n = a_m \rho_0 \nabla C - a_m^T \rho_0 \nabla T - k_p \nabla p \quad (3)$$

или

$$j_n = a_m \rho_0 \frac{\partial C}{\partial x} - a_m^T \rho_0 \frac{\partial T}{\partial x} - k_p \frac{\partial p}{\partial x};$$

где a_m – коэффициент диффузии влаги, $\text{м}^2/\text{с}$; a_m^T – коэффициент термодиффузии влаги, $\text{м}^2/\text{с}$; k_p – коэффициент фильтрационного переноса влаги; x – линейный параметр материала (длина), м ; $\frac{\partial C}{\partial x}$ – изменение влагосодержания по длине; $\frac{\partial T}{\partial x}$ – изменение температуры по длине; $\frac{\partial p}{\partial x}$ – изменение давления внутри материала по длине.

Последний член в уравнении (3), характеризующий молярный перенос влаги под влиянием градиента давления, при сушке нагретым воздухом с $t_c < 120^\circ\text{C}$ обычно отсутствует $p = \text{const}$. Вакуум, периодически создаваемый в емкости позволяет жидкости, находящейся в капиллярах активированного угля, кипеть, а, следовательно, испаряться при пониженной температуре (от 0 до 15°C), что способствует кипению и испарению влаги, исключая перегрев материала и создавая дополнительный перенос влаги за счет гидродинамического (фильтрационного) движения пара или жидкости.

Результаты и выводы

В результате проведенного эксперимента было отмечено повышение интенсивности удаления влаги из активированного угля (рис. 1) без его перегрева, общее уменьшение времени сушки без увеличения энергетических

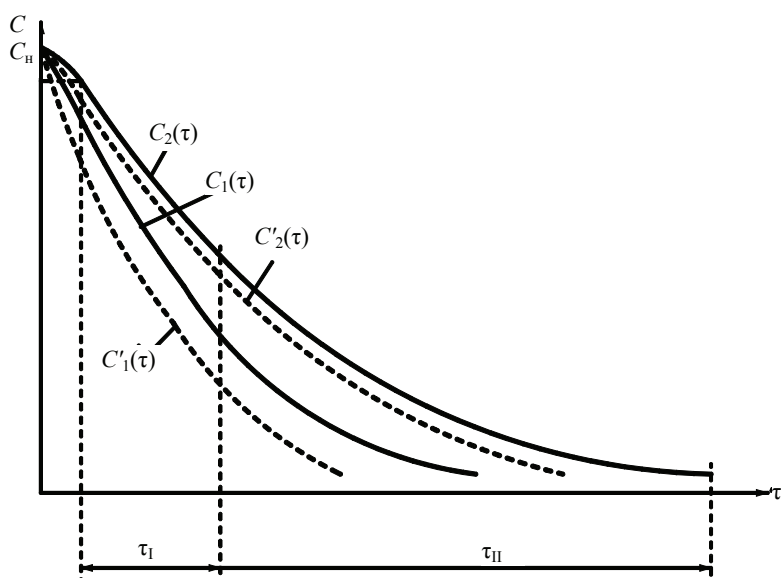


Рис. 1. Кривые скорости сушки активированного угля: $C_1(\tau)$ – скорость конвективной сушки активированного угля, пропитанного водой; $C_2(\tau)$ – скорость конвективной сушки активированного угля, пропитанного раствором солей; $C'_1(\tau)$ – скорость КВИ сушки, активированного угля, пропитанного водой; $C'_2(\tau)$ – скорость КВИ сушки, активированного угля, пропитанного раствором солей

Таблица 1

Сравнительная характеристика (временная) метода конвективной вакуумимпульсной и конвективной сушки в кипящем слое

№ опыта	Вид сорбента AR-1	Время при вакуум-импульсной сушке, мин			Время при конвективной сушке, мин
		продувки	вакуумирования	общее	
1	Пропитанный водой	2,0	8,0	80	124
2	Пропитанный раствором солей	0,5	3,5	128	156

затрат, снижение которых обусловлено включением в экспериментальную установку энергосберегающего двухступенчатого жидкостнокольцевого вакуумного насоса (табл. 1).

Сушка активированного угля AR-1 производилась в первом случае (опыт № 1) до влажности менее 1 %, во втором случае (опыт № 2) до влажности менее 3 %. Анализируя данные в таблице, можно сделать общий вывод о преимуществе вакуум-импульсной технологии: время сушки уменьшается на 55 % в первом случае, и на 21,8 % во втором.

Список литературы

1. Бутырин, Г.М. Высокопористые углеродные материалы / Г.М. Бутырин. – М. : Химия, 1976. – 526 с.
 2. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 471 с.
 3. Дмитриев, В.М. Кинетика и аппаратное оформление процесса конвективной сушки гранулированных и пленочных материалов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 23.10.03 / В.М. Дмитриев. – Тамбов, 2001. – 16 с.
 4. Пат. 2303166 Российская Федерация, МПК F 04 C 15/00. Жидкостно-кольцевая машина с автоматическим регулированием проходного сечения нагнетательного окна / Волков А.В., Воробьев Ю.В., Никитин Д.В., Попов В.В., Свиридов М.М.; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2005116616 ; заявл. 20.06.2006 ; опубли. 20.07.2007, Бюл № 20. – 6 с.
-

Process Intensity Increase of Convective Vacuum Impulse Drying Illustrated by Activated Charcoal

I.V. Popova, Yu.V. Rodionov, A.A. Bukin, D.A. Shatsky

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: vacuum impulse drying; process intensity; blowing; relaxed gradient; cyclical method; filtration movement.

Abstract: The paper considers and analyzes the advantages of convective vacuum impulse drying for activated charcoal opposed to convective drying which is widely used in chemical industry.

© И.В. Попова, Ю.В. Родионов,
А.А. Букин, Д.А. Шацкий, 2010

ДЛЯ ЗАМЕТОК
