

# ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ НАГРЕВА И СУШКИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.С. Левина

*Исследован процесс нагрева и сушки пористых материалов в условиях воздействия постоянной температуры. Рассмотрено влияние температуры среды на скорость нагрева изделий из растительного полимера. В результате проведенного исследования определены теплофизические свойства продукта в виде штучных изделий полученных методом экструзии. Разработана методика определения влажности продукта и скорости его сушки. Получены зависимости влажности продукта от времени нагревания его в сушилке и скорости сушки от влажности изделий изготовленных из полимерного материала.*

Процесс сушки имеет большое значение в различных отраслях промышленности при получении порошкообразных и гранулированных материалов, а также при формовании изделий методом экструзии. Сушка позволяет увеличить срок хранения материалов (изделий), повысить их качество и уменьшить массу транспортируемого продукта.

В сушильной технике влажные материалы принято разделять на три группы: капиллярно-пористые, коллоидные и коллоидные капиллярно-пористые [1]. Капиллярно-пористые материалы при удалении из них влаги практически не деформируются, коллоидные изменяют свои размеры при сушке, капиллярно-пористые коллоидные тела обладают промежуточными свойствами.

Связь влаги с материалом является одной из наиболее важных характеристик при рассмотрении процесса сушки. На величину этой связи влияет дисперсность, структура и физико-химические свойства материала. По указанным признакам, согласно определению А. В. Лыкова [2], все влажные материалы следует отнести к связно-дисперсным системам, т. е. к капиллярно-пористым коллоидным телам, различающимся своими коллоидно-физическими свойствами.

К капиллярно-пористым коллоидным телам относятся материалы, в которых жидкость имеет различные формы связи, присутствующие как капиллярно-пористым, так и коллоидным телам. Для этих материалов характерны свойства первых двух видов, стенки их капилляров эластичны и при поглощении жидкости набухают, а при высушивании дают усадку. При сушке влага из пористых материалов удаляется последовательно, сначала из крупных пор, а затем из более мелких.

К кусковым материалам относятся сыпучие продукты с частицами размером более 5 мм (агломераты, гранулы, таблетки). При наличии внутренней влаги кусковые материалы требуют сравнительно много времени для

сушки. Продолжительность и параметры процесса сушки должны строго контролироваться во избежание высокой влажности конечного продукта или чрезмерной пересушки материала, нежелательного растрескивания и разрушения готового продукта. Такие условия обеспечивают сушилки с неподвижным или перемешиваемым слоем материала: полочные (периодического и непрерывного действия), ленточные, шахтные, барабанные, шнековые, роторные и пневматические.

Сушка пористых материалов отличается длительностью процесса и для выбора оптимального режима работы промышленного оборудования довольно часто приходится сталкиваться с необходимостью определения времени сушки конкретного продукта при определенных внешних условиях. Расчётные зависимости, используемые при нахождении производительности сушилки, выборе режимных параметров процесса сушки, требуют использования величин, принимаемых заранее в виде заданных значений или рассчитываемых по эмпирическим уравнениям, которые не учитывают ряд свойств пористого материала, таких как размер пор, их форма, теплопроводность и теплоёмкость материала, скорость нагрева и сушки полученного продукта. Более точные исходные данные необходимые для проектирования оборудования можно получить только в результате эксперимента на натурном продукте при заданных условиях проведения процесса сушки.

Наиболее надёжным методом определения кинетических зависимостей сушки и нагрева влажных материалов является экспериментальное исследование [3]. Внешними параметрами процесса сушки и нагрева являются значения температуры, скорости и влагосодержания сушильного агента. На кривой кинетики сушки можно выделить [4] три участка: прогрева, постоянной скорости (первый период) и падающей скорости (второй период). Период прогрева обычно незначитель-

лен по сравнению с другими периодами сушки. В периоде постоянной скорости сушки интенсивность процесса определяется внешними условиями, в периоде падающей скорости интенсивность удаления влаги зависит от сопротивления влагопереносу внутри материала.

Условие постоянства скорости сушки материала в первом периоде записывается в виде

$$N = -\frac{dU}{d\tau}, \quad (1)$$

где  $U$  – влажность материала, %;  $\tau$  – время, с.

Уравнение для определения скорости сушки во втором периоде имеет вид

$$-\frac{dU}{d\tau} = k(U - U_p) = \chi \cdot N(U - U_p), \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент скорости сушки, 1/с;  $U_p$  – равновесная или конечная влажность, %;  $\chi$  – относительный коэффициент сушки, зависящий от свойств материала, 1/%.

Интегрирование уравнения (2) при начальных условиях, соответствующих наступлению второго периода сушки, позволяет получить экспоненциальную зависимость между влажностью материала и временем.

Рассмотрим процесс конвективной сушки изделий. Примем, что температура поверхности изделия одинаковая. Считаем, что всё тепло от сушильного агента передаётся изделию за счёт конвекции, тогда уравнение теплового баланса будет иметь вид

$$L \cdot c_T (t_1 - t_2) = \alpha \cdot F \cdot \Delta t_{cp}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент межфазного теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $L$  – расход газа, кг/с;  $c_T$  – удельная теплоёмкость газа, Дж/(кг·К);  $t_1, t_2$  – температура газа, соответственно, на входе и выходе из слоя продукта, К;  $F$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{cp}$  – средний температурный напор между газом и материалом, К.

Примем в качестве температурного напора среднегеометрическое значение

$$\Delta t_{cp} = \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{t_1 - t_u}{t_2 - t_u}} = t_{cp} - t_u, \quad (4)$$

где  $t_{cp}$  – средняя температура газа, К;  $t_u$  – температура на поверхности изделия, К.

Подставив уравнение (4) в выражение (3) получим

$$\frac{t_1 - t_u}{t_2 - t_u} = \exp \frac{\alpha \cdot F}{L \cdot c_T}. \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет определить значение эффективного коэффициента теплообмена с учётом гидродинамических режимов процесса конвективной сушки изделий.

На рисунке 1 приведена схема сушилки периодического действия для исследования процессов тепло и массообмена между дисперсными материалами и сушильным агентом. В процессе сушки или охлаждения материала, находящегося в рабочей камере сушилки, контролируется температура теплоносителя и материала, расход сушильного агента, давление в рабочей, сепарационной и газораспределительной камерах сушилки, а также относительная влажность теплоносителя.

Газообразный теплоноситель (воздух) подаётся вентилятором 9 в электрический калорифер 8, нагревается в нём до требуемой температуры и поступает в газораспределительную камеру 2 сушилки. С помощью газораспределительной решётки 5 теплоноситель равномерно распределяется по сечению аппарата, проходит через отверстия поддерживающей решётки 6, поступает в слой материала, взаимодействуя с влажным материалом, забирает из него влагу и через фильтр 10 выводится из сушилки. Проходное сечение решёток выбирается исходя из размеров частиц дисперсного материала.

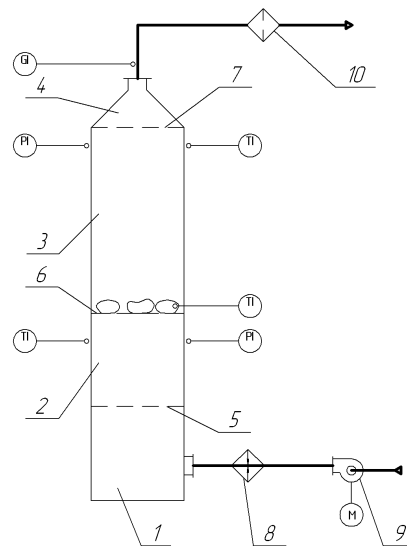


Рис. 1. Схема сушилки:  
1 – камера газоподводящая; 2 – камера газораспределительная; 3 – камера рабочая; 4 – камера сепарационная; 5 – решётка газораспределительная; 6 – решётка поддерживающая материал; 7 – решётка удерживающая материал; 8 – калорифер; 9 – вентилятор; 10 – фильтр

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ НАГРЕВА И СУШКИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

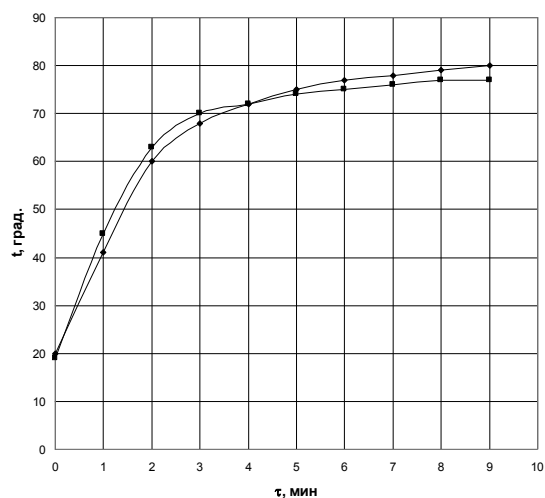
При проведении исследований по удалению влаги из пористых материалов путём центрифугирования и вакуумирования получены результаты, которые показывают, что такие материалы плохо отдают влагу при механическом воздействии, в отличие от гранулированного полиэтилена или полипропилена, и для полного удаления влаги из коллоидного капиллярно-пористого материала требуется длительное тепловое воздействие. Так при вакуумировании влажного поролона в течение 20 минут, остаточное давление в камере составило 0,13 МПа, влажность изделия понизилась на 1,8% с 82,9% до 81,1%.

Температура материала – важный технологический параметр процесса сушки, являющийся функцией многих переменных и зависящий в общем случае от соотношения потока тепла из среды к частице, от переноса тепла внутри неё и от интенсивности испарения влаги [5]. Для определения оптимального режима сушки важно знать не только изменение температуры частицы во времени, но и величину градиента температур. Перепад температур наблюдается даже при сушке тонкодисперсных материалов. Конечная температура материала зависит главным образом от влажности. Расчет нагрева частиц в переменном температурном поле при испарении влаги проводится при следующих допущениях: коэффициент теплообмена не изменяется в процессе сушки; плотность лучистого потока величина постоянная; размер частиц в процессе сушки также не изменяется.

На рисунке 2 приведены зависимости изменения температуры в центральной части изделия, характеризующие нагрев изделия пористой структуры в виде цилиндра газообразным теплоносителем. Данные зависимости позволяют определить градиент температуры по толщине (радиусу) изделия.

Как видно из графика (рис. 2) влажность материала оказывает небольшое влияние на режим нагрева изделия, что, по-видимому, связано с быстрым испарением основного количества влаги из изделия в начальный момент времени и значительной поверхностью теплообмена.

Изменение температуры в изделии при охлаждении показано на рисунке 3. Анализ данной зависимости показывает, что материал практически полностью охлаждается ~ за 4 минуты, значительно быстрее, чем нагревается. Это, по-видимому, связано с более эффективным теплообменом изделий с окружающей средой.



◆ –  $U = 6,3\%$ ; ■ –  $U = 2,8\%$

Рис. 2. Изменение температуры в изделии во времени при его нагревании в сушильной камере

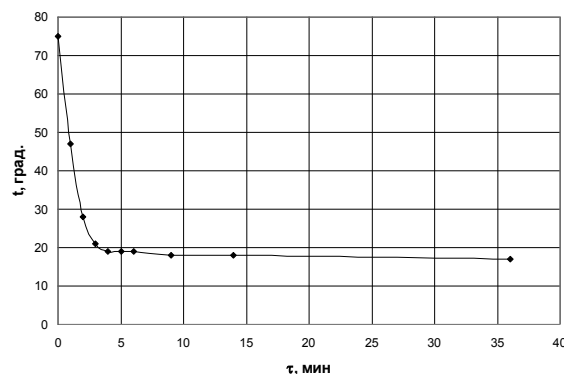


Рис. 3. Изменение температуры в изделии во времени при его охлаждении

При исследовании процесса удаления влаги из пористых материалов были проведены эксперименты по сушке палочек из растительного полимера в сушильном аппарате. В зависимости от времени пребывания изделия в сушилке определялось изменение массы материала во времени. Далее проводился расчет влажности изделия и скорости изменения содержания влаги в продукте. На рисунке 4 представлена полученная во время эксперимента зависимость влажности изделия от времени сушки при температуре теплоносителя в сушильной камере 100 °С.

На рисунке 5 приведена кривая кинетики сушки полученная в процессе нагрева изделий сушильным агентом постоянной температуры. Анализ зависимости показывает, что сушка палочек после испарения основной массы влаги из изделий происходит во втором периоде, т.е. в режиме падающей скорости сушки.

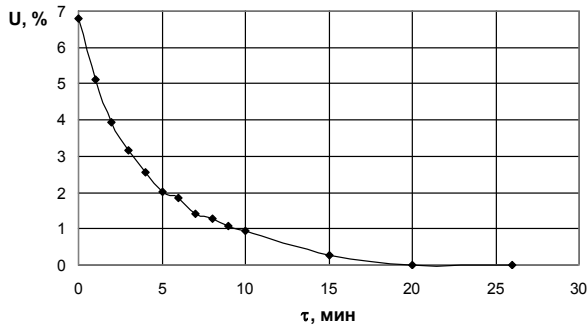


Рисунок 4 – Зависимость изменения влажности изделия от времени сушки при постоянной температуре в сушильном аппарате

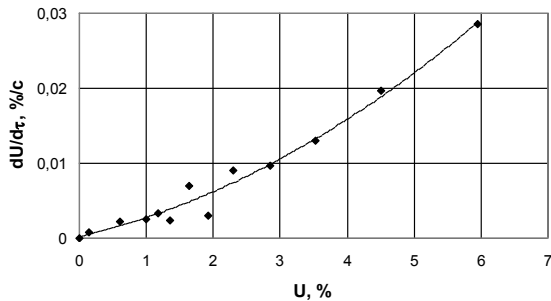


Рисунок 5 – Зависимость скорости сушки от влажности материала

Выразим влажность продукта и время сушки в безразмерном виде. Тогда уравнение, характеризующее зависимость скорости сушки, приведенную на рисунке 5, может быть представлено в следующем виде

$$\frac{dU_c}{d\theta} = 0,0005 \cdot U_c^2 + 0,0021 \cdot U_c + 0,0002,$$

где  $U_c$  – средняя влажность материала;  $\theta$  – время. Коэффициент корреляции составляет 0,9769.

В результате проведенного исследования определены теплофизические свойства пористого продукта, полученного методом экструзии. Разработана методика определения температуры и влажности изделий из растительных полимерных материалов. Получены зависимости, которые позволяют оценить кинетику нагрева и сушки пористого продукта. Разработана конструкция сушилки конвективного типа для исследования процесса сушки дисперсных материалов в периодическом режиме в условиях нагрева изделий газообразным теплоносителем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов. – Л.: Химия, 1987. – 208 с.
2. Лыков А. В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
3. Романков П.Г., Рашковская Н.Б. Сушка во взвешенном состоянии. – Л.: Химия, 1979. – 272 с.
4. Сажин Б.С. Основы техники сушки. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
5. Лыков М. В. Сушка в химической промышленности. – М.: Химия. 1970. – 432 с.