

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.К. Протасов\*<sup>1</sup>, Н.П. Матвейко<sup>1</sup>, А.А. Боровик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный экономический университет, г. Минск

<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический университет, г. Минск

Описана методика расчета продолжительности сушки дисперсных материалов. Изображены опытные кинетические кривые сушки слоя дисперсного материала. Получены расчетные зависимости для скорости сушки в первом периоде, критического и приведенного критического влагосодержания материала от скорости сушильного агента. Рассчитано время сушки в первом и втором периодах и общая продолжительность сушки слоя дисперсного материала. Выполнено сравнение расчетных и опытных значений.

## Введение

Время, за которое дисперсный материал достигает конечного влагосодержания, зависит от кинетики сушки при конкретных условиях. Надежные результаты по кинетике сушки для полидисперсных частиц неправильной формы могут быть получены только экспериментальным путем. Результаты опытов обычно представляют в виде графической зависимости среднего по объему влагосодержания дисперсного материала от времени сушки, которую называют кривой сушки. Используя кривую сушки, строят кривую скорости сушки, т.е. зависимость скорости сушки от влагосодержания материала. Эти кривые позволяют определить продолжительность сушки, оценить форму связи влаги с материалом и выбрать оптимальный режим сушки.

Общий вид кривой сушки изображен на рисунке 1.

На кривой сушки выделяют три периода сушки. Участок АВ соответствует прогреву материала, при котором идет медленное удаление влаги. Затем наблюдается резкое удаление свободной влаги из материала по прямой ВС. Этот участок называют первым периодом сушки, при котором скорость сушки не изменяется. Точка С разделяет первый и второй периоды сушки. Она

является критической точкой, а влагосодержание материала в ней – критическим влагосодержанием  $U_{кр}$ . Во втором периоде удаляется связанная влага. Влагосодержание материала медленно уменьшается и постепенно приближается к горизонтали. Горизонтальная линия соответствует равновесному влагосодержанию материала  $U_p$ , которое достигается при бесконечно большом времени сушки. Заканчивают сушку в точке Д при заданном конечном влагосодержании материала  $U_k$ .

Кривую скорости сушки получают путем графического дифференцирования кривой сушки. Для этого в каждой точке кривой сушки проводят касательную линию, тангенс угла

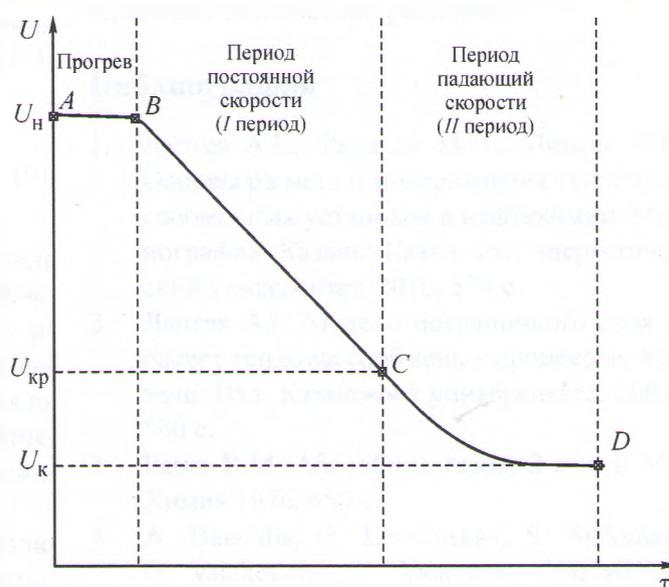


Рис. 1. Кривая сушки.

\*E-mail: Semenprotas@mail.ru.

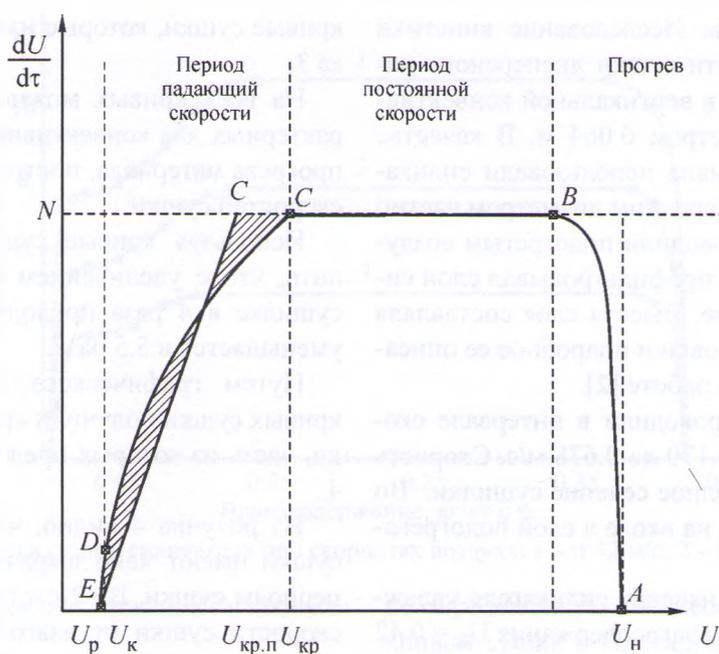


Рис. 2. Кривая скорости сушки.

наклона которой к оси абсцисс равен скорости сушки. Общий вид кривой скорости сушки показан на рисунке 2.

На кривой скорости сушки участок АВ показывает, как протекает прогрев материала. Горизонтальная линия ВС соответствует первому периоду сушки. Скорость сушки в первом периоде  $N$  есть величина постоянная, и зависит от температуры и влагосодержания сушильного агента, общего давления в сушилке и гидродинамики процесса.

С помощью кривой скорости сушки определяют равновесное влагосодержание материала. Для этого кривую скорости во втором периоде экстраполируют до пересечения с осью абсцисс. В точке их пересечения  $E$  получают равновесное влагосодержание материала  $U_p$ .

Кинетический расчет во втором периоде ведут, как правило, по методу Лыкова М.В. [1]. Для этого кривую скорости сушки во втором периоде заменяют прямой линией, проведенной из точки  $E$  до пересечения с горизонтальной линией  $N = \text{const}$  (точка  $C'$ ). Ее проводят так, чтобы соблюдалось равенство площадей участков, ограниченных этой прямой и кривой скорости сушки сверху и снизу (заштрихованные области на рисунке 2). Точку  $C'$  называют приведенной критической точкой. Абсцисса точки является приведенным критическим влагосодержанием материала  $U_{кр.п}$ .

Полученные с помощью кривых сушки критическое, приведенное критическое, равновесное влагосодержание материала и скорость сушки в первом периоде, позволяют рассчитать продолжительность сушки.

Продолжительность сушки при неизменных параметрах сушильного агента (температура, влагосодержании и скорости агента в сушилке) находят по зависимостям:

а) для периода постоянной скорости сушки

$$\tau_I = \frac{U_n - U_{кр}}{N}, \quad (1)$$

где  $\tau_I$  — время сушки в первом периоде, с;  $U_n$ ,  $U_{кр}$  — соответственно начальное и критическое влагосодержание материала, кг/кг с.м;  $N$  — скорость сушки в первом периоде, 1/с;

б) для второго периода сушки

$$\tau_{II} = \frac{U_{кр.п} - U_p}{N} \ln \frac{U_{кр} - U_p}{U_k - U_p}, \quad (2)$$

где  $\tau_{II}$  — время сушки во втором периоде, с;  $U_{кр.п}$ ,  $U_k$ ,  $U_p$  — соответственно приведенное критическое, конечное и равновесное влагосодержание материала, кг/кг с.м;

в) продолжительность сушки  $\tau_{общ}$

$$\tau_{общ} = \tau_I + \tau_{II}. \quad (3)$$

**Основная часть.** Исследование кинетики и продолжительности сушки дисперсного материала проводили в вертикальной конвективной сушилке диаметром 0.064 м. В качестве дисперсного материала использовали силикагель марки КСМ со средним диаметром частиц 0.003 м. Сушку проводили подогретым воздухом, который снизу профильтровывал слой силикагеля на решетке. Высота слоя составляла 0.08 м. Схема установки и подробное ее описание представлены в работе [2].

Исследования проводили в интервале скоростей воздуха от 0.170 до 0.678 м/с. Скорость рассчитывали на полное сечение сушилки. Во всех опытах воздух на входе в слой подогревали до 60°C.

В начале опыта навеску силикагеля увлажняли до начального влагосодержания  $U_H = 0.42$  кг/кг с.м. Установку предварительно прогревали без силикагеля при заданном расходе воздуха до 60°C. После прогрева установки увлажненную навеску засыпали на решетку и снова устанавливали заданный расход воздуха. Через определенные промежутки времени фиксировали температуру и относительную влажность воздуха с помощью двух термогигрометров, установленных перед решеткой и после слоя силикагеля. Заканчивали сушку, когда показания относительной влажности воздуха перед и после слоя силикагеля становились близкими по значению (отличались не более чем на 10%).

Обработку полученных опытных данных проводили по методике, описанной в работе [3].

По результатам исследований построены

кривые сушки, которые изображены на рисунке 3.

На всех кривых можно выделить три характерных для конвективной сушки периода – прогрева материала, постоянной и переменной скоростей сушки.

Используя кривые сушки можно определить, что с увеличением скорости воздуха в сушилке в 4 раза продолжительность сушки уменьшается в 5.5 раза.

Путем графического дифференцирования кривых сушки получили кривые скорости сушки, часть из которых представлена на рисунке 4.

Из рисунка 4 видно, что кривые скорости сушки имеют явно выраженные 1-ый и 2-ой периоды сушки. Во 2-ом периоде зависимость скорости сушки от влагосодержания силикагеля имеет характерную для дисперсных материалов S-образную форму [4]. Растяннутость 1-го периода говорит о том, что скорость сушки слоя силикагеля в одинаковой степени зависит от параметров воздуха и свойств силикагеля.

С помощью полученных кинетических кривых сушки определены значения постоянной скорости сушки в первом периоде, равновесное, критическое и приведенное критическое влагосодержание силикагеля для исследуемых скоростей воздуха.

После математической обработки результатов эксперимента получены следующие расчетные зависимости для скорости сушки в первом периоде

$$N = 2.91 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{1.39w}; \tag{4}$$

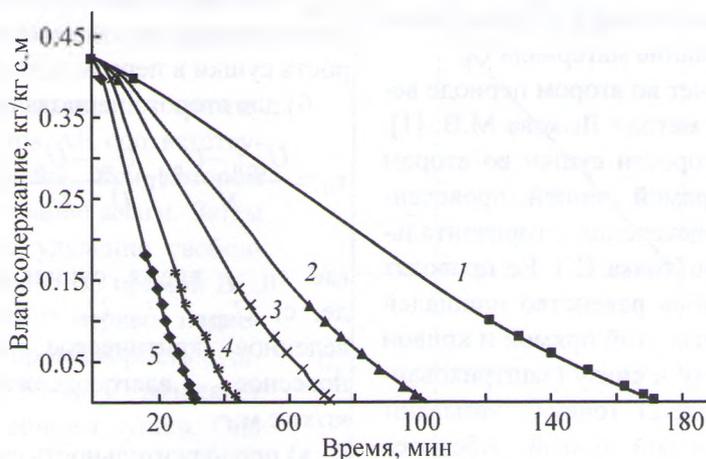


Рис. 3. Кривые сушки силикагеля при скоростях воздуха: 1 – 0.17 м/с; 2 – 0.26 м/с; 3 – 0.42 м/с; 4 – 0.55 м/с; 5 – 0.678 м/с.

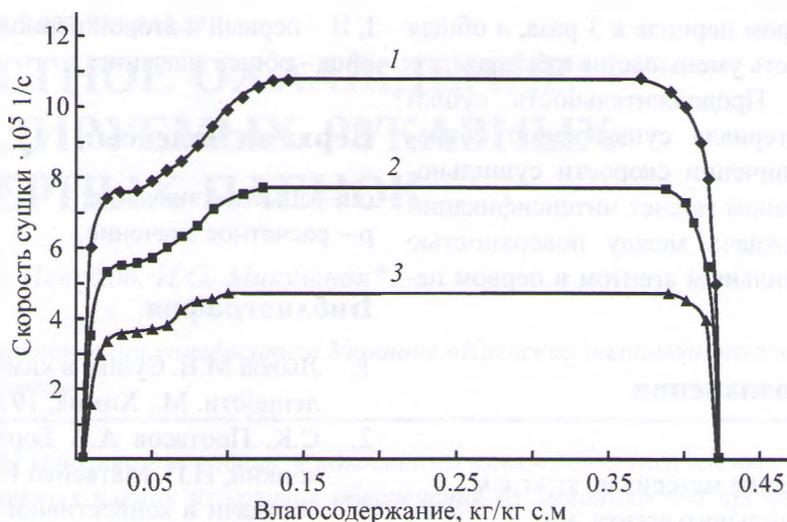


Рис. 4. Кривые скорости сушки силикагеля при скоростях воздуха: 1 – 0.42 м/с; 2 – 0.26 м/с; 3 – 0.17 м/с.

для критического влагосодержания силикагеля

$$U_{кр} = e^{0.92w-2.33}; \quad (5)$$

для приведенного критического влагосодержания силикагеля

$$U_{кр.п} = e^{0.645w-3.09}. \quad (6)$$

Поскольку температура и влагосодержание воздуха на входе в слой силикагеля при всех скоростях воздуха были постоянными, то скорость воздуха не влияла на равновесное влагосодержание силикагеля. И оно составляло 0.005 кг/кг с.м.

Используя формулы (1), (2), (3), полученные зависимости (4), (5), (6) и равновесное влагосодержание, рассчитаны время в первом и втором периодах и общая продолжительность сушки для исследованных скоростей воздуха.

Опытное время сушки в первом перио-

де определяли по абсциссе точки пересечения кривой сушки и горизонтали, проведенной из значения критического влагосодержания.

Общую продолжительность сушки определяли по абсциссе точки пересечения кривой сушки и горизонтали, проведенной из значения конечного влагосодержания силикагеля, которое равнялось 0.009 кг/кг с.м для всех скоростей воздуха.

По разности общей продолжительности сушки и времени сушки в первом периоде рассчитывали опытное значение времени сушки во втором периоде. Опытные и расчетные величины приведены в таблице.

Анализ табличных данных показывает, что при возрастании скорости воздуха в сушилке, продолжительность сушки силикагеля уменьшается в основном за счет более интенсивного сокращения времени сушки в первом периоде. Так при увеличении скорости воздуха в 4 раза время сушки в первом периоде уменьшается в

Таблица. Опытные и расчетные значения продолжительности сушки слоя силикагеля при различных скоростях воздуха

w, м/с	0.17	0.26	0.42	0.55	0.678
$\tau_{I}^{оп}$ , мин	121	66	46	25	16
$\tau_{I}^р$ , мин	119.3	65.4	43.2	24.4	16.2
$\tau_{II}^{оп}$ , мин	50	34	27	19	15
$\tau_{II}^р$ , мин	50.5	35.6	30.2	20.4	14.9
$\tau_{общ}^{оп}$ , мин	171	100	73	44	31
$\tau_{общ}^р$ , мин	169.8	101	73.6	44.8	29.6

\*Погрешность опытных и расчетных величин не превышает 10%.

7.56 раза, во втором периоде в 3 раза, а общая продолжительность уменьшается в 5.5 раза.

**Заключение.** Продолжительность сушки дисперсного материала существенно сокращается при увеличении скорости сушильного агента в основном за счет интенсификации процесса массоотдачи между поверхностью материала и сушильным агентом в первом периоде сушки.

### Условные обозначения

$\tau$  – время, с;

$U$  – влагосодержание материала, кг/кг с.м.;

$w$  – скорость сушильного агента, м/с;

$dU/d\tau$  – скорость сушки, 1/с;

$N$  – скорость сушки в первом периоде, 1/с.

Нижние индексы:

с.м – сухого материала;

н – начальное значение;

к – конечное значение;

р – равновесное значение;

нас – насыщенный;

кр – критическое значение;

кр.п – критическое приведенное значение;

I, II – первый и второй периоды сушки;  
общ – общее значение.

### Верхние индексы:

оп – опытное значение;

р – расчетное значение.

### Библиография

1. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. М.: Химия, 1970. 432 с.
2. С.К. Протасов А.А Боровик, А.И. Вилькоцкий, Н.П. Матвейко Исследование массоотдачи в конвективной сушилке // Хим. пром., 2015, № 5, с. 120–122.
3. С.К. Протасов А.А Боровик, Н.П. Матвейко Определение скорости сушки дисперсных материалов // Хим. пром., 2017, №3, с. 151–154.
4. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Часть II // СПб, НПО «Профессионал», 2006, 916 с.