

3. Устинов А. Н. Машины для посева и посадки сельскохозяйственных культур / А. Н. Устинов // М.: Агропромиздат, 1989 – 159с.

УДК 631:333

## НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СУШКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ SCIENTIFIC BASIS FOR DRYING LOOSE MATERIALS

В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин  
V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, S.A. Sutyagin  
ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА»  
Ulyanovsk state academy of agriculture

*The main theoretical zavisimomosti main factors influencing the process of drying grain. The bases of grain drying in different ways.*

Как известно, сушка является весьма сложным технологическим процессом, зависящим от большого числа факторов, знание которых существенно для анализа и расчета процесса. При сушке из материала удаляется (в виде пара или жидкости) легколетучий компонент (вода).

В процессе сушки влажный материал стремится к состоянию равновесия с окружающей средой, поэтому влагосодержание материала  $U$  и его температура  $T$  зависят от времени  $\tau$  и от координат исследуемой точки материала  $x_1, x_2, x_3$ :

$$U = U(x, y, z, \tau), \quad (1)$$

$$T = T(x, y, z, \tau). \quad (2)$$

Зависимость температуры от времени можно не учитывать, если температура материала становится равновесной быстрее, чем его влагосодержание. Зависимости (1) и (2) описывают динамику сушки и нагрева материала. Изменение во времени средних по объему материала влагосодержаний  $\bar{U}$  и температур  $\bar{T}$  характеризует кинетику процессов сушки и нагрева:

$$\bar{U} = \bar{U}(\tau),$$

$$\bar{T} = \bar{T}(\tau)$$

$$\bar{U} = \iiint_V U(x_1, x_2, x_3, \tau) dx_1, dx_2, dx_3$$

$$\bar{T} = \iiint_V T(x_1, x_2, x_3, \tau) dx_1, dx_2, dx_3.$$

Интенсивность сушки определяется скоростью сушки  $d\bar{U}/d\tau$  ( $N$ ) материала, которая по мере его приближения к состоянию равновесия уменьшается и обычно стремится к нулю. Интенсивность сушки зависит от множества факторов, свидетельствует о сложности реального процесса сушки, особенно в производственных условиях, о трудности получения для него адекватного математического описания. Наибольшее влияние на процесс сушки оказывают факторы, определяющие высушиваемый материал как объект сушки. Они характеризуют сопротив-

ляемость материала переносу влаги внутри него и с его поверхности в окружающую среду, силу связи влаги с материалом, способность материала воспринимать подводимую к нему теплоту. К таким факторам относят внутреннюю структуру материала, его теплофизические свойства и размеры, форму и состояние внешней поверхности, интервал изменения влагосодержания материала в процессе сушки и др. Наиболее сильное влияние на процесс сушки оказывает внутренняя структура материала. Например, для дисперсных материалов с частицами диаметром более 2 мкм и критическим радиусом пор менее 2 нм продолжительность конвективной сушки превышает 1 ч, в то время как для дисперсных материалов с критическим радиусом пор более 100 нм (при прочих равных условиях) находится в пределах 0,5...3 с.

В процессе сушки материалов, состоящих из очень мелких частиц или имеющих поверхность, обладающую большим количеством острых выступов с малым радиусом кривизны, появляется дополнительный поток влаги от материала. Это связано с увеличением давления насыщенного пара над выпуклой поверхностью. Согласно формуле Томсона - Кельвина такое увеличение заметно для весьма малых радиусов кривизны поверхности ( $r < 10^{-7}$  м) и равно

$$p_{\text{вып}} - p_0 = p_0 \left[ \exp \left( \frac{M\sigma K}{\rho_{\text{ж}}RT} \right) \right] - 1,$$

где  $p_{\text{вып}}$ ,  $p_0$  - соответственно давление насыщенного пара над выпуклой и плоской поверхностью, Па;  $M$  - молярная масса вещества, г/моль;  $K$  - средняя кривизна поверхности;  $K = 1/R_1 + 1/R_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  - соответственно главные радиусы кривизны поверхности раздела фаз, м;  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;  $\rho_{\text{ж}}$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $R$  - универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  - абсолютная температура греющей поверхности, К.

Существенно влияют на процесс сушки параметры сушильного агента (теплоносителя) и греющей поверхности, температура нагрева  $t$ , относительная влажность  $\varphi$ , скорость движения теплоносителя относительно материала  $v$ , барометрическое давление  $p$ .

Влияние параметров процесса сушки на скорость сушки можно представить на примере упрощенной математической модели. Предположим, что вся теплота, подводимая к сферической частице материала, расходуется на испарение содержащейся в ней влаги; частица материала мала, и поэтому можно пренебречь градиентами температуры и влагосодержания. Тепловой баланс для такой частицы имеет вид:

$$\alpha \pi d^2 f(t - \theta) = N \frac{\pi d^3}{6} \rho_{\text{м}} r_{\text{п}},$$

откуда скорость сушки

$$N = \frac{6\alpha f(t - \theta)}{\rho_{\text{м}} r_{\text{п}} d}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к частице материала, Дж/(м<sup>2</sup>·ч·град);  $f$  - фактор формы частицы;  $d$  - диаметр частицы материала, м;  $\rho_{\text{м}}$  - плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $r_{\text{п}}$  - теплота парообразования, Дж;  $\theta$  - температура

материала, °С.

Из уравнения (3) следует, что скорость сушки растет с уменьшением размера частицы высушиваемого материала, увеличением температуры теплоносителя или греющей поверхности, а также скорости подвода к материалу теплоты, которая характеризуется коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ . Следует заметить, что  $\alpha$ , в свою очередь, также зависит от размеров частицы материала и слабее - от температуры теплоносителя, или греющей поверхности. Для ряда корреляций, например, для корреляции Фреслинга коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  пропорционален  $d^{0.5}$  и  $v^{0.5}$ . Тогда скорость сушки  $N \approx tv^{0.5}/d^{1.5}$ . Отсюда следует, что наибольшее влияние на интенсивность сушки оказывает размер частиц.

В процессе контактной сушки скорость подвода теплоты зависит от мощности его источника, состояния и площадь греющей поверхности, теплопроводности материала и т. п., что в целом оказывает влияние и на интенсивность сушки. В случае применения энергетических полей скорость сушки зависит от их параметров (частоты, амплитуды).

К факторам, влияющим на сушку, относят концентрацию и состав примесей, содержащихся в удаляемой из материала жидкости. Примеси изменяют теплофизические свойства жидкости (вязкость, теплопроводность и др.), корректируют взаимодействие жидкости с поверхностью твердого скелета и тем самым влияют на скорость миграции влаги из внутренних слоев материала к периферии. В присутствии примесей по закону Рауля уменьшается давление насыщенного пара над поверхностью жидкости или смоченного ею материала, что приводит к сокращению потока влаги от поверхности материала к сушильному агенту.

При сушке дисперсных материалов в аппаратах взвешенного слоя на интенсивность сушки оказывает влияние взаимодействие частиц материала между собой и со стенкой аппарата. При ударах частиц одна о другую и о стенки аппарата с них срывается поверхностный слой, что интенсифицирует сушку: чем больше частота ударов, тем интенсивнее протекает процесс.

Из сказанного можно сделать вывод, что интенсифицировать процесс сушки материала следует увеличением температуры и скорости теплоносителя (в допустимых технологией пределах), уменьшением его начального влагосодержания, дроблением материала (если разрешено технологией), применением энергетических полей и т. п. Однако необходимо помнить, что при интенсификации процесса возрастают и экономические затраты на его проведение, поэтому задача поиска экономически оптимальных условий проведения процесса является актуальной.

#### Литература:

1. Вербa М.И. Теория сушки. - Изд. МЭИ, 1960. - 354с.
2. Кришер О. Научные основы техники сушки. - М.: ИЛ, 1961. - 213с.