

Согласно рекомендациям [1] решение о принадлежности к каждому из классов  $\omega_\ell$  ( $\ell = 0, I, K$ ) принимаются в соответствии с выражениями:

$$\mu_{\omega_0} = \min(\mu_{\omega_0}^1, \mu_{\omega_0}^2);$$

$$\mu_{\omega_p} = \min(\mu_{\omega_p}^1, \mu_{\omega_p}^2);$$

$$\mu_{\omega_k} = \min(\mu_{\omega_k}^1, \mu_{\omega_k}^2).$$

Решение о классификации принимается по максимальной величине функций принадлежно-

стей. При равных значениях функций принадлежности предпочтения отдаются в следующем порядке  $\omega_k, \omega_p, \omega_0$  начиная с  $\omega_k$ .

Статистическая проверка качества срабатывания полученных решающих правил на репрезентативных контрольных выборках показала, что их диагностическая значимость составляет 0,93, что приемлемо для практического использования.

#### Список использованной литературы:

1 Корневский, Н.А. Проектирование систем принятия решений на нечетких сетевых моделях в задачах медицинской диагностики и прогнозирования [Текст]: Н.А. Корневский // Вестник новых медицинских технологий, 2006. Т. XIII, №2. С. 6-10.

*У роботі розглядаються питання синтезу гібридних вирішальних правил для дифференціальної діагностики стадій віброзахворювання. Доводиться, що якість спрацьовування отриманих вирішальних правил на репрезентативних контрольних вибірках показало, що їх діагностична значимість становить 0,93, що прийнятно для практичного використання.*

**Ключові слова:** віброзахворювання, вирішальні правила, диференціальна діагностика.

*The work deals with the synthesis of a hybrid of decision rules for the differential diagnosis vibrobolezney models. Represents the quality of the received response decision rules on representative test samples showed that their diagnostic significance of Skye is 0.93, which is acceptable for practical use.*

**Keywords:** vibrobolezny, decision rules, the differential diagnosis.

Дата надходження в редакцію: 17.05.2012 р.

Рецензент: д.т.н., професор Кочмола М.М.

УДК 621.928.37

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

**В.Я. Красников**, к.э.н., доцент, ФГБОУ ВПО «Курская государственная сельскохозяйственная академия им. профессора И.И. Иванова»

*Целью данной статьи является изучение возможности совершенствования процесса сушки сельхозпродукции на перерабатывающих предприятиях АПК. В предлагаемой статье, большое внимание уделяется аналитической оценке процесса сушки и его интенсификации. Задачами статьи являются - экспериментальное построение кривых сушки при различных способах ее организации: конвективной, сушке в поле СВЧ-излучения, сушке в поле инфракрасного излучения.*

*Решение поставленных задач представляется возможным с помощью лабораторной установки по изучению процессов сушки автоматизированного лабораторного комплекса по процессам и аппаратам пищевых производств с использованием компьютерной технологии виртуальных приборов с применением программы LabVIEW.*

*Для анализа процесса, поиска оптимального решения и для оценки правильности выполненного расчета используются современные компьютерные технологии - компьютерные системы MathCAD Pro и Maple. В ряде случаев, в основном при обработке данных и выводе аналитических зависимостей, используется Excel. Данные компьютерные системы позволяют исследовать динамику процесса, определять условия эффективной работы машин и аппаратов, намечать пути разработки перспективных аппаратов.*

**Ключевые слова:** сушка, влага, пар, теплота, влажность, среда, процесс, кривые, скорость, сушилка.

Сушка – это процесс разделения однородных или неоднородных систем, заключающийся в удалении влаги с использованием тепловых и диффузных явлений. [2] При сушке влага мате-

риала передается сушильному агенту и вместе с ним удаляется из рабочей зоны сушилки. Для глубокого понимания процесса сушки следует творчески анализировать инженерные расчеты и

определять рациональные режимы изучаемого процесса.

### Теоретические основы сушки.

Сушкой - называется теплообменный процесс удаления влаги из твердых влажных пастообразных или жидких материалов (суспензий) путем ее испарения и отвода образовавшихся паров [4, с. 438].

По способу подвода теплоты к высушиваемому материалу различают следующие способы сушки:

- конвективная сушка – подвод теплоты осуществляется при непосредственном контакте сушильного агента с высушиваемым материалом;

- контактная сушка – путем передачи теплоты от теплоносителя к материалу через разделяющую их стенку;

- радиационная сушка – путем передачи теплоты инфракрасными излучателями;

- диэлектрическая сушка (СВЧ - сушка) – путем нагревания материала в поле токов высокой частоты;

- сублимационная сушка – сушка в глубоком вакууме в замороженном состоянии.

В настоящее время в качестве сушильного агента используется горячий воздух. В воздухе всегда содержится водяной пар, при определенной температуре и давлении воздух может поглощать водяной пар до полного насыщения.

При контакте материала с влажным воздухом возможны три состояния системы:

- давление водяного пара во влажном материале  $p_m$  больше, чем его парциальное давление в окружающем материал воздухе  $p_v$ , т.е.  $p_m > p_v$ . В этом случае происходит процесс десорбции влаги из материала в окружающую среду, т.е. процесс сушки. Разность парциальных давлений  $p_m - p_v$  определяет **движущую силу** процесса сушки. Давление  $p_m$  зависит от влажности материала, температуры и характера связи влаги с материалом;

- парциальное давление в окружающей среде больше, чем его парциальное давление во влажном материале, т.е.  $p_v > p_m$ . В этом случае происходит сорбция влаги материалом, т.е. процесс увлажнения материала;

- парциальное давление водяного пара во влажном материале и в окружающей среде равны, т.е.  $p_v = p_m$ . В этом случае наступает динамическое равновесие. Влажность материала, при которой наступает динамическое равновесие, называется **равновесной влажностью**.

Влажность материала при относительной влажности воздуха равной  $\phi = 100\%$  называется **гигроскопической**, при ней давление паров на поверхности материала такое же, как давление насыщенного пара на свободной поверхности воды при данной температуре. Величина гигроскопической влажности определяет способность

материала связывать воду. Гигроскопическая влажность – это максимальная сорбционная влажность материала в паровоздушной среде.

При феноменологическом описании процесса сушки в качестве обобщенной действующей силы принимают разность концентраций влаги  $\Delta C$  в фактическом  $C$  и равновесном  $C_p$  состояниях системы

$$\Delta C = C - C_p$$

Фактическая ее концентрация  $C$  изменяется в процессе сушки, а равновесная  $C_p$  является константой и определяется как состоянием продукта, так и влажностью окружающей среды. При помощи воздуха с определенной влажностью невозможно удалить из материала всю влагу.

При конвективной сушке влага перемещается от центра материала к поверхности, с которой она удаляется сушильным агентом. Это – диффузионный процесс; его движущей силой является разность концентраций влаги на единице

длины окружающей среды ( $\frac{dC}{dx}$ ). Поэтому феноменологическое выражение для влагопереноса  $m_w$  можно записать в виде:

$$m_w = -D_1 F \left( \frac{dC}{dx} \right), \text{ кг/с,}$$

где  $F$  - омываемая поверхность материала,  $m^2$ ;

$D_1$  – постоянная, называемая также феноменологическим коэффициентом или коэффициентом диффузии.

Влага, находящаяся в порах материала, и осмотически связанная влага мигрируют к поверхности в жидком виде, а адсорбционно связанная – в виде пара.

Процесс сушки включает нагревание сушильного агента и приведение его в соприкосновение с высушиваемым материалом в сушильной камере. Это вызывает отъем влаги сушильным агентом от материала, который включает три этапа:

1) влагоотдача с поверхности материала сушильному агенту, сопровождающаяся осушением поверхностных слоев материала и переходом пара в окружающую среду;

2) перемещение пара в окружающей среде;

3) диффузия влаги из глубины тела к поверхности.

Первый из этих процессов побуждает два других как следствие. Испарение влаги возможно как внутри тела, так и на его поверхности.

На поверхности материала образуется воздушно-паровой слой, который находится в равновесии с влагой материала; он является насыщенным при температуре материала. Движущая сила диффузии влаги с поверхности материала в окружающую среду – разность парциальных давлений ( $\Delta P$ ) водяного пара в пограничном слое ( $P_n$ ) и в окружающей среде ( $P_v$ ):

$$\Delta P = P_n - P_v$$

Парциальное давление пара в пограничном слое материала называют давлением насыщенного пара.

Феноменологическая зависимость массового расхода диффундирующего пара ( $m$ ) от этих параметров имеет вид:

$$m = B_1 \cdot (P_n - P_v) \cdot F, \text{ кг} \cdot \text{Па/с},$$

где  $B_1 = \text{Const}$ ,

или в величинах относительных давлений:

$$m = B \cdot \frac{P_n - P_v}{P_{\text{бар}}} \cdot F, \text{ кг} \cdot \text{Па/с},$$

где  $B = \text{Const}$ ,

$P_{\text{бар}}$  - барометрическое давление окру-

жающей среды, Па.

Последнее выражение называется законом Дальтона для испарения с влажной поверхности. Постоянная  $B$  в нем равна  $0,007 \text{ кг/(с м}^2\text{)}$  при скорости обдувающего воздуха до  $0,58 \text{ м/с}$  и  $0,011$  при скорости обдува  $1,57 \text{ м/с}$ .

Расход влаги должен быть равен потоку влаги, подведенному изнутри к поверхности. Изменение этого потока влаги или связанных с ним величин во времени называют кривыми сушки. На рис. 1а изображена кривая сушки, а на рис.1б – производная по времени от нее, или кривая скорости сушки.

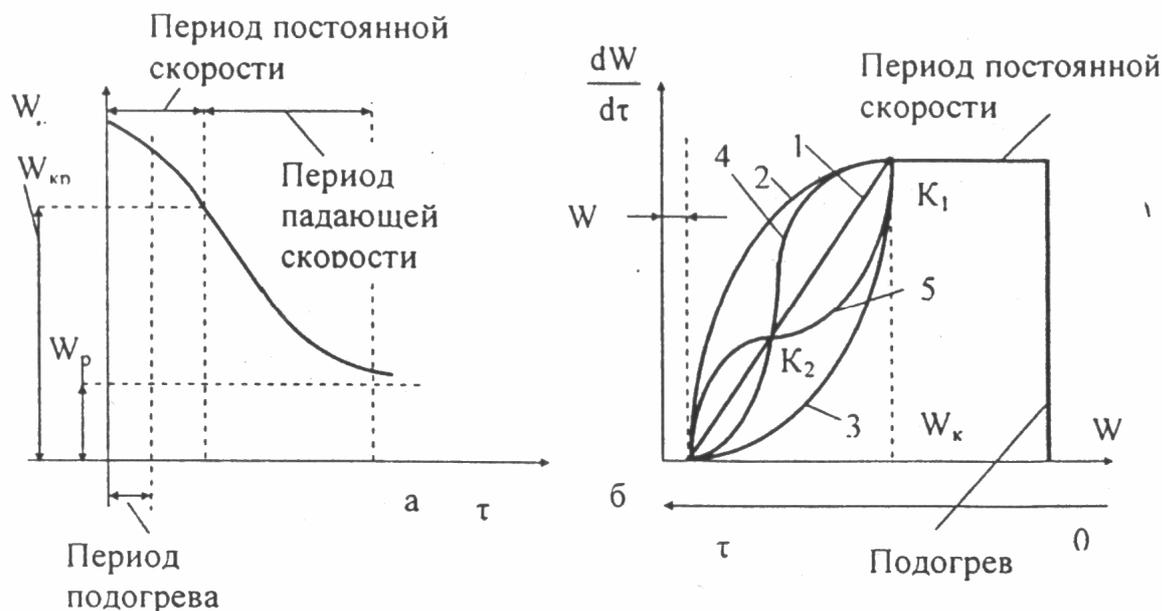


Рисунок 1 Кривые сушки (а) и скорости сушки (б)

В начале сушки материал подогревается, и скорость массового потока удаляемой влаги возрастает от нуля до некоторой постоянной величины. В этот период удаляется влага, механически связанная с материалом (поверхностная и капиллярная). Процесс продолжается до т.  $K_1$  на кривой скорости сушки. В этот период температура материала, покрытого влагой, равна температуре мокрого термометра. Во втором периоде скорость сушки уменьшается. В этот период удаляется влага, более прочно связанная с материалом, в частности осмотическая, адсорбированная химически связанная.

Зависимости изображений на рис.1 б, соответствуют кривые:

1 – для грубопористых материалов; 2 – для тканей, кожи, макаронного теста; 3 – для пористых керамических материалов; 4 – для сухарей; 5 – для глины.

$W_{kp}$  – критическая влажность;

$W_p$  – равновесная влажность.

1 – для грубопористого материала; 2 – для ткани, кожи; 3 – для пористой керамики; 4 – для сухарей; 5 – для глины

На кривой скорости сушки можно видеть одну или две критические точки  $K_1$  и  $K_2$ . Обе они соответствуют изменению механизмов удаления влаги: до точки  $K_1$  удаляется поверхностная влага и влага пор, после точки

$K_2$  – адсорбционно или осмотически связанная влага.

В первый период сушки (до критической точки  $K_1$ ) движущей силой процесса является разность давления насыщенного пара или давления пара в пограничном слое материала и парциального давления пара в окружающей среде ( $P_n - P_v$ ). Скорость сушки в этот период определяется приведенной выше феноменологической зависимостью Дальтона. В этот период скорость диффузии не влияет на скорость сушки.

Во второй период сушки давление паров вблизи поверхности материала ниже равновес-

ного, и определяющее влияние на скорость сушки

оказывает диффузия влаги в нем. Движущей силой процесса в этот период можно считать разность фактического и равновесного влагосодержания

высушиваемого материала ( $W - W_p$ ). Тогда феноменологическая зависимость для скорости процесса принимает вид:

$$\frac{dW}{d\tau} = K (W - W_p);$$

$K - \text{Const.}$

Начальное влагосодержание для этого периода сушки соответствует критическому  $W_{k1}$ , а конечное ( $W_{k2}$ ) определяется относительной влажностью

сушильного агента. Проинтегрировав это уравнение в указанных пределах, получим:

$$\ln \frac{W_{k1} - W_p}{W_2 - W_p} = k \cdot \tau_2$$

где  $\tau_2$  – продолжительность второго периода сушки.

Формула определяет экспоненциальную зависимость влажности от времени  $t$ .

Коэффициент « $k$ » определяется обработкой экспериментальных данных. Обычно он представляется следующей аппроксимирующей зависимостью для сложного последовательно проте-

кающего процесса внешнего и внутреннего влагопереноса:

$$K = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{R}{\alpha}}$$

где  $R$  - определяющий геометрический размер высушиваемого тела (для пластины – половина толщины, для шара – радиус), м;

$\beta$  – коэффициент внешнего влагообмена, м/ч;

$\alpha$  – коэффициент теплопроводности внутреннего массопереноса, м<sup>2</sup>/ч.

Наиболее интересные явления при сушке связаны с явлением термодиффузии. Термодиффузия заключается в перетекании влаги в глубину высушиваемого материала за счет разности температур его поверхностных и глубинных слоев. При повышении температуры сушильного агента термодиффузия усиливается.

Удаление влаги, мигрировавшей в глубину высушиваемого изделия, затруднено. Вследствие этого попытки ускорить сушку повышением подогрева объекта сушки зачастую приводят к миграции влаги в глубину, высушиванию и подгоранию поверхностных слоев изделий. При последующем охлаждении поверхностные слои изделия вновь увлажняются вследствие обратной миграции влаги диффузией.

#### Список использованной литературы:

1. Антипов С.Т. Технологическое оборудование для сушки пищевых продуктов: уч. пособие/ Антипов С.Т., Валуйский В.Я., Кретов И.Т.; Воронеж. Технологический институт, Воронеж, 1989.- 80 с.
2. Бурыкин А.И. Анализ конструкций сушильных установок / А.И Бурыкин // Молочная промышленность, 2003. -№5. - С. 24.
3. Дьяконов В.Д. Maple-8 / В.Д. Дьяконов. – Питер.: Санкт – Петербург, 2000. - 665 с.
4. Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии / Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - М.: Колос, 2000. - 551 с.
5. Краснощеков Е.А. Задачник по теплопередаче./ Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1980. - 285 с.
6. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности /Л.А.Сена. - М.: Наука. 1988. – 430 с.
7. Сажин Б.С. Основы техники сушки / Б.С. Сажин. – М.: Химия, 1984 -320 с.

*Метою даної статті є вивчення можливості вдосконалення процесу сушіння сільгосппродукції на переробних підприємствах АПК. У пропонованій статті, велика увага приділяється аналітичній оцінці процесу сушіння і його інтенсифікації.*

**Ключові слова:** сушка, волога, пара, теплота, вологість, середовище, процес, криві, швидкість, сушарка.

The purpose of this paper is to study the possibility of improving the drying of agricultural products processing establishments APC. In this paper, much attention is paid to the analytical evaluation of the drying process and its intensification.

**Keywords:** drying, moisture, steam, heat, humidity, environment, process, curves, speed, dryer.

Дата надходження в редакцію: 13.04.2012 р.

Рецензент: д.ф.-м.н., професор Кузема О.С.