

Анализ кинетических зависимостей, приведенных на рис. 3 согласно уравнений (13) и (14) показал, что при малых значениях концентраций прямотечный и протитечный процессы, с точки зрения кинетики, могут рассматриваться как равнозначные. Начиная с некоторого значения конечных концентраций наглядно проявляются преимущества протитечного процесса.

Выводы.

Получены уравнения, которые позволяют прогнозировать кинетику процесса экстрагирования целевых компонентов из пористых структур в условиях непрерывного прямотечного и протитечного процессов.

Проведена проверка полученных уравнений на адекватность. Показано, что результаты экспериментальных исследований удовлетворительно согласуются с полученными уравнениями.

Показано, что для условий постоянной разрушающей силы ($CS-C1=const$) прямотечный и протитечный процессы являются равнозначными. Начиная с некоторого значения конечных концентраций наглядно проявляются преимущества протитечного процесса.

Литература

1. Є.М. Семенишин, Р.В. Стадник. Механізм та кінетика екстрагування олії з амаранту в умовах нерухомого шару// Вісник Нац. техн. університету ХП. – 2011. – Вип. 58. – С. 51-55.
2. Семенишин Е.М. Теоретические основы извлечения твердого в условиях прямого и противотока.// Хим.технология, 1980, № 5, с. 60-62.
3. Аксельруд Г.А., Семенишин Е.М. Кинетика извлечения окиси алюминия из спека в противоточных аппаратах непрерывного действия.// Цветные металлы, 1966, № 10, с. 48-51.
4. Семенишин Е.М. Кинетика извлечения твердого вещества в условиях прямого и противотока// Хим. технология, 1983, № 5, с.38-40.

УДК 664.8.047:001.891.57

ОБОЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ СУШКИ АМАРАНТА, ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СУШКИ

Смирнов Г.Ф., д-р техн. наук, профессор,
Зыков А.В., канд. техн. наук, доцент, Воскресенская Е.В., инженер
Одесская национальная академия пищевых технологий

Анализируются результаты эксперимента по сушке зерна амаранта в аппарате на основе вращающегося термосифона.

Results of experiment on drying grain of an amaranth in the device on the basis of rotating thermosyphon are analyzed.

Ключевые слова: сушка, амарант.

Целью работы является исследование комбинированных процессов зерносушения и создание методов расчета и оптимизации сушилки на базе вращающегося термосифона.

Процессы сушки и тепловой обработки достаточно энергоёмки. Одним из возможных путей повышения эффективности организации сушильных процессов является совершенствование методов подвода теплоносителя. Совершенствование способов подвода тепла непосредственно связано с интенсификацией теплообмена и снижением удельных расходов тепла. В современных условиях возрастающего потребления энергии, с одной стороны, и дефицита энергетических ресурсов, с другой, все более остро ставятся вопросы рационального использования энергии, утилизации и рекуперации теплоты во всех процессах пищевой технологии. Это относится и к сушке зерна, которая неизбежно сопровождается неполным использованием энергии теплоносителя, что связано с условиями гигротермического равновесия между высушиваемым материалом и сушильной средой.

В технике сушки широкое применение находят тепловые трубы и термосифоны, которые позволяют довести зерносушильные установки до высокого энергетического совершенства в отношении использования, утилизации и рекуперации теплоты отработанного сушильного агента. При этом значительно снижаются затраты энергии (до 30 %), а осуществление «мягких» режимов сушки позволяет получить высушенное зерно высокого качества.

Современный уровень развития вычислительной техники, а также достижения в области теории тепло- и массопереноса при сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов позволяют исследовать

процесс сушки зерна при наиболее рациональных с энергетической точки зрения схемах подключения вращающегося термомеханического агрегата (ТМА). В этой связи актуальной задачей является разработка математической модели сушильной технологической системы для моделирования одновременно протекающих тепло-массообменных процессов: сушки зерна, регенерации рабочих поверхностей теплообменных устройств, процесса теплообмена между теплоносителями разного температурного потенциала. Возможно, это направление позволит создать новые технологии энергосбережения и способы сушки зерна в новых, разработанных на основе тепловых труб и термосифонов, зерносушилках.

Несмотря на сформировавшиеся принципы энергосбережения в процессах сушки, нет однозначного решения их реализации. Поэтому решение задач энергосбережения при конкретном способе энергоподвода требует индивидуального подхода с учетом специфики каждого вида продукта.

В данной статье анализируются результаты при различных режимах сушки зерна амаранта в аппарате на основе вращающегося термосифона.

Амарант – мелкосеменная культура (масса 1000 семян 0,4...0,55 г), размер целой зерновки не превышает в диаметре 0,6-0,8 мм. В условиях юга Украины амарант следует рассматривать не только как источник питательной вегетативной массы, но и как перспективную зернофуражную культуру. По данным науки отдельные сорта амаранта способны обеспечивать урожайность 25...60 ц зерна с гектара.

Для дальнейшей обработки и хранения свежесобранный урожай амаранта необходимо просушить. В промышленных масштабах эта технологическая линия ещё не отработана, и сушат амарант различными способами, в том числе и в сушилках с параллельными потоками [6]. Процесс сушки зерен амаранта, исследуемый в данной работе, проходил в установке, роторная конструкция и принцип действия которого приведена в статьях [4,5].

Рассмотрим последовательно процесс сушки зерновой массы, внутри которой есть система вращающихся Испарительных Термосифонов (ИТС). Следуя [3], предположим, что этот процесс можно представить состоящим из нескольких «стадий» - «этапов»: 1. Первоначальный прогрев зерновой массы до температуры начала поверхностного испарения влаги; 2. Совместный прогрев зерновой массы, сопровождающийся поверхностным испарением при примерно неизменной влажности воздуха внутри осушаемого слоя; 3. Продолжение процесса п.2, но с учетом изменения влажности среды, в которую происходит испарение; 4. Переход от поверхностного испарения, сопровождающегося некоторым нагревом, к испарению внутри зерен; 5. Естественное замедление нагрева и полный переход к испарению из внутреннего объема зерновой массы вплоть до минимального влажности.

Следуя этому предположению, определим основные уравнения для процессов в 1-ой стадии, рассматривая процесс, когда масса, в которой реализуют процесс сушки, находится в объеме вращающегося полуцилиндрического сосуда, диаметр которого равен D , а длина равна L . Поперечное сечение этого сосуда равно $S_0 = D \cdot L$. Полагаем, что, как и в эксперименте, внешнее сечение названного сосуда в опытах открыто и, следовательно, идет массообмен между внутренним объемом, в котором осуществляется сушка и внешней средой. Модель в общем случае должна учитывать это обстоятельство. Тогда совместное уравнение теплопередачи и теплового баланса для первой стадии запишем в следующем виде:

$$L[(1 - \varepsilon) \cdot C_{pz} \cdot \rho_z \cdot dt_z + \varepsilon \cdot \rho_a \cdot C_{pa} \cdot dt_a] \cdot S_{\text{ИТС}} = K_{\text{CON}} \cdot F_{\text{ИТС}} \cdot (t_s - t_z) \cdot d\tau \quad (1)$$

где $F_{\text{ИТС}}$ — внешняя греющая поверхность ИТС;

ρ_z — плотность зерновой массы;

C_{pz} — ее удельная теплоемкость;

t_z — его средняя температура;

t_s — температура насыщения в ИТС;

K_{CON} — коэффициент теплопередачи от границы раздела фаз в ИТС к нагреваемому объему зерна;

$S_{\text{ИТС}}$ — полная внешняя поверхность ИТС;

ρ_a — плотность воздуха внутри нагреваемого объема;

C_{pa} — его удельная теплоемкость,

ε — пористость нагреваемого объема;

t_a — средняя температура воздуха в нагреваемом объеме;

τ — текущее время.

Температуры зерна и воздуха внутри слоя в среднем будут примерно равны, т.е. $t_z \approx t_A$. $(t_s - t_z) = (t_s - t_z)_{00}$. Здесь $(t_s - t_z)_{00} = t_{s0} - t_{z0}$. Значения $t_{s0}; t_{z0}$ — это температуры насыщения внутри ИТС и температура зерновой массы в начальный момент времени при $\tau = 0$. С учетом этого уравнение приводим к формуле:

$$t_z = t_s - (t_{s0} - t_{z0}) \cdot \exp\left[-\frac{K_{CON} \cdot F_{ITS} \cdot \tau}{L \cdot S_{EIT} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_z \cdot C_{pz}}\right] \quad (2).$$

Для второй стадии исходное совместное дифференциальное уравнение теплового баланса и тепло – массопередачи имеет такой вид:

$$L \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_z \cdot C_{pz} \cdot S_{EIT} \cdot dt_z + r \cdot \beta \cdot [p_s(t_z) - \overline{p_0}] \cdot V_{z0} \cdot \frac{S_{z0}}{V_{z0}} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot d\tau = K_{CON} \cdot F_{ITS} \cdot (t_s - t_z) \cdot d\tau \quad (3)$$

где $r; \beta; p_s(t_z); \overline{p_0}; V_{z0}; S_{z0}$ — теплота фазового перехода (теплота испарения); коэффициент массоотдачи при испарении с внешней поверхности зернового слоя; парциальное давление водяного пара в состоянии равновесия на внешней поверхности зерен, т.е. давление насыщения при текущей средней температуре слоя; среднее парциальное давление водяных паров в воздухе, окружающем частицы зерен слоя; полный объем зернового слоя и полная внешняя поверхность зерен, соответственно.

Проанализируем полученные результаты применительно к нашим условиям.

Примем в внимание, что в опытах до нагрева устанавливался в ИТС стационарный режим с фиксированными значениями давления и температуры насыщения, равными 1.5, 1.75 и 2.0 бар и 111, 116 и 120С, соответственно. Будем полагать, что теплообмен от внешней поверхности ИТС к массе зерна осуществляется конвективным путем. Для определения коэффициента теплопередачи от внутреннего объема ИТС к зерновой массе следует использовать известное соотношение для него такого вида:

$$\frac{1}{K_{CON}} = \frac{1}{\alpha_{CN}} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_K} + \frac{1}{\alpha_Z} \quad (4)$$

Здесь α_{CN} — коэффициент теплоотдачи в зоне конденсации ИТС;

δ_w — толщина стенки ИТС и ее удельная теплопроводность;

λ_w — толщина стенки ИТС и ее удельная теплопроводность;

α_K — коэффициент контактной теплоотдачи;

α_Z — конвективный коэффициент теплоотдачи от стенки ИТС к зерновому слою.

Для конвективной теплоотдачи от стенок ИТС к зерновому слою:

$$Nu = \frac{\alpha_Z \cdot D_E}{\lambda_Z} = 2 + A_0 \cdot Re^N \cdot Pr^{0.33} \cdot Gu^M \quad (5)$$

Здесь D_E — определяющий размер, в качестве которого был принят эквивалентный диаметр зерна амаранта;

α_Z — искомый коэффициент конвективной теплоотдачи от стенки ИТС к слою;

λ_Z — коэффициент теплопроводности зерна;

A_0, N, M — эмпирические константы в критериальном уравнении, которые принимаются по рекомендациям [3] в зависимости от числа $Re = \frac{\overline{W_0} \cdot D_E}{\nu_A}$. Где $D_E; D_Z$ — определяющий размер (в нашем случае эквивалентный диаметр зерна) и коэффициент диффузии водяного пара в воздухе, соответственно.

Критерий Gu по предложению того же источника имеет ограниченный смысл (им учитываются некие особенности сушки, связанные с выбросом влаги из объема тела и адиабатическим испарением капель этой влаги). Вклад этого фактора не существен. Таким образом, для получения расчетных оценок в качестве следующего шага нужно вычислить определяющий размер, которым является эквивалентный диаметр зерна.

Примем, что D_E следует рассчитать как результат отношения объема зерна V_Z к его внешней поверхности S_Z , т.е. по схеме: $D_E = \frac{V_Z}{S_Z}$. Величины V_Z и S_Z найдем для нашей зерновой массы (амаранта)

по информации [7]. Ориентируясь на данные по просу и чумизе, следует, что геометрия зерна гороха характеризуется тремя параметрами: толщиной $a = 0.6...0.8$ мм, шириной $B = 0.6...0.8$ мм и длиной $l = 0.6...0.8$ мм. Для расчета по этим данным объема и поверхности зерна в [7] предложены следующие формулы: $R = \frac{5a + 6B}{60}$;... и далее: $S_Z = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot (l + 3R)$ – и $V_Z = K_0 \cdot a \cdot B \cdot l$. Здесь K_0 – коэффициент формы. По рекомендациям [7] этот коэффициент принят равным 0.5. Так как все названные размеры имеют минимальное и максимальное значения, не разительно отличающиеся друг от друга, то и величины объема и внешней поверхности зерна рассчитаны для средних значений. Они оказались равными: $S_Z = 1.69$ мм² $V_Z = 0.17$ мм³. Тогда для искомой величины определяющего размера зерна получили значение $D_E = (V_Z / S_Z) \cdot 6 = 0.6$ мм. Множитель 6 появляется в связи с тем, что объем шара эквивалентным диаметром D_E равен $V = \frac{\pi \cdot D_E^3}{6}$ а его внешняя поверхность $S = \pi \cdot D_E^2$. Т.е это означает, что $\frac{V}{S} = \frac{D_E}{6}$. И,

следовательно $D_E = 6 \cdot \frac{V_Z}{S_Z}$. Для расчета числа Re примем, что определяющей будет та скорость, которая соответствует при вращении системы с ИТС их среднему радиусу. Так как длина боковых ИТС была равна 0.12м, а диаметр центрального ИТС равен 0.02м, то этому соответствует средний радиус вращения равным 0.07м. Тогда характерная (определяющая) скорость движения в слое будет равной: $\overline{W}_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \overline{R}_0 \cdot n}{60}$ Здесь $\overline{R}_0$; n – средний радиус и число оборотов системы ИТС. $\overline{R}_0$ – равен 0.07м. Число оборотов изменялось от 10 до 40 оборотов в минуту. Тогда для средней скорости получаем: $\overline{W}_0 = 0.073 \div 0.292$ м / сек. и диапазон чисел Re в наших условиях при температуре и относительной влажности внешнего воздуха равных соответственно: $t_A = 20 \div 80^\circ\text{C}$ и $\varphi = 70\%$ $\overline{v}_A = 25 \cdot 10^{-6}$ м² / сек.

$\text{Re} = \frac{\overline{W}_0 \cdot (D_{EMAX} \div D_{EMIN})}{\overline{v}_A} = 0.7...0.1$. Это означает, что при расчете коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи следует использовать такие формулы, в которых эмпирические константы определяются следующим образом: $A_0 = 1.07; N = 0.48; M = 0.175$. и $A_0^1 = 0.83; N^1 = 0.53; M^1 = 0.135$. С учетом этого получим для коэффициента теплоотдачи:

$$Nu_{MAX} = 2 + A_0 \cdot \text{Re}^N \cdot \text{Pr}^{0.33} \cdot Gu^M = 2 + 1.07 \cdot (0.7)^{0.48} \cdot \text{Pr}^{0.33} \quad (6)$$

$$Nu_{MAX} = 2.802 \text{ при } \text{Pr}^{0.33} = 0.89 \text{ и } Nu_{MIN} = 2 + A_0 \cdot \text{Re}_{MIN}^N \cdot \text{Pr}^{0.33} \cdot Gu^M = 2.315$$

$$\text{Для массоотдачи имеем исходное уравнение: } Nu_D = \frac{\beta \cdot D_E}{D_Z} = 2 + A_0^1 \cdot \text{Re}^{N^1} \cdot \text{Pr}_D^{0.33} \cdot Gu^{M^1} \text{ и эмпирические коэффициенты: } A_0^1 = 0.83; N^1 = 0.53; M^1 = 0.135.$$

Тогда диапазон массообменных чисел Nu_D определится следующим образом:

$$Nu_{DMAX} = 2 + A_0^1 \cdot \text{Re}_{MAX}^{N^1} \cdot \text{Pr}_D^{0.33} \cdot Gu^{M^1} = 2 + 0.83 \cdot (0.7)^{0.53} \cdot 0.9 = 2.618 \quad \text{и}$$

$$Nu_{DMIN} = 2 + A_0^1 \cdot \text{Re}_{MIN}^{N^1} \cdot \text{Pr}_D^{0.33} \cdot Gu^{M^1} = 2 + 0.83 \cdot (0.1)^{0.53} \cdot 0.9 = 2.22.$$

Таким образом, получаем значения диапазонов изменения коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи, определив перед этим величины коэффициентов теплопроводности и диффузии. $\overline{\lambda}_A = 0.0265$ Вт / м · К; $\overline{D}_A = 26 \cdot 10^{-6}$ м² / сек..

$$\alpha_{MAX} = \frac{Nu_{MAX} \cdot \overline{\lambda}_A}{D_{EMAX}} = \frac{2.802 \cdot 0.0265}{6 \cdot 10^{-5}} = 1237 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}; \alpha_{MIN} = \frac{Nu_{MIN} \cdot \overline{\lambda}_A}{D_{MIN}} = \frac{2.315 \cdot 0.0265}{6 \cdot 10^{-5}} = 941 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}.$$

$$\beta_{MAX} = \frac{Nu_{DMAX} \cdot \overline{D}_A}{D_{EMAX}} = \frac{2.618 \cdot 26 \cdot 10^{-6}}{7 \cdot 10^{-5}} = 0.972 \text{ м}^3 / \text{м}^2 \cdot \text{сек}; \beta_{MIN} = \frac{Nu_{DMIN} \cdot \overline{D}_A}{D_{EMIN}} = \frac{2.22 \cdot 26 \cdot 10^{-6}}{7 \cdot 10^{-5}} = 0.825 \text{ м}^3 / \text{м}^2 \cdot \text{сек}$$

Полученные зависимости позволяет рассчитывать кинетику сушки амаранта в термомеханическом агрегате с ВТС при скоростях вращения ТС до 40 об/мин и углах наклона до 45^0 .

Литература

1. Рудобашта С.П. Математическое моделирование процесса сушки дисперсных материалов // Известия Академии наук. – Энергетика. – 2000. – №4. – С. 98–109
2. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н. Кинетика и динамика тепломассопереноса при сушке слоя диспергированного коллоидного капиллярно-пористого материала // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса. – 2006. – Вип. 28. – Т.2. – С.140–146
3. Лыков А.В. «Теория сушки», 1968г. Изд.2ое. Москва. «Энергия», 472стр.
4. Безбах И.В., Бурдо О.Г. Термомеханический агрегат для дисперсных продуктов // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса. – 1999. – Вип. 21. – С.234–237
5. Воскресенська О.В. «Кінетика процесу сушіння зернових культур в термосифонно – механічному агрегаті», – Одеса, – Наукові праці ОНАХТ, – вип.36, – том 1, – 2009р., – 79–82 с.
6. Антипов С.Т. Исследование и анализ гигроскопических свойств семян амаранта // С.Т. Антипов, А.В. Журавлев, И.М. Черноусов, Е.С. Буни. – сборник статей «Вопросы современной науки и техники». – университет им. В.И. Вернадского. – Воронеж. – №4(14). – 2008. – Том 2. – С.197–201
7. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич В.Г., «Сушіння зерна», 1997г., 352стр., Из – во Лебидь.