

Выводы. Применение микроволновых технологий позволяет добиться равномерности подвода энергии к продукту в выпарном аппарате и исключить промежуточный теплоноситель. При этом энергия подводится непосредственно к воде (полярному экстрагенту) в продукте. Микроволновая вакуум-выпарка позволяет удалять воду или экстрагент при низких температурах (30...35 °С), что благоприятно влияет на качество конечного продукта. Применение вакуума в микроволновых выпарных установках позволяет значительно сократить удельные энергозатраты процесса.

Литература

1. PHCOG REV.: Microwave Assisted Extraction – An Innovative and Promising Extraction Tool for Medicinal Plant Research [Text] / Vivecananda Mandal, Yogesh Mohan, S. Hemalatha // Pharmacognosy Reviews, Vol.1, Issue 1, Jan-May, 2007, P. 7 – 18.
2. Chemat-Djenni Z. Atmospheric Pressure Microwave Assisted Heterogeneous Catalytic Reactions [Text] / Z. Chemat-Djenni, Boudjema Hamada, F. Chemat // Molecules 2007, 12, P. 1399 – 1409.
3. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. – Одесса: «Полиграф», 2010. – 368 с.
4. Бурдо О.Г. Исследование модуля ленточной сушилки растительного сырья с комбинированным электромагнитным подводом энергии / Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Ружицкая Н.В.// Труды IV Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов СЭТТ-2011)». – Т.1, Москва, 2011. – С. 422 – 426.

УДК 664.723

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СУШКИ НЕДЕФОРМИРУЕМОГО, НАГРЕВАЕМОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СУЩЕСТВОВАНИИ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ЕЁ «ТОРМОЖЕНИЯ».

Смирнов Г.Ф., д-р техн. наук, проф., Зыков А.В. канд. техн. наук
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

В работе представлен подход к моделированию процесса сушки слоя сыпучего материала при кондуктивном энергоподводе. На основании решения уравнения нестационарной теплопроводности получены зависимости для определения температуры перегрева греющей поверхности и слоя сыпучего материала. Представлена модель фильтрации водяного пара сквозь слой зерна. Предложен механизм снижения скорости испарения на основании предположения об уменьшении радиусов кривизны границы фазовых переходов.

The new way of modeling of conductive drying of dispersed material is presented. On the base of solution of the equation of unsteady heat conduction, the dependencies for determination of heating surface superheat and temperature of dispersed material are obtained. The model of vapor filtration through the grain layer is shown. The mechanics of vaporization rate reducing based on the suggestion of decreasing of phase transitions radii is offered.

Ключевые слова: обезвоживание, зерновой слой, тепломассообмен, моделирование.

В обстоятельной монографии [1] приводится объективный анализ современных взглядов на закономерности процессов сушки. Приведем то, что пишет в [1], на эту тему автор: «Фундаментальные основы теории сушки сложились в середине прошлого столетия и базируются на работах А.В.Лыкова и П.А.Ребиндера [2,3]. Основываясь на этих положениях, развиваются несколько научных направлений в теории сушки. Аналитические исследования посвящаются моделям градиентного переноса и термодинамическим моделям. Феноменологическая модель А.В.Лыкова дополнена Луциком П.П. соотношениями для учёта деформации в материале [4]. Углубленный анализ кинетики сушки проводится в центре сушки ИТТФ под руководством А.А. Долинского [5]. В работах Ю.Ф. Снежкина и Н.И. Никитенко предложена оригинальная модель влаге - обмена [6]». Такая краткая характеристика дана автором во введении. Далее в нём же приводится перечень многочисленных направлений экспериментальных исследований процессов сушки, их авторов и оценки их значимости. В завершении в этом введении автор пишет: «В данной монографии [1], не ставилась цель глубокого исследования теории сушки. Стержневым вопросом была

енергетика технологии обезвоживания продуктов». Таким образом, опираясь на приведенную информацию и объективную оценку существующего положения в теоретическом анализе процессов сушки можно считать, что существующие взгляды и концепции на физическую природу и принципиальные внутренние механизмы процессов сушки нуждаются в углубленном подходе, вскрывающем сущность тех механизмов процесса, которыми объясняются главные его особенности. В настоящей работе авторами предпринимается попытка сделать в этом направлении свой шаг. Так как необходимо сравнение с данными опытов для объективной оценки справедливости предлагаемого подхода, то для этого использовались полученные под руководством проф. Бурдо О.Г. данные опытов по сушке зернового слоя. В предлагаемом подходе, как указано в названии, рассматривается сушка нагреваемого, но не деформируемого материала. Принимается, что нагрев осуществляется через контакт греющей поверхности с нагреваемым материалом. Эта схема отвечает реальным условиям опытов, результаты которых используются для сопоставления с расчётами по предлагаемой модели, а условия опытов изложены в [7,8].

Составим определение задачи совместного разогрева вращающегося ИТС и прилегающего к нему зернового слоя. Обозначим массу ИТС как M_1 , а её удельную теплоемкость как C_1 . Обозначим также массу жидкости внутри ИТС как M_2 , а её удельную теплоемкость как C_2 . Для прилегающего к ИТС слоя зерна введём такие обозначения: плотность ρ_3 , удельная теплоемкость C_3 , удельная температуропроводность a_3 , толщина слоя зерна, прилегающего к ИТС δ_3 . Толщина слоя зерна для условий опытов может рассчитываться исходя из такого соображения: объём всего слоя V_3 , разделённый на поверхность контакта ИТС + слой зерна S_3 .

Запишем систему уравнений, определяющих динамику разогрева ИТС и зернового слоя. Примем, что в начальный момент времени температура в всех точках слоя и ИТС будет одинакова и равна t_1 , а в установившемся режиме в всех точках ИТС она будет равна t_{s0} . Тогда уравнение теплового баланса можно записать в таком виде:

$$Q = (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2) \cdot dt_1 / d\tau + \rho_3 \cdot \delta_3 \cdot S_3 \cdot C_3 \cdot dt_3 / d\tau + r \cdot V_2 \cdot d\rho_2 / d\tau \quad (1)$$

Здесь $t_3; \rho_2; V_2; r$ – средняя температура слоя, меняющаяся при нагреве плотность пара внутри ИТС, его объём внутри ИТС, теплота испарения, соответственно.

Оценка величины последнего слагаемого в формуле (1) показывает, что им можно пренебречь. Между текущими значениями температур t_1 и t_3 существует связь, определяемая условиями тепло – массопереноса:

$$t_1 - t_3 = \rho_3 \cdot \delta_3 \cdot S_3 \cdot C_3 \cdot dt_3 / d\tau / S_3 \cdot \lambda_3 / \sqrt{C_0 \cdot a_3 \cdot \tau} \quad (2)$$

решение этого уравнения для фиксированного значения t_1 имеет такой вид:

$$\begin{aligned} 2 \cdot \sqrt{\tau} + const &= -\delta_3 / \sqrt{C_0 \cdot a_3} \cdot \ln(t_1 - t_3); \\ const &= -\delta_3 / \sqrt{C_0 \cdot a_3} \cdot \ln(t_1 - t_3)_0 \\ (t_1 - t_3) &= (t_1 - t_3)_0 \cdot \exp(-2 \cdot \delta_3 / \sqrt{C_0 \cdot a_3} \cdot \tau) \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $(t_1 - t_3)_0$ величина температурного напора на поверхности контакта ИТС и зернового слоя в начальный момент времени.

Следует рассматривать уравнения (1) и (3) совместно. Т.е. из (3) следует, что:

$$t_3 = t_1 - (t_1 - t_3)_0 \cdot \exp(-2 \cdot \delta_3 / \sqrt{C_0 \cdot a_3} \cdot \tau)$$

$$Q = (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2) \cdot dt_1 / d\tau + \rho_3 \cdot \delta_3 \cdot S_3 \cdot C_3 \cdot dt_3 / d\tau$$

совместное решение приводит к такому приближенному уравнению (4):

$$\begin{aligned} dt_1 / d\tau &= Q / [(M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2) + \rho_3 \cdot \delta_3 \cdot S_3 \cdot C_3] - (t_1 - t_3)_0 \cdot \delta_3 / \\ & / \sqrt{C_0 \cdot a_3 \cdot \tau} \cdot \rho_3 \cdot \delta_3 \cdot S_3 \cdot C_3 \cdot \exp(-2 \cdot \delta_3 \cdot \sqrt{C_0 \cdot a_3} \cdot \tau) / \\ & / [(M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2) + \rho_3 \cdot \delta_3 \cdot S_3 \cdot C_3] \end{aligned} \quad (4)$$

Величина Q – есть полная подводимая к ИТС тепловая мощность в установившемся режиме сушки.

Первые предварительные расчёты показали, что в начальные моменты времени в уравнении (4), определяющим динамику нагрева есть первое слагаемое, в котором не требуется учитывать в знаменателе третье слагаемое. Т.е. в эти моменты времени динамика нагрева подчиняется условию:

$$dt_1 / d\tau = Q / [(M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2)] \quad (5)$$

Отсюда также следует, что весь начальный период сушки связан с неустановившимся температурным режимом нагрева, когда основные температуры: на контактной поверхности теплообмена и в зерновом слое, начиная от зон, прилегающих к контактной поверхности и, включая остальные слои; существенно изменяются. Это обстоятельство нужно учитывать в результирующей модели расчёта процесса сушки. Кроме названных особенностей расчётов тепловых режимов сушки в начальный её период следует принять в внимание, что в этот период заметная доля подводимого теплового потока будет отводиться в окружающую среду от той части поверхности ИТС, которая не контактирует с зерновым слоем, но омывается воздухом окружающей среды. Если обозначить всю поверхность контакта S_3 , а её долю имеющую контакт с зерном k_3 , тогда та часть поверхности, от которой отводится тепло в окружающую среду будет равна S_{32} , и тепловая мощность, которая будет отводиться от неё конвекцией, равна $\alpha_3 \cdot [t_1 - t_{oc}] \cdot S_{32}$. С учётом этого исходное уравнение (1) примет следующий вид:

$$Q = (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2) \cdot dt_1 / d\tau + \rho_3 \cdot \delta_3 \cdot S_3 \cdot k_3 \cdot C_3 \cdot dt_3 / d\tau + \alpha_3 \cdot [t_1 - t_{oc}] \cdot S_{32}$$

и

$$S_{32} = (1 - k_3) \cdot S_3 \tag{6}$$

Так как, как выше отмечено, вторым слагаемым можно пренебречь, то для начального периода времени (5) следует пользоваться уравнением вида

$$Q / (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2) - \alpha_3 \cdot [t_1 - t_{oc}] \cdot S_{32} / (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2) = dt_1 / d\tau \tag{7}$$

Решение (7) имеет следующий вид:

$$t_1 - t_{oc} = \frac{A_1}{B_1} \cdot [1 - \exp(-B_1 \cdot \tau)] \tag{8}$$

$$A_1 = Q / (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2)$$

$$B_1 = \alpha_3 \cdot S_{32} / (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2) \tag{9}$$

и

$$\frac{A_1}{B_1} = \frac{Q}{\alpha_3 \cdot S_{32}} \tag{10}$$

При

$$k_3 = 0.1; \dots S_{32} = 0.9 \cdot S_3; \dots \alpha_3 = 10 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$$

тогда

$$t_1 - t_{oc} = 75 \text{ К} \cdot [1 - \exp(-0.00215 \cdot \tau)]$$

Последней формуле соответствует график:

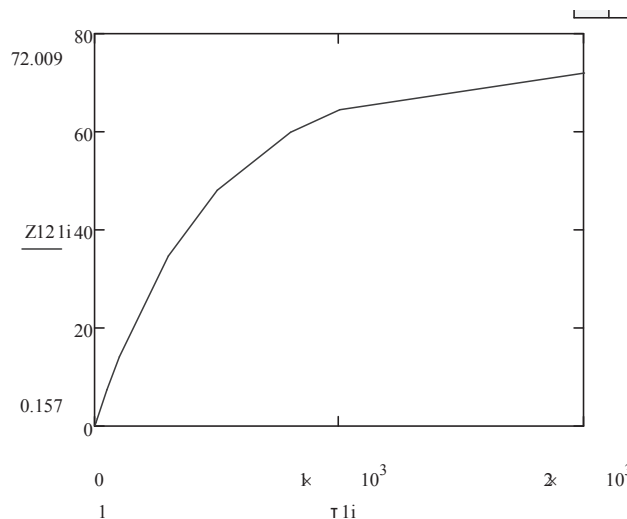


Рис. 1 – Зависимость температуры перегрева поверхности от времени в секундах.

При следующих расчётах динамики процесса сушки следует использовать эти зависимости изменений температуры в качестве исходных. В этих расчётах не учитывалось, что отвод тепла от внешней по-

верхности ИТС осуществляется при вращении. В этом случае расчёт коэффициента внешней теплоотдачи должен идти от вращающейся поверхности к окружающей среде по соответствующим формулам.

Используя информацию о начальном периоде нагрева слоя в виде формул или графиков, можно переходить к расчётам процесса сушки по выше предложенной модели. Итак, переходим к этому расчёту. Задаваясь градиентом давлений, который обеспечивает фильтрацию паровоздушной смеси из порового объёма, определим среднюю скорость движения этой среды. До этого определим структурные параметры пористой среды. Используем рекомендации [10] для определения характерных параметров среды и получим: Удельные поверхности этих зёрен, входящие в критерии, как определяющие размеры, будут, соответственно:

$$S_{V1} = 1.18 \cdot 10^4 - 2.5 \cdot 10^3 \cdot 1/m;$$

$$S_{V2} = 6.5 \cdot 10^3 - 6.45 \cdot 10^2 \cdot 1/m$$

Пористость и проницаемость будут следующими:

$$\varepsilon = 0.7 - 0.8 \cdot u \cdot K_f = const \cdot \varepsilon^3 \cdot D_0^2 / (1 - \varepsilon)^2$$

$$K_{f1} = (0.28 - 0.92) \cdot 10^{-9} \cdot m^2; \dots K_{f2} = (0.84 - 2.77) \cdot 10^{-9} \cdot m^2$$

характерные размеры – определяющие диаметры зёрен будут равны для пшеницы и гороха:

$$D_{01} = 10^{-3} \cdot m; \dots D_{02} = 1.73 \cdot 10^{-3} \cdot m$$

Первый шаг расчёта проводился для зернового слоя пшеницы. Задавшись градиентом давления

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = 10 \cdot Pa/m$$

была получена средняя скорость фильтрации в поровом слое и число Рейнольдса:

$$Re = 4 \cdot W / (S_{Vi} \cdot \nu)$$

Затем, приняв нужные формулы, определены число Nu и коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности зернового слоя. На этой основе возможен переход к пошаговому расчёту изменений температуры в слое и коэффициентов массоотдачи. Это делается следующим образом: При таком коэффициенте теплоотдачи искомый комплекс, определяющий масштаб первого шага будет иметь вид:

$$Y_{11} = \frac{\alpha \cdot \sqrt{a_e \cdot \tau}}{\lambda_e}$$

$$a_e = (0.7 - 0.9) \cdot 10^{-7} \cdot m^2 / сек$$

$$\lambda_e = 0.03 \cdot \frac{Вт}{m^2 \cdot K}$$

Для времени равном 1сек параметр будет: $Y_{11} = (3 - 2.65) \cdot 10^{-3}$, для 100сек $Y_{11} = (3 - 2.65) \cdot 10^{-2}$, но для 10000сек он равен 0.3 или 0.265. Это означает, что изменение парциальных давлений будет следовать изменениям температуры поверхности контакта в первую очередь и с этим будут связаны все остальные изменения. Примем в внимание, что коэффициент теплоотдачи от поверхности ИТС к зерновому слою в начальной стадии нагрева следует рассчитывать по формулам, определяющим интенсивность теплообмена при движении слоёв частиц вдоль поверхности. В том случае, который рассматривается нами, вращение ИТС вызывает движение частиц слоя вдоль поверхности контакта с скоростью равной:

$$W_{сл} = 2 \cdot \omega \cdot \pi \cdot R_0$$

Где ω число оборотов ИТС (об/сек), R_0 - средний радиус поверхности контакта.

Вероятно, можно использовать для этого рекомендации [11]. После определения указанных температур появляется возможность найти на этих границах соответствующие им парциальные давления насыщенных паров и переходить к расчётам процессов массоотдачи и следующей из них динамике влагоудержания, т.е. результатам процесса сушки. Этот процесс имеет место в некоторой части (зоне) слоя, прилегающей к греющей поверхности ИТС. С одной стороны этой зоны – поверхность ИТС, с другой некоторая подвижная граница нагреваемой зоны зернового слоя. Вероятно, эту границу можно полагать расположенной на толщине этого слоя. Её можно считать пропорциональной величине:

$$\delta_{1i} = \sqrt{C_0 \cdot a_E \cdot \tau} \quad (12)$$

Это означает, выпаривание влаги (сушка) будут иметь место в этом слое. Движущие силы массоотдачи определяются напорами парциальных давлений, которые можно рассчитывать, предполагая, что у контактной поверхности они будут соответствовать температурам как равновесным, т.е. температурам насыщения, а у условной внешней границы нагретого слоя примем температуру равную температуре окружающей среды и парциальное давление у этой границы также будет отвечать состоянию насыщения. В первом приближении интенсивность массоотдачи будем определять, как в квазистационарном, установившемся процессе, подчиняющемся известному уравнению массоотдачи:

$$j_{E1} = \beta_P \cdot (P_W - P_{O.C}) \cdot F \quad (13)$$

Где: j_{E1} - плотность потока массы влаги, переносимой из зернового слоя от внешней поверхности ИТС к внешней подвижной границе перегретой зоны; β_P – коэффициент массоотдачи; P_W – парциальное давления паров воды у стенки ИТС P_{oc} – парциальное давления паров воды в внешней среде (т.е. у условной движущейся границы нагретой зоны); F – поверхность массоотдачи, включая в первой стадии сушки всю внешнюю поверхность зёрен в пределах нагретой зоны, участвующей в процессе.

Расчёты парциальных давлений можно выполнять при ранее найденных температурах на поверхности контакта и на условной внешней границе перегретого слоя зерна. При этом расчётные формулы выглядят следующим образом:

$$P_i = P_0 \cdot \exp Z_{1i}; Z_{1i} = (r/R1) \cdot \left(\frac{1}{T_{O.C}} - \frac{1}{T_{1i}} \right) \quad (14)$$

где: r – теплота испарения, $R1$ – газовая постоянная, P_i – парциальное давление на i -тых поверхностях испарения, P_0 – парциальное давление во внешней среде, T_{oc} – её температура, T_i – температуры испарения на i -тых поверхностях.

Для расчёта температур предлагается использовать формулы:

$$T_i = T_{O.C.} + Z_{11i} \cdot (T_{1i} - T_{O.C.}); \quad (15)$$

$$T_{1i} - T_{O.C.} = \frac{A_1}{B_1} \cdot [1 - \exp(-B_1 \cdot \tau)] \quad (16)$$

Параметр Z_{11i} считать по формуле (17):

$$Z_{11i} = \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2 \cdot \sqrt{Fo_{0i}}} - \exp \left[\frac{\alpha_1}{\lambda_1} \cdot L \right] + \left[\frac{(\alpha_1)^2}{\lambda_1^2} \cdot a_e \cdot \tau_i \right] \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{1}{2 \cdot \sqrt{Fo_{0i}}} + \frac{\alpha_1}{\lambda_1} \cdot \sqrt{a_e \cdot \tau} \right] \right) \quad (17)$$

Здесь: $Fo_{0i} = \frac{a_e}{\lambda_1} \cdot \tau_i$; – текущее значение числа Фурье, τ –время в секундах, α_1 –коэффициент теплоотдачи, L –расчётный размер (эквивалентный размер зерна), λ_1 –коэффициент эквивалентной теплопроводности зернового слоя.

Важным моментом процесса сушки зернового слоя является снижение влагосодержания, как на внешней поверхности его, так и внутри.

В первую очередь, это происходит на внешней поверхности. При этом оставшаяся влага, если она не «ушла» внутрь зёрен, сохраняясь в некоторых местах, предположительно, например, в местах контактов отдельных зёрен, начинает формировать уменьшение радиусов кривизны границы фазового перехода, и, как следствие, увеличение капиллярного давления на некоторую его величину. В результате снижается парциальное давление насыщенных паров и начнётся торможение интенсивности испарения. Другим вероятным механизмом снижения интенсивности испарения и скорости сушки может быть начало испарения влаги изнутри зёрен. В настоящий момент отсутствует информация, которая позволила бы определить каков будет этот механизм в первую очередь. Поэтому, в рамках данной модели принято, что начальным механизмом «торможения» интенсивности сушки будет, назовём условно: «капиллярный» механизм. Далее снижение скорости сушки будет связано с переходом на испарение влаги изнутри зёрен или «внутренним» испарением. Границы начала каждого из этих механизмов, по-видимому, могут устанавливаться

ливаться на основе опытов. Обсудим вероятные модели каждого из этих двух механизмов. Модель «капиллярного» механизма может быть следующей.

Возрастание «капиллярного давления» напрямую связано с уменьшением радиусов границы раздела фаз, например, в некоторых углах, в которых останется влага. Это уменьшение должно быть пропорционально объёму остатков влаги, а так как рост капиллярного давления связан с уменьшением радиуса кривизны по схеме:

$$\Delta P_{\sigma} = -[(2 \cdot \sigma) / R_{1i}^2] \cdot \Delta R_{1i} \quad (18)$$

Где: ΔP_{σ} –повышение «капиллярного давления», что ведёт к уменьшению «движущих» процессом соотношения напоров; σ –коэффициент поверхностного натяжения; R_{1i} –текущее значение некоторого радиуса кривизны; ΔR_{1i} –уменьшение этого радиуса на данном i -том интервале времени.

А снижение радиуса связано с уменьшением объёмов оставшейся влаги. Если этот объём можно определить как разность исходного влагосодержания и уноса влаги за предыдущий интервал времени, за минусом того количества влаги, которое находится внутри зёрен и, с учётом, что линейный размер объёма пропорционален объёму в степени $1/3$, тогда положения модели «капиллярного» механизма торможения процесса сушки могут быть представлены так:

$$\Delta R_{1i} \approx (\Delta V_{1i})^{1/3} \cong \{M_0 - M_{2j} - \sum_0^i \Delta M_i\} / (\rho_0 \cdot N_1 \cdot m) \quad (19)$$

Где ΔV_{1i} –остаток внешней влаги к моменту начала этапа «капиллярного» механизма торможения; M_0 – исходное количество (масса) влаги в слое; M_{2j} – та масса влаги, что находится внутри зёрен; $\sum \Delta M_i$ – сумма всех уменьшений массы влаги от начального 0 нулевого момента до данного i -того; плотность влаги, N_{1i} –число зёрен в i -той части слоя, m –среднее число узлов, в которых формируются границы раздела фаз жидкость – пар.

Результаты расчётов по формулам (18 и 19) дают основу для введения соответствующего уменьшения движущего напора в процессе испарения на величину ΔP_{σ} . Отсутствие многих параметров, входящих в приведенные формулы, приводит к необходимости использовать эмпирические множители и даже функции. Например, по схеме

$$\Delta P_{\sigma} \approx (\Delta P_{\sigma})_0 \cdot \exp(-A \cdot \tau_i) \quad (20)$$

где: $(\Delta P_{\sigma})_0$ –результат расчёта «капиллярного» давления; A –эмпирический коэффициент; τ_i – i -тый данный интервал времени.

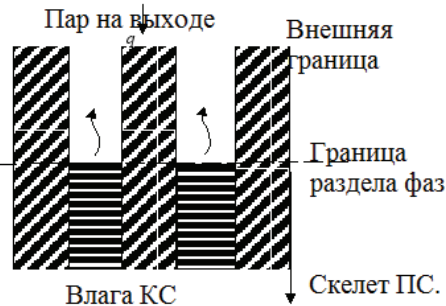


Рис. 2 – Условная схема, иллюстрирующая суть модели внутреннего испарения.

Другим важным механизмом, вызывающим снижение интенсивности сушки является переход к процессу сушки, как удалению влаги изнутри зёрен. При этом возникают свои не менее существенные особенности. Рассмотрим их по рис.2 :

Заштрихованные косо столбы – элементы скелета; горизонтальная штриховка – влага в капилляре; криволинейные стрелки – выход пара, его диффузия в парогазовую смесь, находящуюся над границей раздела фаз в внутреннем капилляре. Зазор между внешней границей и границей раздела фаз и есть то, что в модели обозначено как δ . Обозначим долю объёма «готового» к второй стадии через Z_0 (да тогда объём зёрен M_0 , где V_0 – полный объём слоя, подвергаемого сушке. Если N – число зёрен в единице объёма, размером D_0 , то поверхность внутреннего фронта S_1 испарения толщиной δ будет

$$S_1 = 4 \cdot \pi \cdot (D_0 - 2 \cdot \delta)^2 \cdot N \quad (21)$$

Масса испаренной влаги к моменту формирования этого фронта испарения будет $M_1(\tau)$,здесь ε_1 – объёмная концентрация внутренней влаги, выпаренной за интервал времени от «начала» второй стадии от 0 до τ_1 будет равно:

$$M_1(\tau) \approx 4 \cdot \pi \cdot (D_0 - 2 \cdot \delta)^2 \cdot \delta(\tau) \cdot N \cdot \varepsilon_1 \cdot \rho \quad (22)$$

С другой стороны, для испарения этой влаги из внутреннего объёма зерна нужно «преодолеть» сопротивление массопередачи в сумме следующих параметров. Это внутреннее сопротивление, обусловленное диффузией пара внутренней влаги к внешней поверхности зёрен, его масштаб может быть определён следующим образом как

$$R_1 = \delta(\tau) / D_{iM} \quad (23)$$

Т.е. это означает, что общее массообменное сопротивление можно представить как сумму:

$$R_0 = R_1 + 1 / \beta_{1P}; \quad (24)$$

Где β_{1P} – коэффициент массоотдачи.

«Движущий напор» процесса массопередачи Δp_0 – равен разности парциальных давлений водяного пара на границе внутреннего слоя $P_1[t(\delta, \tau)]$ и парциального давления в этой же зоне слоя $P_2[t(\delta, \tau)]$. Это означает, что масса удаляемой влаги изнутри зёрен определится исходя из условия её потерь внутри по схеме:

$$\frac{dM_1(\tau)}{d\tau} = 4 \cdot \pi \cdot (D_0 - 2 \cdot \delta)^2 \cdot \rho \cdot d\delta / d\tau \cdot N \cdot \varepsilon_1 \cdot Z_1(\tau) \quad (25)$$

С другой стороны этот «отвод» массы определяется уравнением массопередачи, т.е. условием:

$$\begin{aligned} \{P_1[t(\delta, \tau)] - P_{20}[t, \tau]\} \cdot \left[\frac{1}{\beta_{1P}} + \frac{\delta}{D_{iM}} \right]^{-1} \cdot 4 \cdot \pi \cdot (D_0 - 2 \cdot \delta)^2 \cdot Z_1(\tau) = \\ = 4 \cdot \pi \cdot (D_0 - 2 \cdot \delta)^2 \cdot N \cdot Z_1(\tau) \cdot \rho \cdot d\delta / d\tau \end{aligned} \quad (26)$$

Отсюда следует уравнение, определяющее динамику внутреннего фронта испарения:

$$\left[\frac{1}{\beta_{1P}} + \frac{\delta}{D_{iM}} \right] \cdot d\delta = \{P_1[t(\delta, \tau)] - P_{20}[t, \tau]\} \cdot (1 / \rho) \cdot d\tau \quad (27)$$

Интеграл уравнения:

$$1 / \beta_{1P} \cdot \delta + \frac{\delta^2}{2} / (D_{iM}) = \{P_1[t(\delta, \tau)] - P_{20}[t, \tau]\} / \rho \cdot \tau + const \quad (28)$$

Постоянная определяется из естественного начального условия когда начинается вторая стадия. И уравнение второй стадии, на основе динамики испарения слоя внутри имеет вид:

$$\delta = \frac{D_{1P}}{\beta_{1P}} \cdot \left(\sqrt{1 + A_1 \cdot \tau \cdot \frac{\Delta P_{li}}{\rho} \cdot \frac{\beta_{1P}^2}{D_{1P}}} - 1 \right); \quad (29)$$

Где A_1 – эмпирический коэффициент, корректирующий модель.

Из этого уравнения для каждого момента времени определяется положение фронта испарения в второй стадии. И далее находятся потери влаги и т.д. используя предварительно полученные данные определяют потерю влаги, т.е. изменение влагосодержание в слое. Важное значение в этих расчётах имеет знание коэффициента диффузии пара влаги в процессе испарения. Гидравлическое сопротивление при движении пара в таких каналах не должно рассчитываться по формулам движения в каналах сплошной среды. Будем полагать, тем не менее, что для предварительных ориентировочных оценок это допустимо, с учётом того, что действительные потери давления при течении в таких каналах будут существенно больше. Теперь можно переходить к расчёту динамики уноса влаги изнутри. По данным [12], коэффициент диффузии пара в зерне лежит в диапазоне $D_{1P} \approx 1,8 \cdot 10^{-4} - 3,1 \cdot 10^{-4}$ м²/сек. Следует также принять во внимание, что парциальное давление в окружающей зерновой слой среде будет достаточно близко к условиям окружающей среды, т.е. оно будет равно примерно 10³Па. Первые расчётные оценки производились отдельно для определения масштабов «капиллярного» механизма торможения процесса сушки и механизма «внутреннего испарения». Но, в действительности, будут существовать зоны и периоды процесса, в которых эти механизмы будут проявляться совместно, но последовательно. На данном этапе анализа такое совместное существование этих механизмов не учитывалось. Кроме того выявление второго механизма в количественном отношении определялось без учёта снижения парциального давления на границе раздела фаз внутри зёрен, а затем с учётом этого фактора. Авторы предлагаемого подхода отдаёт отчёт в том, что многие принятые схемы расчёта далеки от должного уровня корректности. В значительной мере, это связано с отсутствием необходимой достоверной информации, в частности по параметрам внут-

ренной структуры зёрен, по процессам движения и переноса в этих средах, по их многим теплофизическим свойствам и проч.

По-видимому, предлагаемый подход и следующая из него методика должны рассматриваться, как попытка построить систему соотношений, помогающих лучше понять физические основы процесса сушки. Поэтому в качестве следующих шагов необходимо, используя предлагаемый подход и схему расчётов, их алгоритм, создать необходимые программные средства для эффективных возможностей теоретического анализа и сопоставления данных расчётов и эксперимента.

Литература

1. Бурдо О.Г. «Эволюция сушильных установок», Одесса., 2010, 368стр.
2. Лыков А.В. «Теория сушки». М., Энергия, 1968г.,472стр.
3. Ребиндер П.А. «О формах связи влаги с материалами в процессе сушки.», В кн. Всесоюзное научно – техническое совещание по сушке.,Проф.,1958,с.286.
4. Луцик П.П. «Массопроводность деформируемого в процессе сушки твердого пористого тела.» Промышленная теплотехника.1987.Т.9.№5,с.29-34.
5. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. «Оптимизация процессов распылительной сушки.», Киев. Наукова думка. 1984. – 240с.
6. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н. «Математическая модель и метод расчёта тепломаассопереноса и фазовых превращений в процессах сушки»././ «Промышленная теплотехника», 2001, Т.23,- №3. – С.65- 73.
7. Безбах И.В., Бурдо О.Г. Термомеханический агрегат для дисперсных продуктов // Наукові праці ОДАХТ. – 1999. Вип. 21. – С. 234–237.
8. Воскресенская Е.В. Особенности кинетики процесса сушки в термосифонно-механическом агрегате // – Одеса, – Наукові праці, –вип.37, –2010р., –81–84с.
9. Н.Ф. Smirnov, E.V. Voskresenskaya THE GRAIN LAYER DRYING APPROXIMATED MODEL // 8th Minsk International Seminar_Heat Pipes_Heat Pumps_Refrigerators_Pover Sources_,-September12-15, – 2011, –Belarus, –Vol.2, –2011, –р.203-208
10. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич В.И. «Сушіння зерна», Из –во «Либідь», 1997, – 352стр.
11. Горбис З.Р.«Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков»,Из – во «Энергия», Мос. 1970г. 424с.
Гинзбург А.С. и др. «Влага в зерне» -М 1969г.224 стр.

УДК 663.9

НЕЭНЕРГОЕМКИЕ ПИЩЕВЫЕ ДОБАВКИ, НАТУРАЛЬНЫЕ КРАСИТЕЛИ И АРОМАТИЗАТОРЫ

**Бурдо О.Г., д-р техн. наук, профессор, Терзиев С.Г., канд. техн. наук, ассистент,
Ружицкая Н.В., канд. техн. наук, ассистент, Харенко Д.А., канд. техн. наук, ассистент
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса**

В статье проводится обзор новых неэнергоёмких продуктов полученных в результате комбинированных процессов и нанотехнологий. Рассмотрены инновационные методы концентрирования пищевого сырья, электромагнитные методы производства пищевых добавок. Описаны новые неэнергоёмкие продукты и пищевые добавки.

In current paper the review of new energy saving products, received in the result of combined processes and nanotechnologies. Innovative methods of food material concentrating and electromagnetic methods of food additives production are considered. New energy saving products and food additives are described.

Введение. В ОНАПТ на кафедре процессов, аппаратов и энергетического менеджмента развивается принципиально новое научно-техническое направление – пищевые наноэнерготехнологии [1]. Обоснование перспектив и новизны такого направления следующие.

Новые технологии производства неэнергоёмких пищевых продуктов. В традиционных нанотехнологиях на молекулярном уровне проводится «сборка» объектов, размеры которых не превышают 300 нм. Естественно, это очень сложные в инструментальных вопросах проблемы. Объектами пищевых технологий являются созданные природой наномасштабные элементы: клетки и поры растительного сырья,