



МЛНЧ-2015

Международные Лыковские научные чтения



ВЕБ-КОНФЕРЕНЦИЯ

**Первые Международные Лыковские научные чтения,
посвящённые 105-летию академика А.В. Лыкова**

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СУШКИ
И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ
В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ**

22 - 23 СЕНТЯБРЯ 2015 ГОДА

*Веб-конференция «Первые Международные Лыковские научные чтения,
посвящённые 105-летию академика А.В. Лыкова – МЛНЧ-2015» прово-
дится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных
исследований - проект № 15-08-20703-г*

Москва 2015

УДК 687
ББК 37.23
А43

Председатель Оргкомитета
Председатель Комитета РосСНИО
по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов,
д.т.н., профессор Рудобащта Станислав Павлович

Заместители Председателя Оргкомитета
член-корр. НАН Р. Беларусь, д.т.н., профессор
Павлюкевич Николай Владимирович,
академик РААСН, д.т.н., профессор
Федосов Сергей Викторович

Учёный секретарь Оргкомитета
учёный секретарь Комитета РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обра-
ботки материалов, к.т.н., профессор Кошелева Мария Константиновна

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СУШКИ И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТ-
КИ МАТЕРИАЛОВ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И АГ-
РОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ** [Текст]: сборник научных статей Первых
Международных Лыковских научных чтений (22-23 сентября 2015 года) / РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева, ЗАО «Университетская книга», Курск, 2015., 485 с.

ISBN 978-5-9907009-4-9

В сборник включены научные статьи российских и зарубежных учёных, представ-
ленные на вебинаре, в которых рассматриваются вопросы теории и математического
моделирования процессов сушки и термовлажностной обработки различных материа-
лов, проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в химической, пище-
вой, текстильной и лёгкой промышленности, в строительной индустрии, древесины,
вопросы экологической и производственной безопасности при проведении рассматри-
ваемых процессов, методы и средства контроля и управления данными процессами.

Материалы сборника предназначены для преподавателей вузов, аспирантов, научно-
технических и инженерно-технических работников различных отраслей промышленно-
сти и агропромышленного комплекса.

ISBN 978-5-9907009-4-9

УДК 687
ББК 37.23

© Российский государственный
аграрный университет – МСХА
имени К.А. Тимирязева, 2015
© ЗАО «Университетская книга», 2015
© Авторы статей, 2015

УДК. 664.723.011

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ СУШКИ И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЕ
К СУШКЕ СЛОЯ ЗЕРНА С КОНДУКТИВНЫМ ЭНЕРГОПОДВОДОМ
THE DRYING PROCESSES THEORETICAL ANALYSIS AND ITS APPLICATION
TO CONDUCTIVE GRAIN DRYING

Генрих Ф. Смирнов*, Александр В. Зыков**
Henry F. Smirnov*, Aleksandr V. Zykov**

*Одесская национальная академия пищевых технологий; Украина, Одесса,
(e-mail: g.smirnov@e-mail.ua)

**Одесская национальная академия пищевых технологий; Украина, Одесса,
(e-mail: zav380@yahoo.com)

Odessa national academy of food technologies, Ukraine, Odessa

Аннотация: Это начало анализа физического представления процессов сушки. Авторы пытаются сделать некоторые новые шаги по развитию этого представления и его теоретического описания. Основной идеей авторов является существование минимум двух форм торможения во время сушки. Первая проявляется, когда влага на поверхности начинает исчезать. Вторая проявляется, когда начинает испаряться влага из внутреннего объема, в том числе происходит углубление зоны испарения. Торможение в первой форме связано с элементами влаги остающимися в углах в мест контакта. В результате, это приводит к возрастанию капиллярного давления и, соответственно, уменьшению давления паров над поверхностью материала и, соответственно, движущей силы. Авторы полагают, что этот подход имеет смысл и может быть использован в дальнейшем, на следующих этапах разработки подходов к описанию процесса.

Abstract: This is an initial part of drying processes physical imagination overview. The authors are trying to do some new steps to develop this processes imaginations and theoretical prescriptions. The authors' key idea is the minimum two forms of decelerations exist during drying processes. The first one appears, when moisture on the dried surface external part is beginning to disappear. The second one is appearing, when moisture starts to vaporize from the seeds internal volume, including the liquid - vapor phase border deepening inside internal channels. The deceleration in the first form is connected with last elements of the moisture are beginning to get deeper in the some corners in the contact seeds places. As the result, it is leading to the surface tension pressure increasing and correspondingly decreasing of acting pressure, which ensures the vapor removing. The authors suggest that this approach has a sense and can be used for the next steps of the approach development.

Ключевые слова: сушка; термосифон; моделирование; капиллярное торможение; теплоперенос.

Keywords: drying; thermosyphon; simulation; capillary deceleration, heat transfer.

1. Введение.

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 Луцником 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 влаго - об-

мена [6]». Такая краткая характеристика дана автором [1] в 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 энергетика технологии обезвоживания продуктов». Таким образом, опираясь на приведенную информацию и её 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]. Принципиальная схема подхода авторов состоит в следующем:

1. Принимается, что на первом этапе построения математических моделей процессов сушки следует сформировать ту часть общей структуры, в которой, на основе учёта типа источника энергии и тепловых связей с ним объекта сушки решаются проблемы расчёта нестационарных температурных полей в объекте. В рамках этого этапа также записываются условия равновесия на границах раздела фаз, т.е. на поверхностях испарения.

2. На следующем этапе формируются те части моделей, в которых на основе данных о структуре среды (пористость, размеры пор, их стабильность или не стабильность и т.д.) записываются те уравнения, которые определяют режимы и законы движения массы удаляемой в процессе сушки влаги. При этом принимается, что в зависимости от типа объекта (сплошное пористое тело; слой зёрен; слой порошков; ткань; плёнка и т.д.) выбираются модели движения как для удаляемой влаги из внутренних поверхностей мини – или микро – каналов, так и из внутренних объёмов (в особенности для пищевых продуктов).

3. Далее записываются основные соотношения, связывающие распределения температур с величинами, которыми определяются «движущие силы» локальных процессов переноса массы. Принимается, что в пределах элементарных ячеек или объёмов, для определения массы удаляемой влаги, допустимо использовать известные формулы массоотдачи, в которых присутствуют найденные величины «движущих сил», удельные поверхности испарения и коэффициенты массоотдачи. При этом формулы для расчёта локальных коэффициентов массоотдачи принимаются из известных или принятых критерийных формул. Этот элемент построения общей схемы расчёта содержит наибольший уровень неизвестности. Поэтому, авторы полагают, что вначале допустимы различные формы выбора этих расчётных формул, например, допуская аналогию с процессами переноса тепла и принимая необходимые расчётные формулы и др.

4. На завершающем этапе предполагается совместное объединение расчётных соотношений в некую единую общую модель и осуществление расчётных упражнений, в которых в качестве основной цели служит величина убыли влаги. При этом возможен различный уровень этой величины, в зависимости от требований технологии: (удаление заданного количества влаги, при котором не достигается полное осушение; более глубокий уровень осушения, при котором удаляется вся или почти вся влага с внутренних поверхностей структуры; полное осушение не связанное с удалением влаги принадле-

жащей материалу объекта; полное удаление всей влаги, включающей ту, что принадлежит самому материалу объекта и т.д.).

5. По результатам предыдущих этапов может возникнуть необходимость в корректировках соотношений в первоначальных этапах (1, 2 и др.) по результатам конечного этапа (4). Так, например, может оказаться необходимым в исходных уравнениях для расчётов нестационарных температурных полей, учитывать затраты энергии, связанные с испарением влаги и т.д. Проявится необходимость организации соответствующей процедуры последовательных приближений. Авторы попытались осуществить этот подход, используя в качестве объекта слой зерна, который нагревается путём контакта этого слоя с внешней поверхностью вращающегося испарительного термосифона как [7,8].

2. *Модели распределений нестационарных температур и связанных с ними «движущих напором» массоотдачи при заданных условиях сушки.*

Уравнение, определяющее изменение средней температуры нагреваемого слоя зерна заданных размеров, может быть получено как уравнение энергии при нестационарном нагреве системы, состоящей из греющего устройства (испарительный вращающейся термосифон имеющий массу M_1 и удельную теплоёмкость C_1 , а также массу заправки теплоносителя M_2 и её теплоёмкость C_2 , объём V_2 и теплоту фазового перехода r), зернового слоя с своей массой $M_3 = \rho_3 \cdot \delta_3 \cdot S_3$ и теплоёмкостью C_3 , в котором и осуществлялся процесс сушки. Это уравнение не учитывает затраты тепла на сам процесс сушки, так как для этого необходимо знание результата сушки (массы удалённой влаги в динамике), и имеет следующий вид:

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

Между текущими значениями температур t_1, t_3 существует связь, определяемая условиями тепло – массопереноса. Учёт этой связи и сопоставление масштабов отдельных слагаемых показали, что в начальные моменты времени эта формула может иметь такой вид:

$$dt_1 / d\tau = Q / [(M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2 + M_3 \cdot C_3)]$$

Из этого следует, что весь начальный период сушки по этой технологии связан с нестационарным режимом нагрева, когда основные температуры греющей поверхности и зернового слоя будут изменяться в времени. Это обстоятельство следует учитывать в расчётах процессов массоотдачи. Следует также в уравнении энергии учитывать затраты тепла, связанные с его отводом от внешних поверхностей ИТС в окружающую среду. Такой учёт приводит к следующему уравнению:

$$Q = (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2 + M_3 \cdot C_3) \cdot dt_1 / d\tau + \alpha_3 \cdot [t_1 - t_{ac}] \cdot S_{32} \quad (1)$$

здесь: $S_{32} = (1 - k_3) \cdot S_3$ - масштаб внешней поверхности ИТС, от которой отводится тепло в окружающую среду. Поскольку, как отмечалось, уравнение (1) становится за-

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

метно проще. Его решение принимает вид:

$$A_1 = Q / (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2 + M_3 \cdot C_3) \cdot dt_1 / d\tau \quad B_1 = \alpha_3 \cdot S_{32} / (M_1 \cdot C_1 + M_2 \cdot C_2 + M_3 \cdot C_3),$$

α_3 – коэффициент теплоотдачи от ИТС к зерну.

Важным моментом расчёта является анализ распределения в части зернового слоя, в которой осуществляется нагрев. Это часть слоя толщиной: $\delta_0 = \sqrt{C_0 \cdot a_e \cdot \tau}$, (2), где a_e – эффективный коэффициент температуропроводности, τ – время нагрева.

Учёт перемешивания слоя было предложено сделать по аналогии тому, как влияет турбулентное перемешивание на интенсивность переноса тепла в жидкостных турбулентных струях [13]. Нужная формула из [13] имеет такой вид: $a_e = a_0 + \varepsilon_0 \cdot W_i \cdot L$, где a_0

– коэффициент температуропроводности, ε_0 – эмпирический коэффициент, W – скорость вращения. Для определяющего размера принято, что он равен полной толщине слоя: $L = \delta_{30}$. Система расчётных формул теплопроводности данной задачи имеет следующий вид:

$$Z_{1i} = \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{F_{0i}}}\right) - \exp\left[\frac{\alpha_{22} \cdot L_i \cdot \left(\frac{\alpha_{22}}{\lambda_{\phi}}\right)^2}{\lambda_{\phi}} \cdot a_0 \cdot \tau_i\right] \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{1}{2\sqrt{F_{0i}}} + \frac{\alpha_{22}}{\lambda_{\phi}} \sqrt{a_0 \cdot \tau_i}\right]$$

Где F_{0i} – текущее значение числа Фурье, α_{22} – коэффициент теплоотдачи, L_i – линейный размер, λ_{ϕ} – коэффициент эквивалентной теплопроводности зернового слоя.

Знание температур в местах, в которых возможно испарение, даёт основы для расчётов парциальных давлений и определения «движущих сил» процессов массоотдачи.

Ключевым служит уравнение: $P_{1i} = P_0 \cdot \exp(Z_{1i})$, $Z_{1i} = (r/Rl) \cdot \left(\frac{1}{T_{oc}} - \frac{1}{T_{1i}}\right)$. Тут: r – теплота испарения, Rl – газовая постоянная, P_i , P_0 – парциальные давления на i -ых поверхностях испарения и в внешней среде, T_{oc} , T_{1i} – её температура и температуры испарения на i -ых поверхностях, соответственно.

3. Модели движения паровоздушной смеси из внутренних объёмов и процесса массоотдачи при испарении, реализующих сам процесс сушки.

Предполагается, что первоначальным источником удаления испарённой влаги является повышение давления в паровоздушной смеси под действием перепада давлений между избыточным давлением, возникающим как следствие испарения с влажной поверхности и давлением в окружающей тело внешней среде. Предлагается использовать известное уравнение фильтрации, отвечающее линейному закону Дарси и имеющему

$$W_{1i} = \frac{\Delta P_{1i} \cdot K_{\beta}}{S_{1i} \cdot \mu_{1i}}$$

следующий вид: $W_{1i} = \frac{\Delta P_{1i} \cdot K_{\beta}}{S_{1i} \cdot \mu_{1i}}$ где: ΔP_{1i} – перепад давления в зерновом слое, S_{1i} – площадь поверхности фронта прогретого слоя, μ_{1i} – вязкость влажного воздуха в прогретом слое.

Определение проницаемости при известных данных по структуре слоя (размер зёрен D_0 , пористость слоя ε_i и пр.) возможно, если использовать расчётные формулы Кармана – Козени или им подобные, имеющие вид:

$$K_{\beta} = \operatorname{const} \cdot \varepsilon_i^3 \cdot D_0^2 / (1 - \varepsilon_i)^2$$

Для расчётов процессов массоотдачи при испарении внутри слоя необходимы коэффициенты массоотдачи. Обычно, для них зависимости не известны, а в многих случаях трудно определяемы. Авторы полагают, что на рассматриваемом этапе, зависимости можно найти из [11], используя имеющиеся формулы для процесса внутренней теплоотдачи в виде: $Nu_D^1 = 2,35 \cdot Pe_D^{0,38} \cdot (L/D_i)^{0,4}$, характерная скорость движения в слое, погружённом в вращающейся греющей объём ИТС радиусом R_0 и скоростью вращения n оборотов в минуту равна: $W_{сл} = n \cdot 2 \pi \cdot R_0$.

Плотность потока массы в «движущейся нагретой зоне» определяется из известного уравнения массоотдачи: $j_{E1} = \beta_p \cdot (P_w - P_{E1}) \cdot S_y \cdot (2 \cdot \delta_{w1} \cdot \pi \cdot D_i + \delta_{w1}^2) \cdot L_i$. Здесь: j_{E1} – плотность потока массы влаги, переносимой из зернового слоя от внешней поверхности ИТС к внешней движущейся границе перегретой зоны; β_p – коэффициент массоотдачи; P_w , P_{E1} – парциальные давления паров воды у стенки ИТС и в внешней среде (т.е. у условной движущейся границы нагретой зоны); $F = S_y \cdot L_i$ – поверхность массоотдачи, включая в первой стадии сушки всю внешнюю поверхность зёрен в пределах нагретой зоны, участвующей в процессе.

На основе положений изложенных в параграфах 2 и 3 сформирован алгоритм расчёта процесса сушки. Существенным дополнительными элементами этого расчёта явля-

ются процедуры, учитывающие как в самом процессе сушки возникают механизмы, подавляющие интенсивность этого процесса, вызывающие торможение.

4. Модель формирования «капиллярного механизма торможения» процесса сушки зернового слоя.

Предполагается, что первый такой механизм связан с удалением влаги, находящейся на внутренней, но внешней поверхности испарения. В различных объектах этот механизм проявляется различным образом. В случае, который изучался авторами и относился к сушке слоя зерна, по представлениям авторов, испарение влаги с внешней поверхности зёрен приводит к снижению её объёма и, как следствие, к утонению соответствующей плёнки жидкости, что ведёт к её перемещению к узким местам слоя: к местам контактов отдельных зёрен. Так как это имеет место при испарении, то в этих местах контактов возникают «углубляющиеся» по мере испарения криволинейные границы раздела фаз пар + жидкость. При этом кривизна этих границ раздела возрастает, что ведёт к появлению существенного по величине «капиллярного давления» снижающего «движущую силу» процесса массоотдачи. Схема расчётов отвечающих этому положению имеет следующую форму: $V_i = M_i / \rho_0 = (M_0 - M_{2i}) - \sum (\Delta M_i) / (N_{1i} \cdot m \cdot \rho_0)$. Здесь: V_i – остаток внешней влаги к моменту начала этапа «капиллярного» механизма торможения; M_0 – исходное количество (масса) влаги в слое; M_{2i} – та масса влаги, что находится внутри зёрен; $\sum (\Delta M_i)$ – сумма всех уменьшений массы влаги от начального 0 нулевого момента до данного i -ого; ρ_0 – плотность влаги, N_{1i} – число зёрен в i -ой части слоя, m – среднее число узлов, в которых формируются границы раздела фаз жидкость – пар.

Исходя из знания остатка поверхностной влаги, и полагая, что он распределяется, главным образом, в местах контакта элементов (зёрен) слоя, можно сделать оценку радиуса кривизны криволинейной границы раздела фаз, полагая, что этот радиус связан с масштабом объёмов жидкости в местах её размещения кубическим законом, т.е.:

$$R_{0i}^3 \approx \operatorname{const} \cdot V_i$$

Знание радиуса позволяет вычислить отвечающее ему «капиллярное давление»:

$\Delta P_{\alpha} = 2 \cdot \frac{\sigma}{R_{0i}}$, где σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Когда этот радиус кривизны становится близким к радиусам внутренних каналов среды, которая осушается, тогда наступает переход к испарению влаги из внутренних каналов, этот процесс авторами не рассматривался по целому ряду причин: 1. В столь малых по размерам каналах движение паровоздушной смеси перестаёт быть сплошным, т.е. оно подчиняется закономерностям молекулярных течений; 2. На внутренних поверхностях этих каналов при испарении должны иметь место скачки температур и давлений; 3. Нам не известна необходимая исходная информация по таким расчётам, включая сведения о размерах этих каналов, их распределении и т.д. Можно полагать, что результаты названных исследований и развитие, на их основе анализа соответствующих процессов тепло массопереноса, приведут к обнаружению своих механизмов торможения процесса сушки. Развернутый алгоритм и важные результаты для испарения поверхностной влаги представлены ниже.

5. Алгоритм расчета процесса с учетом механизма капиллярного торможения.

Алгоритм расчета основан на определении для каждого момента времени толщины прогретого слоя, в пределах которого происходит испарение, по формуле (2) и решению системы уравнений материального баланса, учитывающей материальные потоки в прогретом слое – испарение с поверхности G1, фильтрация сквозь слой материала G2, диффузия водяного пара G3 и воздуха G4:

$$\begin{cases} \frac{dG1}{d\tau} = \beta [P_n - (P_{pv} + dP_{pv})] \cdot V \cdot S_y \\ \frac{dG2}{d\tau} = \frac{K_f}{\delta_{30} \cdot \mu} \cdot [(P_{st} + dP_{st}) - P_0] \cdot \rho_a \cdot S_y \cdot V \\ \frac{dG3}{d\tau} = \frac{D_{op}}{R_a T1} \cdot \frac{(P_{pv} + dP_{pv}) - P_{pv0}}{D_i - \frac{\delta_c}{2}} \cdot \pi \cdot L_i \cdot (D_i + 2\delta_e) \\ \frac{dG4}{d\tau} = \frac{D_{op}}{R_a T1} \cdot \frac{(P_{pv} + dP_{pv}) - P_{pv0}}{D_i - \frac{\delta_c}{2}} \cdot \pi \cdot L_i \cdot (D_i + 2\delta_e) \\ dM = dG1 - dG2 - dG3 + dG4 \\ dM = dM_a + dM_v \\ dM_a = -\frac{1}{1+x} dG2 + dG3 \\ dM_v = dG1 - \frac{x}{1+x} dG2 - dG3 \end{cases} \quad (3)$$

Учитывая, что:

$$P_{st} = P_{pv} + P_{pa} \quad dP_v = \frac{R_v \cdot T1}{V_a} \cdot dM_v \quad dP_a = \frac{R_a \cdot T1}{V_a} \cdot dM_a \quad dP_{st} = dP_a + dP_v \quad (4)$$

где P_n - давление водяного пара над поверхностью зерна, P_{pv} , P_{pa} - парциальное давление водяного пара и сухого воздуха в прогретом слое, $T1$ - температура прогретого слоя, M , M_a , M_v - масса влажного воздуха, масса сухого воздуха и масса водяного пара в прогретом слое, V_a - объем воздуха в прогретом слое, x - влагосодержание воздуха в прогретом слое, размеры ИТС

Система (3) может быть преобразована к виду

$$ZX28 \cdot dM_a^4 + ZX33 \cdot dM_a^3 + ZX34 \cdot dM_a^2 + ZX35 \cdot dM_a + ZX36 = 0 \quad (5)$$

корнем которого является изменение массы сухого воздуха в слое за время Δt . Решение уравнения 5 позволяет определить изменение массы водяного пара в прогретом слое и количество удаленной влаги

$$dG1 = \left[dG3 + dM_v \cdot \frac{dM_a \cdot (M_v + dM_v)}{M_a + dM_a} \right] \quad (6)$$

Так как, изменение массы слоя происходит только за счет удаления влаги ($\Delta M = dG1$), то используя зависимости 2-6 можно определить снижение движущей силы процесса испарения влаги с поверхности за счет капиллярного торможения. Это снижение движущей силы учитывается при расчете процессов в прогретом слое в следующий момент времени.

6. Основные результаты моделирования.

Результаты моделирования представлены на следующих графиках

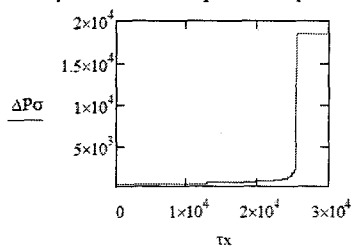


Рис. 1. Изменение капиллярного давления за время τx

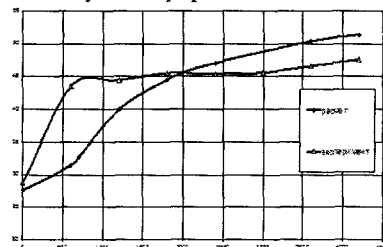


Рис. 2. Изменение температуры прогретого слоя за время τx

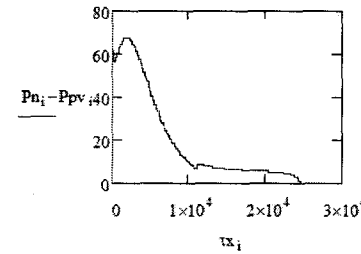


Рис. 3. Изменение движущей силы за время τx_i

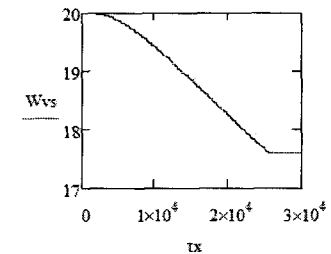


Рис. 4. Изменение влагосодержания во времени

Как можно заметить, количество влаги на внешней поверхности уменьшается, что приводит к уменьшению радиуса кривизны на границе фаз, а это сопровождается увеличением капиллярного давления и соответствующим снижением "движущей силы" переноса массы в этот момент, что приводит к резкому сокращению скорости удаления влаги. На рисунке 2 приведено сравнение результатов расчета температуры прогретого слоя с экспериментальными данными. Результаты сравнения показывают более высокую интенсивность прогрева зернового слоя на начальном этапе по сравнению с расчетной. Для устранения такого расхождения необходимо учесть влияние вращения на параметры теплового режима сушки. Примем следующие начальные предположения: при вращении некоторая часть зернового слоя, имеющая температуру нагретой зоны перемещается в верхние слои и повышает их температуру. Это означает, что в последующем развитии процессов переноса, температурные перепады в нагретой зоне будут определяться не разностями температур: температура контакта - температура окружающей среды, а в значении последней следует вводить коррекцию, учитывающую повышение температуры в внешних элементах зернового слоя, как результат их смешения с элементами нагретой зоны, поступившими, в следствие перемешивания.

Выводы: Предложенный подход является новым шагом в описании внутренних механизмов процесса сушки. Он полезен для углубления анализа внутреннего механизма процессов сушки. Полагаем, что он может быть развит для разных объектов сушки, с учётом конкретных их особенностей. В будущем предполагаем такие пути исследований:

1. Необходимо разработать подходы, связанные с испарением в некоторых внутренних мини или даже микро каналах в средах, для которых изучается сушка.
2. Разные объекты потребуют развития этого подхода и выполнение специальных экспериментов. Это может быть связано, например, с такими проблемами как: 2.1. Определение распределения количества влаги внутри высушиваемой среды. 2.2. Определение размеров внутренних каналов и их распределения и т. д.
3. Основной целью этой работы являлось не получение формул для технических расчетов, но, попытка улучшить понимание многих особенностей процессов сушки и на этой основе улучшить обобщение расчётов характеристик процесса.
4. Авторы также считают, что такой подход является новой формой построения общей теории различных процессов сушки.

Список литературы

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. Луцки 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., Сорокова Н.Н. «Математическая модель и метод расчёта тепломассопереноса 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 Power 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.
12. Гинзбург А.С. и др. «Влага в зерне» 1969г. 224стр.
13. В.П.Исаченко «Теплообмен при конденсации», Изво «Энергия», Мос. 1977год, 240 стр.