

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ИМЕНИ А. В. ЛЫКОВА**

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ
И СООБЩЕНИЙ**

Том 3

***XV Минский международный форум по тепло- и массообмену
XV Minsk International Heat and Mass Transfer Forum
23 – 26 мая 2016 г.***

Минск 2016

УДК 664.723.011

МЕХАНИЗМЫ «КАПИЛЛЯРНОГО ТОРМОЖЕНИЯ» В ПРОЦЕССАХ СУШКИ**Г. Ф. Смирнов, А. В. Зыков***Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса, Украина*

Основы подходов к моделированию процессов сушки были созданы в основном в конце прошлого века академиками А. В. Лыковым и П. А. Ребиндером [1, 2] и дополнены П. П. Луциком соотношениями для учёта деформации в материале [3] и Н. И. Никитенко [4]. С другой стороны, широко используются кинетические методы, основанные на описании кривой сушки и балансовых уравнениях теплоты и влаги. Объективный анализ современных взглядов на закономерности процессов сушки приводится в монографии [5]. Очевидно на данный момент аналитические решения задачи сушки индивидуальных частиц, с одной стороны, не могут учесть реальную сложность процессов внутри капиллярно-пористой структуры материала и на его внешней границе, а, с другой стороны, имеющиеся решения даже в значительно упрощенном виде оказываются довольно громоздкими для их дальнейшего использования в условиях массовой сушки, которые, как правило, не могут быть заданы независимым образом, а сами являются функциями процесса взаимодействия сушильного агента с большой массой дисперсного материала. Последнее обстоятельство физически является весьма существенным, поскольку это означает, что внешние по отношению к частицам условия формируются самим процессом и, следовательно, уравнения кинетики отработки отдельных частиц и уравнения балансов процесса по влаге и теплоте должны рассматриваться совместно.

Кинетические методы отражают кинетику процесса сушки в реальных условиях переменного режима в сушильной камере, однако они не раскрывают внутренних механизмов процесса сушки. 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.

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 мест контакта. В результате, это приводит к возрастанию капиллярного давления и, соответственно, уменьшению давления паров над поверхностью материала и, соответственно, движущей силы. В случае, который изучался авторами и относился к сушке слоя зерна, испарение влаги с внешней поверхности зёрен приводит к снижению её объёма и, как следствие, к утонению некоей 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:

$$V_i = \frac{M_i}{\rho_0} = \left[(M_0 - M_{2,i}) - \sum (\Delta M_i) \right] / (N_i \cdot m \rho_0).$$

Зная остаток поверхностной влаги и полагая, что он распределяется, главным образом, в местах контакта элементов (зёрен) слоя, можно оценить радиус кривизны криволинейной границы раздела фаз, допуская, что этот радиус связан с масштабом объёмов жидкости в местах её размещения кубическим законом, т. е.

$$R_{0,i}^3 \approx \text{const} \cdot V_i.$$

Знание радиуса позволяет вычислить отвечающее ему «капиллярное давление»:

$$\Delta P_{\sigma_i} = 2 \cdot \frac{\sigma}{R_{0,i}}.$$

Когда этот радиус кривизны становится близким к радиусам внутренних каналов среды, которая осушается, тогда наступает переход к испарению влаги из внутренних каналов. При этом возникают свои не менее существенные особенности. Рассмотрим их, привлекая условную схему (рис. 1).



Рис. 1. Условная схема модели внутреннего испарения. Диагональная штриховка – элементы скелета; горизонтальная – влага в капилляре; криволинейные стрелки – выход пара, его диффузия в парогазовую смесь, находящуюся над границей раздела фаз в внутреннем капилляре

Для испарения влаги из внутреннего объёма зерна нужно «преодолеть» сопротивление массопередачи, состоящее из внутреннего сопротивления, обусловленного диффузией пара внутренней влаги к внешней поверхности зёрен, гидравлического сопротивления внутри каналов и собственно диффузионное сопротивление над поверхностью раздела фаз с учетом кривизны этой поверхности. 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.

В дальнейшем, при необходимости, такие расчёты могут быть выполнены при условии, что нужная исходная информация получена и достаточна надёжна. Понятно, что анализ процесса удаления влаги из внутренних каналов станет источником своего механизма торможения. При этом возможны разнообразные физические причины возникновения и развития таких внутренних каналов. Они могут присутствовать во внутренних объёмах объекта изначально; могут возникать как результаты физических, биологических (для пищевых продуктов), химических или механических, или различных комбинаций этих воздействий. Естественно, в каждом таком случае необходимы соответствующие исследования и изучение этих проблем с целью получения нужной исходной информации. Можно

предполагать, что результаты названных исследований и развитие на их основе анализа соответствующих процессов тепломассопереноса, приведут к обнаружению, отвечающих этим формам испарения, своих механизмов торможения процесса сушки.

Так как необходимо сравнение с данными опытов для объективной оценки справедливости предлагаемого подхода, то для этого использовались полученные под руководством проф. О. Г. Бурдо данные опытов по сушке зернового слоя. 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 [6, 7]. Принципиальная схема подхода авторов состоит в следующем:

1. Необходимо задать математическое описание температурного поля, по которому определить температуры на поверхности испарения с учетом информации о подводимой к источнику тепла энергии и условий теплоотдачи от источника к объекту сушки и в окружающую среду.

2. Определить основные уравнения движения паровоздушной смеси, используя исходные данные о физических свойствах объекта сушки.

3. Определить парциальное давления пара и "движущие силы" массопереноса, используя данные распределения температуры.

4. Включить некоторые дополнительные уравнения, чтобы учесть дополнительные механизмы торможения.

5. Объединить расчётные соотношения в некую единую общую модель.

Алгоритм и важные результаты для испарения поверхностной влаги представлены ниже.

Алгоритм расчета основан на определении для каждого момента времени толщины прогретого слоя, в пределах которого происходит испарение, и решении системы уравнений материального баланса, учитывающей материальные потоки в прогретом слое – испарение с поверхности, фильтрация сквозь слой материала, диффузия водяного пара и воздуха:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dG1}{d\tau} = \beta [P_n - (P_{pv} + dP_{pv})] VS_y, \\ \frac{dG2}{d\tau} = \frac{K_f}{\delta_{30}\mu} [(P_{sl} + dP_{sl}) - P_0] \rho_a S_y V, \\ \frac{dG3}{d\tau} = \frac{D_{op}}{R_v T1} \frac{(P_{pv} + dP_{pv}) - P_{pv0}}{D_t - \frac{\delta_e}{2}} \pi L_t (D_t + 2\delta_e), \\ \frac{dG4}{d\tau} = \frac{D_{op}}{R_a T1} \frac{(P_{pv} + dP_{pv}) - P_{pv0}}{D_t - \frac{\delta_e}{2}} \pi L_t (D_t + 2\delta_e), \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} dM = dG1 - dG2 - dG3 + dG4, \\ dM = dM_a + dM_v, \\ dM_a = -\frac{1}{1+x} dG2 + dG3, \\ dM_v = dG1 - \frac{x}{1+x} dG2 - dG3, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$P_{sl} = P_{pv} + P_{pa}, \quad dP_v = \frac{R_v T1}{V_a} dM_v, \quad dP_a = \frac{R_a T1}{V_a} dM_a, \quad dP_{sl} = dP_a + dP_v.$$

Система (1) может быть преобразована к виду

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

Корнем этого уравнения является изменение массы сухого воздуха в слое за время Δt . Решение уравнения (2) позволяет определить изменение массы водяного пара в прогретом слое и количество удаленной влаги:

$$dG1 = \left[dG3 + dM_v - \frac{dM_a (M_v + dM_v)}{M_a + dM_a} \right].$$

Так как изменение массы слоя происходит только за счет удаления влаги ($\Delta M = dG1$), то, используя полученные зависимости, 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.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными представлено на рис. 2. Уменьшение количества влаги на внешней поверхности приводит к уменьшению радиуса кривизны на границе фаз, что сопровождается увеличением капиллярного давления и соответствующим снижением "движущей силы" переноса массы в этот момент. Это, в свою очередь, приводит к резкому сокращению скорости удаления влаги.

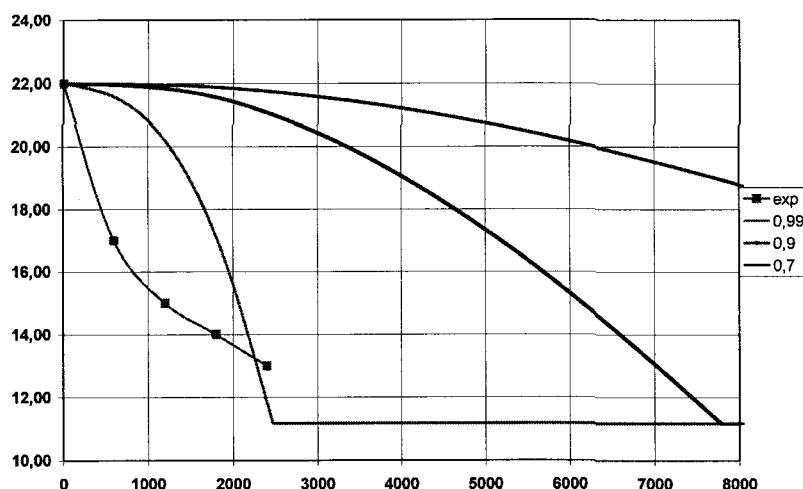


Рис. 2. Динамика удаления влаги в перемешиваемом зерновом слое при пористости 0,7; 0,9 и 0,99

Таким образом, 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.

Обозначения

V_i – остаток внешней влаги к моменту начала этапа «капиллярного» механизма торможения, м³; M_0 – исходное количество (масса) влаги в слое, кг; M_{2i} – масса влаги внутри зёрен, кг; $\Sigma \Delta M_i$ – сумма всех уменьшений массы влаги от начального нулевого момента до данного i -го, кг; ρ_0 – плотность влаги, кг/м³; N_{1i} – число зёрен в i -й части слоя, m – среднее число узлов, в которых формируются границы раздела фаз; $\Delta P_{\delta i}$ – повышение «капиллярного давления», что ведёт к уменьшению «движущих сил» процесса массоотдачи, Па; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; R_{0i} – текущее значение некоторого радиуса кривизны, м; $G1$ – поток водяного пара с поверхности зерна; $G2$ – фильтрационный поток сквозь слой материала; $G3$ – диффузионный поток водяного пара; $G4$ – диффузионный поток воздуха; D_{op} – коэффициент диффузии водяного пара в воздухе.

Литература

1. Лыков А. В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. – 472 с.
2. Ребиндер П. А. О формах связи влаги с материалами в процессе сушки // Всесоюз. науч.-техн. совещание по сушке. М., 1958. С. 20–33.
3. Луцик П. П. Массопроводность деформируемого в процессе сушки твердого пористого тела // Промышленная теплотехника. 1987. Т. 9, № 5. С. 29–34.
4. Никитенко Н. И. Теория тепломассопереноса. Киев: Наукова думка, 1983. – 352 с.
5. Бурдо О. Г. Эволюция сушильных установок. Одесса: Полиграф, 2010. – 368 с.
6. Безбах И. В., Бурдо О. Г. Термомеханический агрегат для дисперсных продуктов // Наукові праці ОНАХТ. 1999. Вип. 21. С. 234–237.
7. Воскресенская Е. В. Особенности кинетики процесса сушки в термосифонно-механическом агрегате // Наукові праці ОНАХТ. 2010. Вип. 37. С. 81–84.

Покусаев Б. Г., Карлов С. П., Некрасов Д. А., Захаров Н. С. Исследование микроконвекции в условиях нестационарного тепловыделения в пристенном зернистом слое жидкости.....	188
Рудобашта С. П., Зуева Г. А., Зуев А. Н. Осциллирующая инфракрасная сушка и стимуляция семян.....	191
Рудобашта С. П., Кошелева М. К. Определение кинетических коэффициентов в процессах сушки и термовлажностной обработки материалов.....	195
Сафин Р. Р., Кайнов П. А., Хакимзянов И. Ф., Мухаметзянов Ш. Р. Применение энергосберегающих мероприятий в процессах сушки древесных материалов.....	199
Смирнов Г. Ф., Зыков А. В. Механизмы «капиллярного торможения» в процессах сушки.....	202
Сорока Б. С., Воробьев Н. В., Кудрявцев В. С., Згурский В. А., Карабчиевская Р. С. Теплообмен и аэродинамическое сопротивление современных высокотемпературных рекуператоров с внутритрубными вставками.....	206
Сорокин В. В. Моделирование износа частиц в плотном вращающемся слое внутри неподвижной вихревой камеры.....	210
Фатыхов М. А. О зависимости энергии активации дегазации от диэлектрических характеристик углеводородных диэлектрических жидкостей.....	213
Филатов С. А., Батырев Е. В., Долгих М. Н., Кучинский Г. С. Исследование особенностей теплообмена в резиносмесителях тангенциального типа периодического действия.....	216
Акулич А. В., Лустенков В. М., Акулич В. М. Исследование эффективности улавливания систем пылеочистки в тепломассообменных процессах на основе комбинированных аппаратов.....	220
Алексеев С. В., Лежнин С. И., Прибатурин Н. А., Алексеев М. В., Вожаков И. С., Сорокин А. Л. Особенности эволюции волн давления, генерируемых вскипающим теплоносителем.....	224
Гимбицкий А. В., Каримова А. Г., Дезидерьев С. Г. Результаты исследования тепловой защиты созданием воздушной завесы через пористый экран.....	228
Громов В. С., Явкин В. Б., Тонконог В. Г., Серазетдинов Б. Ф., Хабибуллин И. М., Тукмаков А. Л., Агалаков Ю. В. Моделирование термогазодинамических процессов в подогревателе природного газа и разработка подогревателей.....	232
Лозовецкий В. В., Лебедев В. А., Пелевин Ф. В., Пономарев А. В. Структурные и физико-механические характеристики засыпок измельченной древесины в цилиндрическом бункере.....	235
Храмцов Д. П., Некрасов Д. А., Покусаев Б. Г. Экспериментальное и численное моделирование массообмена газовых снарядов при движении в наклонных трубах.....	237
Макаров М. С., Накоряков В. Е., Наумкин В. С. Численное моделирование разделения гелий–метановой смеси в плоском мембранном модуле при турбулентном режиме течения.....	240
Федоров А. В., Лисицын А. Н., Волков С. М., Новоселов А. Г. Тепломассообмен и гидрогазодинамика барботаж с использованием мультикомпонентной газовой фазы в технологических процессах и аппаратах производства растительных масел.....	244

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ И ОБОРУДОВАНИИ. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Алехина С. В., Костиков А. О., Мацевитый Ю. М. Численное моделирование теплового состояния контейнеров с отработавшим ядерным топливом.....	249
Андрижиевский А. А., Трифионов А. Г., Кулик Л. С. Моделирование термоконвективных потоков в пассивных системах отвода тепла.....	251