

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ СУШКЕ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ

О.Г. Бурдо, Ю.А. Казмирук

Одесская Национальная Академия Пищевых технологий

[terma@osaft.odessa.ua](mailto:terma@osaft.odessa.ua)

**Аннотация.** В статье обсуждаются вопросы энергетики, продолжительности процесса и качества продукции при сушке. Обоснован новый подход к моделированию сушки и сушильной техники. Анализируются пути совершенствования энерготехнологий сушки. Представляются механизм и математическая модель процесса сушки дисперсных продуктов комбинированным способом.

**Ключевые слова:** моделирование сушки, совершенствования энерготехнологий сушки.

## POȘIBILITĂȚI DE SPORIRE A EFICIENȚEI ENERGETICE A PROCESULUI DE USCARE A PRODUSELOR DISPERSATE

Burdo O., Kazmiruk I.

Academia Națională a Tehnologiilor de Alimentare din Odessa

**Rezumat.** În acest articol se discută probleme ale energiei, problemele duratei procesului și calității producției în procesul de uscare a produselor dispersate. S-a argumentat un nou mod de abordare a modelării procesului de uscare și echipamentului de uscare. Sunt analizate căile de perfecționare ale tehnologiei de uscare. Sunt prezentate mecanismul și modelul matematic al procesului de uscare a produselor dispersate prin metoda combinată.

**Cuvinte cheie:** modelarea uscării, modelul matematic, proces de uscare.

## WAYS OF POWER EFFICIENCY INCREASE AT DRYING DISPERSABLE PRODUCTS

Odessa National Academy of Food Technologies

Burdo O.G., Kazmiruk Iu.A.

**Abstract.** In the article questions of power, duration of process and quality production's quality during drying are discussed. The new approach to modeling of drying and drying equipment is proved. Ways of perfection technologies of drying are analyzed. The mechanism and mathematical model of drying's process of dispersive staffs by the combined way are presented.

**Key words:** modeling of drying, mathematical model, process of drying.

**Введение.** Традиционная конвективная сушка связана с необходимостью перемещения больших объемов сушильного агента. В результате – значительные потери энергии с отработанным сушильным агентом. Их доля составляет 70 % от общих потерь энергии при сушке. Проблемы с равномерным распределением потоков сушильного агента не исключают локальный перегрев объектов сушки и его недогрев. Все это определяет проблемы сушильных технологий в пищевой и перерабатывающей промышленности [1, 2, 3, 4]:

- высокая энергоемкость;
- значительная продолжительность;
- экологическая опасность загрязнения окружающей среды и продукции.

Анализ характера развития сушильной техники и литературных источников показывает, что энергетическому анализу сушильной техники уделяется мало внимания [5, 6].

**Цель и научно-техническая идея работы.** Сушка – это комплекс тепловых и массообменных процессов, который логично требует комплексного подхода к его изучению и решению сопутствующих ему проблем. Исходя из этого, целью работы является – изучение комбинированного воздействия различных факторов на процесс сушки.

Представляется, что сушилки нового поколения должны основываться на следующих концептуальных положениях. Во-первых, нужно снять с воздуха роль теплоносителя и оставить для него только функцию диффузионной среды, что существенно улучшит энергетические характеристики. Во-вторых, следует формировать как отдельные задачи транспортировку влаги из середины продукта к его

поверхности и отвод влаги в поток воздуха. В-третьих, ставить задачу частичного обезвоживания продуктов без осуществления фазового перехода влаги в пар.

Основой научного обоснования поставленных задач является анализ отдельных процессов и прогнозирование возможностей при их комбинировании. Ставится задача поиска комбинированных процессов воздействия на продукты, что даст возможность максимально использовать достоинства и возможности разных принципов энергетического, механического и диффузионного воздействия, приводящих к общему повышению эффективности использования энергии и повышению качества продукции.

Энергетические проблемы решаются путем использования эффективных теплоподводов, тепловых насосов и средств объемного безградиентного нагрева, что обеспечивает реализацию первой задачи. Именно такие системы энергетического воздействия позволяют к транспортировке влаги по капиллярам к поверхности подключить мощный механизм бародиффузии, который на порядки превышает кинетические коэффициенты массопереноса по сравнению с традиционным процессом конвективной диффузии в стесненных условиях. Переход к макрокинетическим процессам диффузии влаги открывает новые перспективы, как для энергосбережения, так и для повышения качества продукции в связи с мягкостью режимов сушки. По сути, энерговоздействие осуществляется на наномасштабном уровне, а это будущее направление технологий вообще.

**Математическое и экспериментальное моделирование процессов обезвоживания.** Математическая модель процессов базируется на совместном рассмотрении уравнений Фика и гидравлики капиллярной системы продуктов. Сушка рассматривается как суперпозиция трех процессов: конвективной диффузии, диффузии в стесненных условиях капилляров и десорбции влаги [7]. Каждый процесс представляется уравнением в обобщенных переменных в виде зависимости числа Шервуда от числа Пекле и специального числа, учитывающего эффект действия электромагнитного поля.

Современные представления механизмов обезвоживания при сушке базируются на основах тепломассопереноса при фазовых превращениях и на теории П.А. Ребиндера о формах связи влаги с материалом. Внешние воздействия различного происхождения (тепловое, инерционное, диффузионное, электромагнитное и т.д.) формируют в продукте поля температур, давления, влагосодержания. Совмещенное влияние соответствующих движущих сил определяет развитие гидродинамических, тепловых и массообменных процессов. Теория сушки, основы которой заложено А.В. Лыковым [8], определяет зависимость потока влаги в объеме капиллярно-пористого тела в форме:

$$j = -\left( D\rho_{\text{н}} \nabla U + D\delta\rho_{\text{н}} \nabla t + K_{\delta} \nabla P \right), \quad (1)$$

где  $\nabla U$ ,  $\nabla t$ ,  $\nabla P$  – градиенты влагосодержания, температуры и давления соответственно;  $\delta$  – относительный коэффициент термодиффузии (кг/кг·К);  $K_{\rho}$  – коэффициент фильтрационного (молярного) переноса (кг/м·с·Па).

Зависимость (1) показывает, что общий поток влаги из частички определяется тремя взаимозависимыми действующими силами  $\nabla U$ ,  $\nabla t$ ,  $\nabla P$ . Результатом процесса будет нестационарное поле концентраций влаги в частичке:

$$\frac{dC}{d\tau} = -\text{div}(j + Cw) + I_{\text{а}}. \quad (2)$$

Левая часть уравнения (2) характеризует локальное изменение концентрации влаги, которая переносится. Правая часть определяет диффузионный перенос ( $div \underline{j}$ ), конвективный перенос ( $div C \underline{w}$ ) и бародиффузионный поток влаги  $I_b$ . Именно сумма дивергенций от потоков конвективного и диффузионного определяет нестационарное поле концентраций влаги в частичке в традиционных конвективных режимах сушки.

Такая специфика многих пищевых продуктов как термолабильность регламентирует температурные нагрузки на них. Поэтому использовать для организации транспортировки влаги в них термодиффузионный поток нельзя. Таким образом, градиент  $\nabla t$  практически не влияет на поток влаги в капиллярах, что дает право упростить задачу и пренебречь этой составляющей.

Поставим задачу инициировать бародиффузию в капилляре для транспортировки влаги на поверхность. Рассмотрим капиллярный канал материала. Сведем задачу к одномерной и запишем дифференциальное уравнение массопереноса по оси  $x$ :

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial C}{\partial x} w_x. \quad (3)$$

Распределение концентраций ( $C$ ) зависит от суммарного воздействия микрокинетики (первая составляющая) и макрокинетики (вторая составляющая). Рассмотрим задачу диффузии в капилляре в процессе сушки. Движение влаги в капилляре к поверхности тела определяется градиентом концентраций по оси  $x$  и значением коэффициента диффузии ( $D$ ). С ростом температуры процесса повышается значение коэффициента диффузии, однако, стесненность в условиях капилляра не дает существенно интенсифицировать процесс переноса. Более того, уровень температуры является противоречивым фактором, так как требования к качеству пищевых продуктов определяют задачу ее снижения. Таким образом, согласно соотношению (3) есть только одна возможность интенсификации перемещения влаги в капилляре – за счет скорости  $w_x$ . Эффективным механизмом организации такого движения может стать бародиффузия.

В такой постановке задачу сведено к двум. Первая – сугубо гидравлическая, связанная с оценкой гидравлического сопротивления капилляра. Вторая задача – термодинамическая, по решению вопроса определения энергии, которая нужна для преодоления этого сопротивления. Гидравлическое сопротивление такого канала ( $\Delta P$ ) определяется скоростью потока жидкости ( $w$ ), ее плотностью ( $\rho$ ), суммой местных сопротивлений ( $\xi$ ), силами поверхностного натяжения ( $\sigma$ ):

$$\Delta P = \frac{\rho w^2}{2} \left[ \frac{\lambda l}{d} + \sum \xi \right] + \rho g l + \frac{\sigma}{d}. \quad (4)$$

Обобщение экспериментальных данных целесообразно проводить как зависимость массообменных чисел Стантона и Пекле:

$$St_m \equiv \frac{\beta}{w} = A Pe_m^k \varepsilon. \quad (5)$$

Проведенный выше анализ схемы массопереноса показывает, что значение  $\beta$  определяется инерцией потока (массоперенос в условиях свободного движения отсутствует), геометрические параметры аппарата не могут непосредственно влиять на

интенсивность массоотдачи. В этих условиях скорость потока может быть принята в качестве значения коэффициента массоотдачи и служит для него масштабом отнесения.

Для расчета процессов сушки продуктов выбор формы модернизированного числа Пекле, определяющего размера и характерной скорости можно провести по рекомендациям в табл. 1.

Таблица 1  
Схемы расчета модернизированного числа Пекле

Гидродинамическая ситуация	Определяющий размер	Скорость	Число $Pe_m$
Движение воздуха над слоем	$l$ – длина (ширина) слоя	$w$ – относится к полному сечению аппарата	$Pe_i = \frac{wl}{D}$
Неподвижный слой	$d_{\text{ч}}$ – диаметр частички	$w = V/(\varepsilon F)$ $\varepsilon$ – пористость	$Pe_i = \frac{wd}{D}$
Плотный подвижный слой	$d_{\text{т}}$ – диаметр трубы	$w_c$ – скорость слоя	$Pe_i = \frac{w d}{D}$
Кипящий слой	$d_{\text{ч}}$ – диаметр частички	$w = V/F$ $V$ – расход $F$ – сечение	$Pe_i = \frac{wd}{D}$

Сведения табл. 1 охватывают большинство задач первого периода сушки. Получение констант уравнения (5) для внутренних задач требует обобщения известных массивов экспериментальных данных с учетом структурных характеристик объекта сушки.

Предлагаемый подход позволит рассчитывать кинетику сушки при известных режимных параметрах и структурных характеристиках продукта, обосновать и оптимизировать процессы сушки при комбинированном воздействии на такие материалы.

Таким образом, решение упомянутых проблем сушильных технологий и поставленных задач требует использования энергии только на нагрев продукта и поддержку процесса бародиффузии влаги из него и незначительного количества энергии на выведение влаги за пределы сушильной камеры, а также использования мягких режимов технологической обработки объектов сушки.

Вариантом реализации комплексного подхода к сушке дисперсных продуктов может быть комбинированное воздействие физических факторов, которое обеспечивается электромагнитным полем (ЭМП) и режимом псевдооживления слоя путем продувания его воздухом из окружающей среды. Такой подход характеризуется системой показателей, которые позволяют уменьшить энергетические затраты, сократить длительность технологической обработки продуктов, улучшить экологическую ситуацию окружающей среды и качество продукции благодаря использованию эффективных экологически безопасных систем энергетического воздействия. Экспериментальные данные по сушке нута предлагаемым способом подтвердили положительный эффект. Зерна нута сушили от 20 до 12 % влажности при различных режимах псевдооживления и параметрах подвода электромагнитного поля. Псевдооживление осуществлялось воздухом температуры окружающей среды. Температура продукта поддерживалась на уровне 60 °С. Выбор данной температуры объясняется тем, что она является верхней границей стойкости биологически активных веществ (БАВ) и биологических мембран, и тем, что при ней уже достаточно интенсивно происходит процесс обезвоживания.

Разработана экспериментальная установка для исследования комбинированной сушки дисперсных пищевых продуктов (рис. 1), которая включает: сушильную камеру с электромагнитным генератором 1, рабочую ячейку 2 с продуктом 3, измерительный прибор 4, пьезометр (вакуумметр) 5, коллектор 6, вентилятор 7, амперметр 8, трансформатор 9 и вольтметр 10.

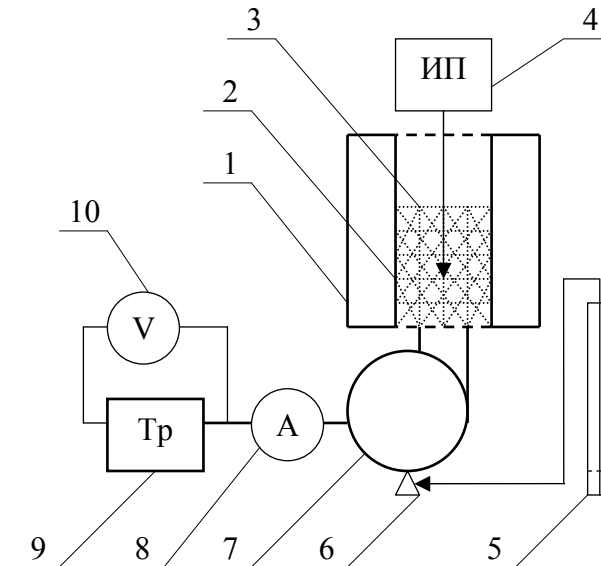


Рис. 1 – Схема установки для исследования комбинированной сушки дисперсных пищевых продуктов

Опыты показали преимущества разработанного способа сушки по сравнению с наиболее распространенным конвективным способом в скорости процесса и энергетике. Эти параметры процесса напрямую зависят от режима псевдооживления (скорости, расхода, цикличности подачи и температуры воздуха) и от режима подачи микроволнового поля (подводимой мощности, удельной мощности, цикличности подачи). Различные сочетания режимных параметров комбинированного воздействия могут на порядок изменять как скорость сушки, так и удельные энергетические затраты.

Исследования проводились по следующей методике. До начала опыта измеряли влагосодержание нута методом высушивания до постоянной массы, температура нута и воздуха, масса нута и рабочей ячейки; рассчитывалась нагрузка на газораспределительную решетку. Далее устанавливали необходимую удельную мощность ЭМП СВЧ, настраивали необходимый режим псевдооживления. В течение опыта измеряли температуру и массу нута ( $G$ , кг), статическое давление в коллекторе ( $H_{\text{н}0}^{\varepsilon}$ , Па.), которое на расстоянии  $(1,5 - 2) d_k$  от входа численно равно динамическому. Скорость воздуха в рабочей ячейке с нутом рассчитывалась по эмпирической формуле:

$$v = 1,29 \sqrt{H_{\text{н}0}^{\delta.y.}}, \text{ м/с}, \quad (6)$$

где  $H_{\text{н}0}^{\delta.y.} = \varepsilon H_{\text{н}0}^{\varepsilon} \left( \frac{d_{\varepsilon}}{d_{\delta.y.}} \right)^4$  – статическое давление в рабочей ячейке, мм, где  $\varepsilon$  –

пористость слоя продукта;  $d_k$  – внутренний диаметр коллектора, мм;  $d_{p.y.}$  – внутренний диаметр рабочей ячейки, мм.

Текущая влажность продукта ( $\omega$ ) вычислялась по формуле:

$$\omega_n = 100 - \frac{G_{n-1}}{G_n} (100 - \omega_{n-1}), \% \quad (7)$$

Режимы комбинированной сушки нута представлены в табл. 2. Результаты опытов отображены на рис. 2, 3.

Таблица 2  
Режимы комбинированной сушки нута

Параметры режимов	Режимы сушки			
	1 (базовый)	2	3	4
Нагрузка на газораспределительную решетку $\Omega$ , кг/м <sup>2</sup>	69	69	69	69
Скорость воздуха в рабочей ячейке $v$ , м/с	0,71	0,71	0,71	0,71
Удельная мощность ЭМП $p_p$ , кВт/кг исп. влаги	13,575	9,125	10,700	13,350
Цикличность подачи ЭМП $\zeta_p$ , с/с	0/0	21/9	24/6	27/3
Цикличность подачи воздуха $\zeta_k$ , с/с	0/0	9/21	6/24	3/27

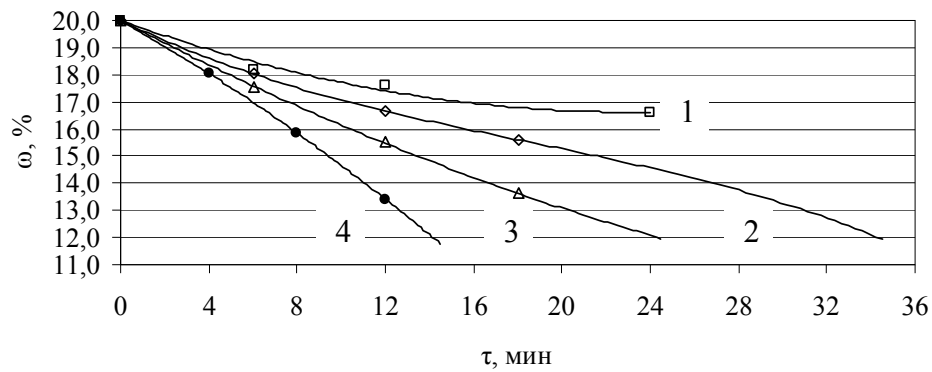


Рис. 2 – Комплексное влияние цикличности подачи (удельной мощности) ЭМП и воздуха на кинетику комбинированной сушки нута

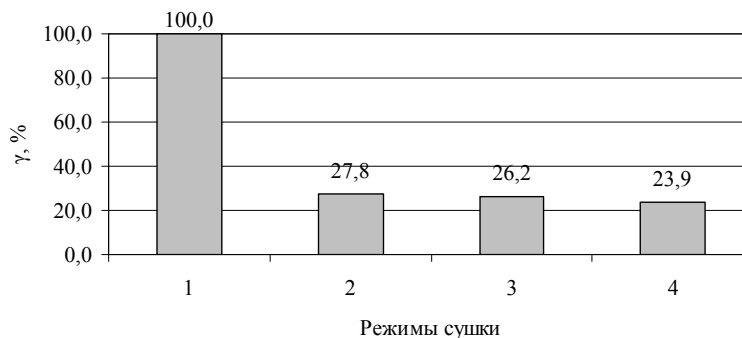


Рис. 3 – Комплексное влияние цикличности подачи (удельной мощности) ЭМП и воздуха на удельные энергетические затраты при разных режимах комбинированной сушки нута

$$\gamma = \frac{q}{q_{\text{aac}}} \cdot 100, \% \text{ — коэффициент удельных энергетических затрат (отношение}$$

энергоемкости рассматриваемого комбинированного метода сушки к энергоемкости базового комбинированного метода).

### **Выводы**

1. Сушка – сложный тепломассообменный процесс, который является комплексом трех процессов: конвективной диффузии, диффузии в стесненных условиях капилляров и десорбции влаги, а значит, нуждается в комплексном подходе к его изучению и решению сопутствующих ему проблем.

2. Каждый процесс (подпроцесс) как составляющая целого процесса сушки имеет свои особенности и факторы, которым он подчиняется, а значит и соответствующие способы воздействия на него.

3. Комбинированные способы сушки – перспективный путь к решению проблем сушильных технологий в пищевой и перерабатывающей промышленности. Комбинированное воздействие электромагнитного поля и псевдооживления – один из вариантов интенсификации и снижения энергетических затрат процесса сушки дисперсных продуктов.

### **Литература**

1. Бурдо О.Г. Энергоэкономические аспекты развития перерабатывающей отрасли АПК // *Зернові продукти і комбікорми.*– 2001.– № 4.– С. 58 – 60.
2. Бурдо О.Г. Енергетичний консалтинг в АПК Південного регіону // *Енергозберігаючі технології й автоматизація.*– 2001.– № 1 – 2.– С. 70 – 74.
3. Захаров М.Д. Удосконалення енерготехнологій АПК / М.Д. Захаров, О.Г. Бурдо, І.В. Безбах // *Інтегровані технології та енергозбереження.*– 2001.– № 2.– С. 3 – 6.
4. Бурдо О.Г. Невтішний виходить моніторинг енергозатрат / О.Г. Бурдо, О.В. Зиков, В.І. Донкоглов // *Зерно і хліб.*– 2006.– № 3.– С. 46 – 48.
5. Бурдо О.Г. Тенденції розвитку зерносушильної техніки / О.В. Воскресенська, В.І. Донкоглов // *Зернові продукти і комбікорми.*– 2006.– № 2.– С. 48 – 53.
6. Бурдо О.Г. Сушити горох варто за економними технологіями / О.Г. Бурдо, І.В. Безбах, В.І. Донкоглов, Ю.О. Казмірук // *Зерно і хліб.*– 2007.– № 1.– С. 46 – 47.
7. Бурдо О.Г. Наномасштабные эффекты в пищевых технологиях // *Инженерно-физический журнал.* Минск.– Т. 78.– № 2.– С. 88 – 93.
8. Лыков А.В. Теория сушки. М., “Энергия”, 1968. 472 с.

### **Сведения об авторах.**

Бурдо Олег – Одесская национальная академия пищевых технологий, кафедра процессов и аппаратов; заведующий кафедры, доктор технических наук, профессор. Область научных интересов: энергосберегающие и энергоэффективные технологии, нанотехнологии пищевых производств. Информация для контактов: раб.тел.: 8-(10+38+048)+712-41-75, +712-41-29; e-mail: terma@osaft.odessa.ua.

Казмирук Юрий – Одесская национальная академия пищевых технологий, кафедра процессов и аппаратов; аспирант. Область научных интересов: энергосберегающие и энергоэффективные технологии, нанотехнологии пищевых производств. Информация для контактов: раб. тел.: 8-(10+38+048)+712-41-29; e-mail: terma@osaft.odessa.ua.