

БАРОДИФУЗИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Бурдо О.Г.

Одесская национальная академия пищевых технологий

Приведены результаты исследований нового научно-технического направления - бародиффузионных технологий переработки растительного сырья. Представлены модели процессов массопереноса при сушке и экстрагировании. Приведены результаты экспериментальных исследований. Делается прогноз о эффективности бародиффузионных технологий в пищевых аппаратах.

The results of studies of new scientific and technological areas - barodiffuzionnyh technologies for processing plant raw materials. Models of mass transfer processes of drying and extraction. The results of experimental studies. To make forecasts about the effectiveness of barodiffuzionnyh technologies in food devices.

Ключевые слова: бародиффузия, массоперенос, сушка

Ряд важных массообменных процессов переработки пищевого сырья, характеризуются экспоненциальными зависимостями кинетики извлечения целевого компонента. Наиболее яркими примерами являются процессы сушки и экстрагирования растительного сырья. Снижение интенсивности переноса при повышении внутреннего диффузионного сопротивления создает определенные проблемы обеспечения надежного функционирования массообменного аппарата. Так при сушке сырья переход от регулярного режима к режимам падающей скорости сушки приводит к перегреву продукта, перерасходу энергии, повышению продолжительности процесса [1, 2]. При экстрагировании переход к внутридиффузионным процессам переноса приводит часто еще и к потере ценных компонентов с отходами производства.

Исследования данной работы направлены на интенсификацию процессов массопереноса. Представляется, что внедрение бародиффузионных технологий (БДТ) при переработке растительного сырья является мощным механизмом повышения эффективности массообменных аппаратов. Можно ожидать, что БДТ окажутся эффективными при активации сырья и при инактивации в микробиологических процессах.

Развитие моделей процессов сушки. Усилия большинства ученых в области сушки были направлены на экспериментальное моделирование процессов, разработке методов расчета кинетики сушки [1, 2, 3]. Определилась тенденция все большего ограничения в моделях видов объектов и продуктов. Оправданием являлось повышение точности модели. Наконец, стали использовать регрессионные модели, описывающие массивы экспериментальных данных. Точность таких моделей определялась погрешностями экспериментальных данных, возможностями математического аппарата и оказывалась вполне приемлемой для инженерных задач. Однако эти модели справедливы только для условий опытов и для исследованного объекта, т.е. не распространяются даже на класс подобных задач, не могут быть использованы для корректной постановки задач прогнозирования и оптимизации даже исследованного аппарата. Правомочен вопрос о целесообразности построения регрессионных моделей процессов массопереноса.

Таким образом, теория сушки не может эффективно использовать огромный по объему экспериментальный материал. Общие модели не точны, а точные регрессионные модели не могут дать никакой новой информации. Специфика многообразных задач сушки объясняется молекулярным натеканием газа по микрокапиллярам (эффузия), диффузией скольжения (поток парообразной влаги, переносимой при помощи теплового скольжения), циркуляцией газа в макропорах (естественная конвекция) [1 - 3]. Трудно понять термин “концентрационная диффузия” применительно к потоку влаги внутри твердого капиллярно-пористого тела. Если существует такой процесс, то он должен согласовываться с уравнением Фика, характеризоваться соответствующим коэффициентом диффузии. Вместе с тем, коэффициенты диффузии воды непосредственно в твердых водонерастворимых структурах не определялись, ясно, что их величины ничтожно малы для заметного влияния на кинетику сушки. Очевидно, понятием “концентрационная диффузия” подменяется результат сложного гидравлического перераспределения влаги внутри тела в системе параллельных капилляров, вызванного процессом парообразования в макрокапиллярах и перекачкой жидкости в микрокапилляры.

Представляется, что возникшие при описании процесса сушки проблемы объясняются тем, что все авторы, сторонники феноменологического подхода, рассматривают сушку как некий один процесс с постоянными коэффициентами переноса и формируют модели из этих предположений.

Автором [3, 4] выдвигается гипотеза, что сушка – это результат действия, на принципе суперпозиции, ряда процессов, каждый из которых подчиняется своим законам переноса и реализуются за счет разных механизмов. Такая модель сушки должна учитывать распределение во времени поверхностной влаги (U_p), влаги в капиллярах (U_k) и адсорбционно связанной влаги (U_A). При такой постановке усложняются и система уравнений А.В.Лыкова:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U_p}{\partial \tau} &= K_{11} \nabla^2 U_p + K_{12} \nabla^2 U_k + K_{13} \nabla^2 U_A + K_{14} \nabla^2 t + K_{15} \nabla^2 P \\ \frac{\partial U_k}{\partial \tau} &= K_{21} \nabla^2 U_p + K_{22} \nabla^2 U_k + K_{23} \nabla^2 U_A + K_{24} \nabla^2 t + K_{25} \nabla^2 P \\ \frac{\partial U_A}{\partial \tau} &= K_{31} \nabla^2 U_p + K_{32} \nabla^2 U_k + K_{33} \nabla^2 U_A + K_{34} \nabla^2 t + K_{35} \nabla^2 P \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} &= K_{41} \nabla^2 U_p + K_{42} \nabla^2 U_k + K_{43} \nabla^2 U_A + K_{44} \nabla^2 t + K_{45} \nabla^2 P \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} &= K_{51} \nabla^2 U_p + K_{52} \nabla^2 U_k + K_{53} \nabla^2 U_A + K_{54} \nabla^2 t + K_{55} \nabla^2 P \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Выдвинутая гипотеза не противоречит фундаментальным представлениям физики влажного капиллярно-пористого тела, а наоборот устраняет определенные противоречия между физической моделью П.А.Ребиндера и математической моделью А.В. Лыкова.

Расчет коэффициентов массоотдачи β проводится на основе уравнений в обобщенных переменных, как зависимость числа Шервуда от чисел Рейнольдса и Шмидта: $Sh = A Re Sc_m$. Более перспективным может стать обобщение в виде соотношения массообменных чисел Стантона и Пекле:

$$St_m \equiv \frac{\beta}{w} = A Pe_m^k$$

Значение β 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 характеристического значения коэффициента массоотдачи, и служить для него масштабом отнесения.

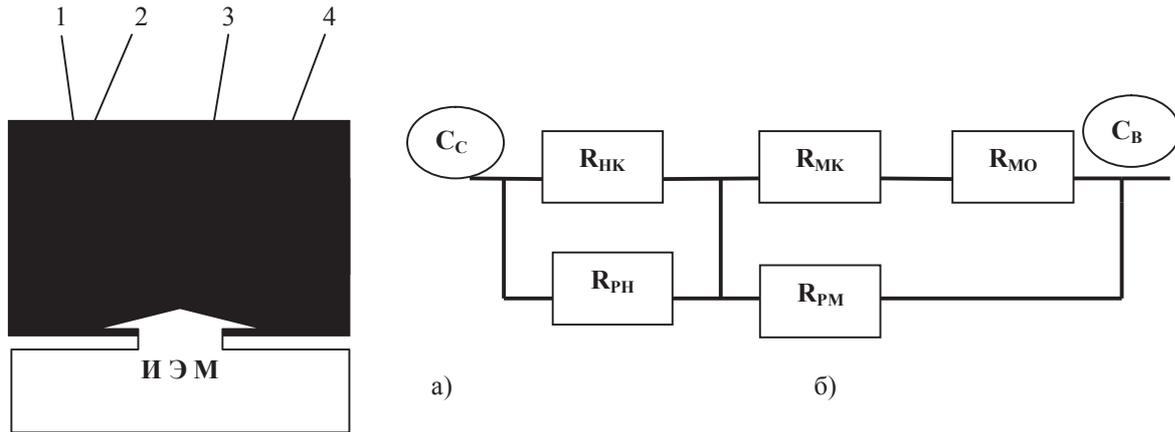
Предлагаемый подход позволит рассчитывать кинетику сушки при известных режимных параметрах и структурных характеристиках продукта, обосновывать и оптимизировать процессы сушки при комбинированном [3, 5] воздействии на продукт.

Механизм бародиффузионного массопереноса. Механизм комбинированного нано- и макропереноса влаги (и других компонентов) из волокнистой структуры в воздух поясняется схемой (рис.1,а) и электродиффузионной моделью (рис.1,б). Последовательная цепочка диффузионных сопротивлений состоит из суммы: $\Sigma R = R_{нк} + R_{мк} + R_{мо}$. Процесс конвективной массоотдачи от поверхности продукта в поток воздуха имеет наименьшее диффузионное сопротивление ($R_{мо}$). Влага перемещается по микрокапиллярам к поверхности продукта, преодолевая диффузионное сопротивление ($R_{мк}$). Это конвективная диффузия в стесненных условиях (поток j_1). Диффузионное сопротивление нанокapилляров обозначено ($R_{нк}$). Это наибольшее диффузионное сопротивление, поскольку, стесненность диффузионных процессов в нанокapиллярах максимальна. При воздействии импульсного электромагнитного поля (ИЭМ) инициируется поток влаги из капилляров (j_2). По сути, это бародиффузия, которая определяется растущим в капиллярах давлением P_k (рис.1). Отдельные капилляры, где достигнуты условия для генерации паровой фазы, начинают периодически выбрасывать в воздух жидкость из капилляров.

Влага из нанокapилляров выбрасывается в микрокапилляры преодолевая диффузионное сопротивление ($R_{пн}$). Частота таких выбросов и число функционирующих капилляров растет с ростом N - мощности излучения.

Согласно схеме (рис.1) переноса влаги из твердого тела, концентрация воды в котором (C_c), поля концентраций воды в диффузионной среде (C_b) определяются совместным действием конвективной диффузии из пористой среды и бародиффузии из ряда капилляров. При постановке задачи будем считать, что результирующее значение концентрации воды в воздухе определяются по принципу суперпозиции этих двух процессов [3, 5].

Модель массопереноса из пористого тела сферической формы. Рассмотрим кинетику извлечения воды из пористого тела, сделав следующее упрощающее допущение: 1) выделим на поверхности тела область, для которой толщина пограничного слоя δ воды значительно меньше длины выделенной области. При моделировании представим поверхность зерна как пластину, омываемую тонким ламинарным слоем.



1 – твердое тело, 2 – паровой пузырек, 3 – стенка капилляра, 4 – влага

Рис. 1 – Процесс бародиффузии: а) – схема, б) – электродиффузионная модель

Продольная скорость w изменяется от 0 на поверхности сферы до $w\delta$ на внешней границе слоя. Уравнение диффузии, устанавливающее распределение концентрации C во времени τ в одной точке, конвективное изменение концентраций при переходе от точки к точке, зависящее от компонент скорости w_x и w_y , имеет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial c}{\partial x} + w_y \frac{\partial c}{\partial y} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

Правая часть уравнения (2) характеризует молекулярную диффузию. Поставим задачу определить функцию $c(\tau, x, y)$ в слое δ , считая, что геометрические размеры выделенной области значительно превосходят толщину δ . Используя метод двумерного комплексного преобразования Фурье с бесконечными пределами интегрирования при начальных условиях $c(\tau, x, y)|_{\tau=0} = 0$ и граничных условиях:

$$c|_{x=\infty} = \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=\pm\infty} = 0; \quad c|_{y=\pm\infty} = \frac{\partial c}{\partial y} \Big|_{y=\pm\infty} = 0 \quad (3)$$

можно получить решение, считая, что компоненты скорости w_x и w_y заданы и не зависят от координат, процесс диффузии проходит не зависимо от координаты Z . Предположив, что искомая функция $c(\tau, x, y)$ удовлетворяет условиям Дирихле на промежутке $(-\infty, +\infty)$ по переменным x, y и условиям на границе (3), запишем:

$$c(\tau, x, y)|_{\tau=0} = \exp[-(|x| + |y|)]. \quad (4)$$

Определив двумерную трансформанту искомой функции и выполнив двойное интегрирование, заменим экспоненциальное выражение первыми членами его разложения в степенной ряд, с учетом симметрии задачи, найдем решение краевой задачи:

$$c(\tau, x, y) = \frac{1}{(1 - D\tau)^2} \left\{ \exp[(w_x + w_y)\tau - (|x| + |y|)] + D\tau \exp \frac{1}{\sqrt{D\tau}} [(w_x + w_y)\tau - (|x| + |y|)] - \right. \\ \left. - \sqrt{D\tau} \left\{ \exp \left[\left(w_x + \frac{w_y}{\sqrt{D\tau}} \right) \tau - \left(|x| + \frac{|y|}{\sqrt{D\tau}} \right) \right] + \exp \left[\left(w_y + \frac{w_x}{\sqrt{D\tau}} \right) \tau - \left(|y| + \frac{|x|}{\sqrt{D\tau}} \right) \right] \right\} \right\} \quad (5)$$

Решение (5) предполагает также, что известно значение коэффициента диффузии D . Значения концентраций по (5) корректируется бародиффузионным потоком воды из ряда капилляров.

Модель диффузии из точечного источника в поток. Согласно предложенному механизму массопереноса (рис.1) помимо решения (5), необходимо предусмотреть действие бародиффузии. При воздействии электромагнитного поля градиент давления внутри открытой тупиковой поры либо капилляра (РБД) и в потоке воздуха (P_a) растет. При условии $РБД > P_a + P_K$ происходит выброс в поток жидкости из капилляра. Учитывается гидравлическое сопротивление капилляра P_K .

Рассмотрим диффузионный поток влаги, выбрасываемой в поток воздуха, который движется в направлении Z с постоянной скоростью w_0 . В этом случае должно быть решено уравнение:

$$w_0 \left(\frac{\partial C}{\partial Z} \right) = D \nabla^2 C \quad (6)$$

при следующих граничных условиях:

$$C|_{l=\infty} = 0; \quad \text{при } l \rightarrow \infty$$

$$4 \pi l^2 D \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right) = M_A, \quad \text{при } l \rightarrow 0 \quad (7)$$

$$l^2 = x^2 + y^2 + z^2,$$

где l – расстояние от капилляра; Z – расстояние по потоку от капилляра; M_A – расход влаги на выходе из капилляра в поток.

В случае, когда скорость потока постоянна (w_0), а режим стабилизировался, решение (6) с граничными условиями (7) будет:

$$C = \frac{M_A}{4 \pi D l} \exp \left[- \left(\frac{w_0}{D} \right) (l - z) \right]. \quad (8)$$

Задача о точечном источнике имеет практическое значение при анализе профиля концентрации в потоке.

Даже при столь серьезных упрощениях задачи, совместное решение (2), (5) и (8) весьма затруднено, поскольку гидродинамическая ситуация в потоке определяется и течением потока воздуха и вихревой диффузией из каналов. В связи с серьезными трудностями, возникшими в результате аналитического моделирования, следует применить экспериментальное моделирование, основной научной базой которого является теория подобия и метод “анализа размерностей”.

Приведение краевой задачи к модели в обобщенных переменных. При постановке задачи предлагается аналогия с центрами парообразования. Суммарный поток (j) определяется коэффициентом массопередачи (K) традиционной схемы и коэффициентом массоотдачи (β_P) бародиффузионного потока:

$$j_1 = j_2 + j_3 = K (C_{\text{П}} - C_{\text{В}}) + \beta_P (P_{\text{К}} - P_{\text{В}}) \quad (9)$$

Этот поток турбулизирует и пограничный слой. Сопrotивление массопереносу бародиффузией (R_{PM} и R_{PH}) может быть на несколько порядков ниже, чем в традиционных схемах массоотдачи. Таким образом, гидродинамическая ситуация в потоке определяется эквивалентным диаметром (d), относительной скоростью движения диффузионной среды (w). Процесс переноса осложнен вихревой диффузией из каналов твердой фазы, импульсным характером поля, которое определяет число и производительность центров точечного массопереноса.

Задачи такого плана решаются методами экспериментального моделирования. Методом “анализа размерностей” определена структура уравнения в безразмерных переменных. Автором предложено новое число энергетического воздействия: $Bu = N (r w d^2 \rho)^{-1}$ для учета влияния действия ИЭМ. Физический смысл числа Bu заключается в том, что устанавливается соотношение между энергией излучения и той энергией, которая необходима для преобразования в пар всей воды, которая находится в продукте. В соотношении (r – теплота фазового перехода, а ρ – плотность воды).

Чем ближе число Bu к 1, тем больше образуется паровой фазы, тем больше градиент давлений, тем интенсивнее выбросы влажного насыщенного пара из глубины капилляров. Растет турбулизация пограничного слоя, но увеличиваются нагрев твердой фазы и расход энергии. Число Bu характеризует микро- и нанокинетику массопереноса бародиффузией [3, 5, 6]. Структура уравнения в безразмерных переменных в общем виде в условиях неподвижного слоя сырья и потока диффузионной среды записывается так:

$$Sh = A (Re)^n (Sc)^m (Bu)^k \quad (10)$$

Для аппаратов, в которых слой дисперсного продукта перемешивается, этот фактор интенсификации учитывается числом Пекле:

$$Sh = A (Re)^n (Sc)^m (Bu)^k (Pe)^p \quad (11)$$

Константы в соотношениях (10) и (11) определяются в результате экспериментального моделирования процессов массопереноса.

Интенсивность бародиффузии определяется давлением, возрастающим в капилляре. Частота выбросов и количество функционирующих капилляров увеличивается пропорционально электрофизическому воздействию. Массовый поток J_3 зависит от разности давлений в капилляре P_K и в потоке воздуха P_B , а также от коэффициента массоотдачи β_P , существенно отличающегося от традиционного коэффициента β :

$$J_3 = \beta_P \cdot (P_K - P_B). \quad (12)$$

Массовый поток J_1 лимитируется диффузионным сопротивлением в твердой фазе. Массовый поток J_2 преодолевает последовательно сопротивления массопереноса в стесненных условиях капилляра и

конвективной диффузии. А массовый поток J_3 , возникающий вследствие бародиффузии, должен преодолеть диффузионное сопротивление на порядок ниже того, которое преодолевает массовый поток J_2 .

Таким образом, главным условием является то, что бародиффузионный поток должен преодолеть диффузионное сопротивление в твердой фазе. Это достигается за счет перехода части жидкости в паровую фазу. Поэтому при решении поставленной задачи следует определить термодинамические параметры пароводяной смеси в канале при начальном давлении РВ и давлении, которое обеспечивает бародиффузию [4, 6, 7]: РБД = РВ + РК.

Гидравлическое сопротивление в отдельном канале РК равно:

$$P_{k_i} = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \left[\frac{\lambda \cdot l_i}{d_i} + \sum \xi \right] + \rho \cdot g \cdot l_i + \frac{\sigma}{d_i}, \quad (13)$$

где d_i – диаметр капилляра; l_i – длина капилляра; w – скорость движения жидкости в капилляре; ρ – плотность жидкости; ξ – местные сопротивления; σ – силы поверхностного натяжения; λ – коэффициент гидравлического трения; g – ускорение свободного падения.

Расчеты РК при разных диаметрах капилляра показывают, что уровень давлений для реализации бародиффузии в капиллярах продукта является достижимым.

Представляется, что механизмы бародиффузии способны существенно интенсифицировать процессы экстрагирования, активации сырья и инактивации микроорганизмов.

Эффективность бародиффузионных технологий при обезвоживании. Представляется возможным механическое удаление влаги с поверхности продукта при ее доставке к поверхности бародиффузионным механизмом, который инициируется действием импульсного электромагнитного поля (ИЭМ). В этой связи необходимо во – первых, снять с воздуха задачи теплоносителя, а оставить только задачу «приемника» влаги. Во – вторых, организовать обезвоживание продукта с минимальным выпариванием из него влаги, т.е. подключить бародиффузионные процессы. В – третьих, использовать механическое удаление влаги с поверхности продукта за счет продувки его воздухом из окружающей среды. В - четвертых, организовать бародиффузию из объема продукта с помощью ИЭМ.

По такой схеме удаление влаги будет происходить методами фильтрационной сушки, а подвод энергии – волновыми технологиями. Такой комбинированный способ имеет ряд существенных преимуществ. Во-первых, в традиционных подходах градиент влагосодержаний направлен в глубину продукта, а температуры – к поверхности. При ИЭМ градиент температуры направлен в середину продукта. Именно этот факт позволяет инициировать бародиффузионный поток влаги к поверхности. Во-вторых, на нагрев сухой части продукта тратится меньшее количество энергии. А это – предпосылки энергетической эффективности ИЭМ способа сушки [3, 7].

Сухая часть продукта для большинства растительного сырья является радиопроницаемой. Механизм ИЭМ сушки состоит в том, что электромагнитное излучение определенной длины волны активно поглощается водой в продукте, поэтому непосредственно от этих лучей не нагревается. Рассмотренный механизм поясняется схемой (рис.2).

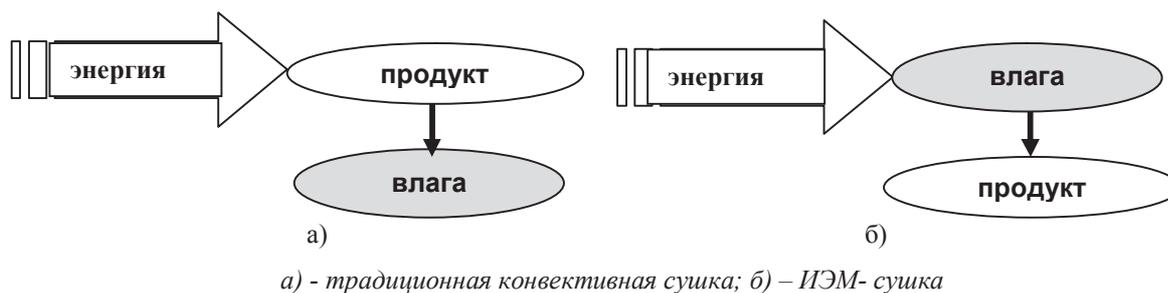


Рис. 2 – Схемы подвода энергии

Естественно, вода, нагреваясь, отдает некоторую часть тепловой энергии сухой части продукта, но это значительно меньше, чем при конвективной сушке.

тратится меньшее количество энергии. А это – предпосылки энергетической эффективности ИЭМ способа сушки [3, 4, 7].

Исходя из этих положений поставлен следующий эксперимент [6], в котором продувка проводилась импульсно и чередовалась с действием ИЭМ. Комбинированное электрофизическое воздействие в процессе обезвоживания позволяет интенсифицировать процесс массопереноса в несколько раз. Реализует

интенсивные и мягкие режимы сушки [3, 7]. Экспериментальные исследования комбинированных режимов обезвоживания проводились по следующей методике. Кассета из радиопрозрачного материала помещалась в резонаторную камеру, где осуществлялось воздействие на продукт микроволновым полем. Фиксировалось время обработки, режим ИЭМ, температуры и вес продукта до и после обработки. Затем кассета подключалась к компрессору и проводилась продувка продукта воздухом. Измерялись температуры и вес кассеты с продуктом до и после продувки. В опытах изменялись время ИЭМ воздействия и продувки. Результаты обработки опытов приведены на рис. 3.

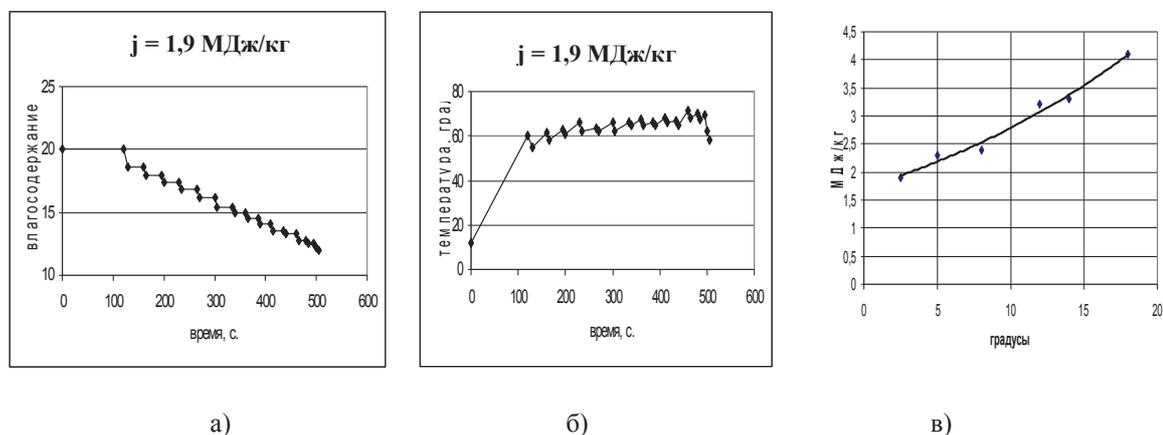


Рис. 3 – Линия сушки (а), термограмма (б) процесса и влияние величины охлаждения продукта на удельные затраты энергии (в).

Уровень энергетических затрат (рис.3) показывает, что удаление влаги проходит в виде пара и в виде тумана. Анализ результатов опытов показал, что удельные затраты энергии связаны с диапазоном изменения температур, особенно в режиме продувки (фильтрационной сушки) продукта. И, действительно, такая корреляция обнаружена, что позволяет сделать вывод, что достигнутый в опытах уровень энергетических затрат (3) ниже удельной теплоты фазового перехода для воды. Так подтверждена выдвинутая гипотеза о возможности в условиях ИЭМ обезвоживания без обязательного полного парообразования.

Результаты опытов (рис.3) свидетельствуют, что с уменьшением времени воздействия как при подводе энергии, так и при продувке сокращается время процесса обезвоживания и, что наиболее интересно, удельные затраты энергии. Представляется, что минимизация энергопотребления связана с реализацией следующих принципов:

- за счет объемного подвода энергии доставить влагу на поверхность продукта практически без изменения общего влагосодержания, при минимальном нагреве продукта;
- в режиме фильтрационного обезвоживания провести механический отвод влаги с поверхности при минимальном снижении температуры поверхности продукта.

Из анализа рис. 3 можно сделать два вывода:

- существует четкая зависимость между величиной изменения температуры при продувке продукта и значением удельных затрат энергии на удаление влаги из продукта (рис.3,в);
- достигнутый в опытах уровень энергетических затрат ниже удельной теплоты фазового перехода для воды.

Второй вывод убедительно подтверждает выдвинутую гипотезу о возможности в условиях ИЭМ обезвоживания без обязательного полного парообразования.

Эффективность бародиффузионных технологий при экстрагировании. Исследовались перспективность БДТ для производств растворимого кофе и коньяков. Современные технологии экстрагирования из зерен кофе характеризуются противоречиями. С одной стороны, стоит задача максимального извлечения ценных компонентов из зерен. Эффективным приемом решения такой задачи является повышение температуры процесса, т.е. повышение давления в аппарате и ступенчатым экстрагированием. Проблема разделения экстракта и шлама решается простым гравитационным стеканием раствора и механическим удалением шлама. С другой стороны, приемы разделения шлама и экстракта, уровни давлений в аппарате затрудняют применение проточных схем и применение в конструкции мешалки. В результате – современная технология экстрагирования из зерен кофе характеризуется громоздкостью, трудоемкостью, энергоемкостью [4, 6].

Резервы у традиционных подходов при экстрагировании из зерен кофе практически исчерпаны. Следует искать новые, энергоэффективные методы, которые могли бы сохранить, либо превысить существующую степень извлечения ценных компонентов из зерен, но на реализацию этого переноса затрачивалось бы меньшее количество энергии. Использование комбинированных процессов при экстрагировании открывает новые возможности для создания экономичного экстрактора, максимально соответствующего требованиям ресурсосбережения.

Классическая технология производства коньячных напитков по организации процессов экстрагирования недостаточно совершенна и неэкономична. Многолетняя выдержка коньячных спиртов в дубовых бочках сопровождается потерями спирта в результате испарения через поры древесины. Общие потери спирта при производстве ординарных коньяков составляют 12...20%, а марочных- 24...50%. Вторая ключевая проблема- чрезвычайно низкая оборачиваемость производственных площадей. Все это объясняет постоянные поиски специалистами путей и методов совершенствования технологий, ускорению процессов созревания коньячных спиртов [4, 8].

Применение БДТ в процессах производства экстрактов из древесины, ускорения созревания, прогнозирования качества спиртов и активации древесины позволило повысить эффективность технологий производства крепких напитков. Результаты химических анализов и дегустационных исследований показали, что наряду с существенной интенсификацией массопереносных процессов с помощью МВП можно влиять и на структурные изменения продукта, активизировать протекание окислительно-восстановительных реакций.

В ОНАПТ образец такого экстрактора на основе БДТ создан. Комбинированное электрофизическое воздействие в процессе экстрагирования позволяет интенсифицировать процесс массопереноса в несколько раз. Реализует интенсивные и мягкие режимы экстрагирования [6, 8]. Степень извлечения компонентов из зерен повышается на 15%. Обеспечивается атмосферное давление в аппарате, температура процесса не выше 100⁰С. Энергетические затраты снижаются на 50%.

В результате комплексных экспериментальных исследований, которые включали определение условий фазовых равновесий, кинетики экстрагирования установлены константы в критериальном уравнении [8]:

$$\text{при } Re < 2300 \quad Sh = 36,58 (Re)^{0,33} (Sc)^{0,33} (Bu)^{1,54} \quad (14)$$

$$\text{при } Re > 2300 \quad Sh = 0,87 (Re)^{0,8} (Sc)^{0,33} (Bu)^{1,96} \quad (15)$$

Эти соотношения стали ключевыми в программе расчета экстракторов с электромагнитным интенсификатором процесса [8].

Тепломеханические модели клеточной структуры. Отходы многих пищевых производств, перерабатывающих сырье растительного происхождения, являются структурированными и их необходимо активировать — разрушить структуру клеток с целью извлечения и дальнейшей переработки ценных компонентов. Основными процессами технологии их утилизации являются: деструкция, экстракция и сушка. Рассмотрим реакцию оболочки клетки при последовательном подводе к ней энергии, выдержке и резкого сброса давления на третьем этапе. В основе анализа непрерывно – гетерогенная модель системы [5].

На первом этапе изменение объема клетки V_k , температуры T_k , давления P_k и концентрации в ней растворимых компонентов C_k , представляются следующим образом.

$$\tau_0 < \tau < \tau_{п}; \quad P_0 < P_a \leq P_{п}; \quad T_0 < T_a \leq T_{п} \quad (4)$$

$$\frac{dV_k}{d\tau} = \beta \cdot \varepsilon \cdot F \frac{\rho_v}{\rho_k} [C_v(\tau) - \tau_k(\tau)] + F_k \cdot \varepsilon \frac{P_a(\tau) - P_k(\tau)}{\delta} + \frac{1 - \varepsilon}{r \cdot \rho^u} \cdot \int q_u \cdot dF \quad (5)$$

В соотношении (5) первое слагаемое учитывает эффект массопереноса, второе – изменение объема за счет инфильтрации, а третье – изменение объема за счет теплопередачи. Тепловой поток, передаваемый клетке, расходуется на нагрев "сухой" части, нагрев и частичное испарение жидкости:

$$Q_k = \int \int_{V_0}^{\tau} c_{Pc} \{ [1 - C_k(\tau)] V_k(\tau) \} \rho_c dV d\tau + \int \int_{V_0}^{\tau} c_{PB} \cdot C_k(\tau) \cdot V_k(\tau) dV d\tau + \int \int_{V_0}^{\tau} q_v dV d\tau \quad (6)$$

На втором этапе выдержка необходима для осуществления массопереносных процессов. На третьем этапе происходит резкий сброс давления, что приводит к интенсивному выходу содержимого через поры клеточной оболочки, следствием чего является интенсификация процесса последующего экстрагирования. Степень разрыва клеточных оболочек во всей реакционной массе определяет степень активации. При определенных условиях возможно увеличение диаметра пор в клеточных стенках, а также частичный либо полный разрыв оболочки. В этом случае задачу можно представить в виде известной модели напряженного состояния сферической оболочки со сквозными отверстиями [5].

Обобщенная модель процесса низкотемпературной пастеризации в микроволновом поле.

Если принимать во внимание только один фактор, определяющий летальность микроорганизмов – температурный, то поставленная задача становится сугубо тепловой. Однако, рассчитать температуру отдельного микроорганизма во времени в условиях движения потока задача пока не решаемая. Общепринятым способом получения структуры уравнения в обобщенных переменных для расчета сопряженных задач гидравлики и теплопереноса является метод анализа размерностей. Применение этих методов в исследовании задач пастеризации не известно [9].

В общем случае, влияние на летальность микроорганизма имеют диаметр канала d , плотность ρ и вязкость потока μ скорость его движения w . Группа этих параметров характеризует инерционные свойства потока, гидродинамическую ситуацию в потоке, формирование пограничного слоя. Величина энергетических затрат представляется пропорциональной энергии излучения и той энергии, которая необходима для парообразования. Т.е. величинам удельной теплоты парообразования r и мощности поля N_0 . Безразмерным комплексом, который бы характеризовал кинетику выживаемости микроорганизмов, принимается отношение их удельных количеств в процессе пастеризации (В):

$$B = A (Re)^n (Pr)^k (Fo)^m (Bu)^g \quad (8)$$

При обработке только той базы данных, что соответствует условиям полной пастеризации, получена модель расчета температуры инактивации (T_L) в зависимости от чисел Фурье (Fo) и Прандтля (Pr):

$$\theta \equiv (T_L/T_B) = 0,29 Fo^{-0,15} Pr^{0,43} \quad (9)$$

Предложенный подход позволит обобщить многочисленные экспериментальные данные и построить методики расчета низкотемпературных пастеризаторов пищевых продуктов [9].

Достигнутый прикладной результат. На сегодняшнее время имеются факты, объяснять которые можно только с позиций нанонаук [10, 11]. К таким фактам, полученным на кафедре процессов и аппаратов ОНАПТ, относятся: изменения и трансформации структуры вкусовых и ароматических комплексов продукта, стерилизация микроорганизмов при пониженных температурах и т.п. Причина этих фактов общая – действие электромагнитного поля. Информация о результатах исследований и перспективы их развития приведены в табл.1

Таблица 1 – Направления нанотехнологических проектов в АПК.

проект	параметр	Традиционный подход	Результат БДТ	
			Достигнутый	Ожидаемый
Низкотемпературный наностерилизатор	Энергоемкость, МДж/кг продукта	0,2	0,02	$2 \cdot 10^{-5}$
	Температура, °С	80...100	30	10...20
	КПД, %	0,004	0,04	20...40
экстрактор	Степень интенсификации массопереноса, раз	1	100	10000
зерносушилка	Энергоемкость, МДж/кг влаги	4...6	1,9	0,1...0,2

Практическое подтверждение гипотез и выводы. Бародиффузионные технологии являются мощным механизмом интенсификации массопереноса в системе "твердое тело – жидкость" (табл.2).

Результаты предварительных экспериментальных исследований позволяют сформулировать требования к установке для обезвоживания растительного сырья при комбинированном импульсном воздействии микроволновым полем и фильтрацией слоя:

Таблица 2 – Степень интенсификации массопереноса.

Обработка поверхности	Ультразвук	Электрическое поле	Закрутка потока	Вращение реактора	Вибрация	Инициирование бародиффузии
До 2 раз	В 2...3 раза	В 3...4 раза	В 6...8 раз	В 25...30 раз	В 30...35 раз	На 2...3 порядка

- количество (расход) продукта необходимо согласовывать с мощностью микроволнового поля;
- время воздействия ИЭМ должно быть разным для периода прогрева продукта до температуры обезвоживания и для периода непосредственного удаления влаги, в период обезвоживания время воздействия ИЭМ ограничивается допустимым уровнем нагрева продукта;

- расход и величина давления воздуха, которым проводится фильтрация слоя, должны согласовываться с величиной гидравлического сопротивления продуваемого слоя, время фильтрации ограничивается допустимым уровнем охлаждения продукта во время продувки.

Установка должна реализовывать следующий принцип: минимальное снижение влаги в продукте в период ИЭМ воздействия и минимальное снижении температуры в период фильтрования.

В условиях коньячного производства прошли испытания экстрактора с электромагнитным интенсификатором. В различных режимах эксплуатации интенсивность массопереноса возрастала в десятки и тысячи раз. Результаты испытаний подтвердили предложенный механизм комбинированного процесса экстрагирования и перспективность технологии. Дегустаторы отметили положительные структурные изменения в продукте, в первую очередь ароматических компонентов.

На основе проведенных исследований сформулированы требования к низкотемпературному пастеризатору. В аппарате должны согласовываться гидродинамическая ситуация и характеристики микроволнового поля. Конструкция должна организовать движение продукта в виде микропенки и способствовать эффективному перемешиванию потока.

Возможны и другие принципиальные решения при реализации БДГ в условиях микроволнового либо высокочастотного электромагнитного поля.

Литература

1. Ефремов Г.И. Макрокинетика процессов переноса. – М.: МГТУ, 2001.-289 с.
2. Гришин М.А., Атаназевич В.И., Семенов Ю.Г. Установки для сушки пищевых продуктов: справочник // Агропромиздат- М., 1989.
3. Бурдо О.Г.Эволюция сушильных усановок – Одесса: Полиграф, 2010 – 368 с.
4. Бурдо О.Г.Энергетический мониторинг пищевых производств – Одесса: Полиграф, 2008 – 244 с.
5. Бурдо О.Г. Наномасштабные эффекты в пищевых технологиях // Инженерно-физический журнал. Минск, т.78, № 1.-2005. - С. 88-93.
6. Бурдо О.Г., Ряшко Г.М. Экстрагирование в системе «кофе- вода».- Одесса, 2007.- 176 с.
7. Бурдо О.Г., Зиков А.В., Воскресенська О.В. Энергоекономні схеми екологічно безпечних зерносушарок // Зерно і хліб,2005, № 4-с. 18-19.
8. Терзієв В.Г., Бурдо О.Г.Моделювання комбінованих процесів при екстрагуванні в системі “спирт-деревина” Удосконалення існуючих та розробка нових технологій для харчової та зернопереробної промисловості.-Наук. праці Од. держ. акад. харчових техноло– гій.-Одеса:1999.-Вип.20.
9. Бурдо О.Г., Семков С.В. Совершенствование режимов микробиологической стабилизации вина //Наук. праці Од. націон. акад. харчових технологій. – Одеса: 2008. – Вип.32. – С.192 – 196.
10. Бурдо О.Г. Нанотехнологии. Флагманские, перспективные и фундаментальные проекты в АПК //Наук. праці Од. націон. акад. харчових технологій. – Одеса: 2006. – Вип.28, Т2. – с. 242-251.
11. Бурдо О.Г. Мікро – і нано-технології – новий напрямок в АПК/ Наукові праці. ОНАХТ.-2006. Вип. 29.- С. 3-9.

УДК 66.047

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ НОВЫХ БЕЗОТХОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЯГОДНОГО СЫРЬЯ

Чайка А.И., к.т.н., с.н.с., ученый секретарь; Малецкая К.Д., д.т.н., вед.н.с.;
Матюшкин М.В., к.т.н., с.н.с.; Сильягина Н.Б., м.н.с.

Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины, г.Киев

Представлены основные стадии обработки ягодного сырья методом дискретно-импульсного ввода энергии. 1-ая стадия – эффективная гидродинамическая обработка, которая предопределяет методы и технологии получения продукта в различных формах.

The basic stages of treatment of baccate raw material by the method of discrete-impulsive input of energy are presented. First stage – effective hydrodynamic treatment which predetermines methods and technologies of receipt of product in different forms.

Ключевые слова: дискретно-импульсный ввод энергии, диспергация, гомогенизация, ягодное сырьё, энергоресурсосбережение.