

ИНИЦИИРОВАНИЕ МЕХАНОДИФФУЗИОННОГО ЭФФЕКТА ПРИ ЭКСТРАГИРОВАНИИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Бурдо О.Г., д-р техн. наук, профессор
Одесская национальная академия пищевых технологий

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов экстрагирования из растительного сырья в условиях микроволнового поля. Показано, что уникальные результаты, специфика полученного продукта никак не объясняются с позиций классической теории массопереноса при экстрагировании. Обнаруженное явление названо «механодиффузионный эффект при безградиентном волновом подводе энергии к полярным молекулам электромагнитным полем». С позиций нанотехнологий дано объяснение полученных результатов. Приведены примеры использования рассмотренного эффекта в пищевых технологиях.

The results of experimental researches of the vegetable raw material extraction processes in microwave field conditions are presented. It is shown that unique results and the obtained product specificity can not be explained by the classical extraction mass carry theory positions. Discovered phenomenon is called "mechanodiffusion effect of gradientless wave energy supply to polar molecules by electromagnetic field". The explanation of obtained results are given from nanotechnologies positions. The examples of using the considered effect in food technologies are presented.

Ключевые слова: пищевые нанотехнологии, массоперенос, механодиффузионный эффект, электромагнитное поле.

Введение. Процессы экстрагирования в современных пищевых технологиях производства сахара, масел, растворимого кофе, коньячных спиртов являются ключевыми, определяющими как качество, так и экономические показатели предприятия. Однако, как правило, это достаточно трудоемкие и низкоэффективные процессы. Проведенные в ОНАПТ исследования [1...5] показали, что использование принципов нанотехнологий (НТ) позволит существенно интенсифицировать процесс экстрагирования за счет эффекта комбинированного электрофизического воздействия импульсным электромагнитным полем (ИЭМП). При этом классические представления процессов экстрагирования [6...9] не объясняют результаты, полученные при экспериментальном моделировании.

Проблема. Процессы экстрагирования в пищевых технологиях продолжительны, энергоемки. Технологии производства коньячных спиртов требуют многолетней выдержки [1, 2], при экстрагировании из зерен кофе используются высокие давления в аппарате [1, 3, 4]. Технологии извлечения масла из растительного сырья, в частности из зерен амаранта, не отвечают современным требованиям по безопасности продуктов [5]. При экстрагировании хладонами при сверхкритических давлениях требуется громоздкое оборудование, гексановые технологии взрывоопасны и не обеспечивают растущих требований экологической безопасности масла.

Цель. Разработать методы получения экологически безопасных экстрактов с высоким содержанием ценных компонентов (сквалена, токоферолов, вкусовых и ароматических комплексов и пр.) при снижении уровня энергетического воздействия, энергоемкости, упрощении конструкции аппаратов и уменьшении продолжительности процесса экстрагирования.

Анализ. Очевидны научно технические противоречия между растущими требованиями к качеству продукта, энергоемкости его производства и техникой экстрагирования. Выдвигается гипотеза, что решение этих противоречий лежит в плоскости поиска новых принципов организации массообменных процессов, использовании уникальных возможностей комбинированных влияний на процессы переноса, формировании сложных комбинаций движущих сил направленных на эффективное извлечение целевых компонентов из сырья. Представляется, что целесообразно искать возможности управления процессами переноса на уровне наномасштабных элементов пищевого сырья с помощью полного использования поверхностных явлений. Такие задачи отвечает определению нанотехнологий (НТ) [10, 11].

Парадигма и научные основы разрабатываемых в ОНАПТ пищевых НТ включают: гипотезу бародиффузионного переноса из наномасштабных элементов сырья [2], термодинамическую схему нанопроцесса и тепломеханическую модель растительной клетки [2, 3], кинетическую модель массопереноса [3, 4]. Проведена классификация процессов пищевых НТ [5], обоснованы перспективные пути развития пищевых нанотехнологий [12].

В разработках ОНАПТ эффективно используются возможности и преимущества электромагнитного подвода энергии [3, 4]. Для количественной оценке эффективности таких процессов автором предложено [2] число энергетического воздействия: $Bu = N(\tau w d^2 \rho)^{-1}$. С помощью этого числа проводится учет влияния действия ИЭМП. 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 (τ – теплота фазового перехода, ρ – плотность воды). Число Bu характеризует микро- и нанокинетику массопереноса бародиффузией [2, 3].

На сегодняшнее время имеются факты, объяснять которые можно только с позиций нанонаук (изменения и трансформации структуры вкусовых и ароматических комплексов продукта, стерилизация микроорганизмов при пониженных температурах и т.п.). Причина этих фактов общая – действие электромагнитного поля [2-5, 12-15]. Ряд выявленных несоответствий с принятыми положениями приведен в табл.1. Вывод из табл.1 можно сделать о том, что в раствор переходит большее количество компонентов, чем может быть растворено экстрагентом.

Представляется, что объясняются эти факты тем, что в условиях электромагнитного поля можно организовать специфичный поток, который содержит хорошо растворимые компоненты твердой фазы (диффузионный поток), и практически не растворимые компоненты твердой фазы, связи которой с ней слабые. Это могут быть силы ван-дер-ваальсовы, слабые химические, механические и пр.

Таблица 1 – Сопоставление экспериментальных фактов при экстрагировании с литературными данными

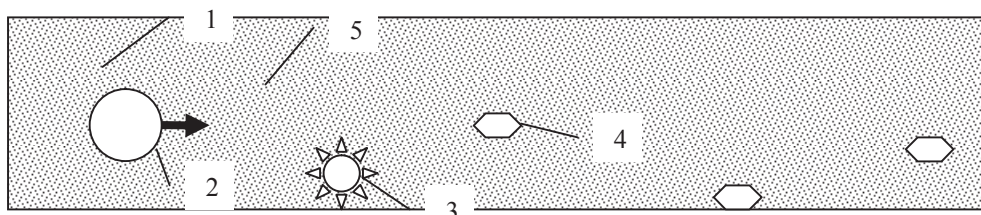
| № | Система | Сведения о параметрах процесса | Факты в условиях электромагнитного поля. |
|---|--|--|---|
| 1 | «Древесина – водно - спиртовые растворы» | В раствор переходит до 46% древесины | В раствор перешло более 80% древесины |
| 2 | «Древесина – водно - спиртовые растворы» | | Повышенное содержание ароматических компонентов |
| 4 | «зерна кофе – вода» | В раствор переходит до 30% содержимого зерен | В раствор перешло более 40% содержимого зерен |
| 5 | «зерна кофе – вода» | | Повышенное содержание ароматических компонентов |
| 6 | «зерна амаранта - спирт» | Спирт практически не растворяет сквален | В полученном масле амаранта до 4% сквалена |

Этот поток характеризуется механическими параметрами движущей силы, разностью давлений в капилляре и среды. Последняя может возникать в результате избирательного поглощения энергии электромагнитного источника полярными молекулами, перехода в паровую фазу наиболее летучего компонента, повышения давления в глубине капилляра. В результате появляется мощная движущая сила, гидравлический потенциал для потока из капилляра. Это сугубо механический поток, мощность которого определяется как самой разностью давлений, так и динамикой изменения давлений. Такой поток можно инициировать, им можно управлять параметрами электромагнитного поля.

Механизм процесса переноса из межклеточной структуры. Представляется, что в общем, мы имеем дело с новым явлением, новым эффектом, название которому можно дать «механодиффузионный эффект при безградиентном волновом подводе энергии к полярным молекулам электромагнитным полем». В результате генерации паровых пузырьков (2) в глубине микрокапилляра (1) повышается давление, возникает гидравлический поток, который увлекает с собой экстракт из пограничного слоя (5), нерастворимые (3) и слабо растворимые (4) компоненты (рис.1).

Таким образом, из капилляра (1) выходит диффузионный поток экстракта, который дополняется потоком целого комплекса компонентов не характерных вообще для диффузионных процессов, либо для экстрагирования конкретным экстрагентом.

Структура потока из капилляра (1) поясняется эквивалентной электрической схемой (рис.2), где $Y(\tau)$ и Y_T – соответственно, текущее в твердой фазе и граничное значения концентрации растворимых компонентов; X_Σ – суммарное значение всех перенесенных в экстракт компонентов; C_C и C_H – соответственно, концентрации в твердой фазе слабо растворимых и нерастворимых в экстрагенте компонентов; X_C и X_H – то же, но в экстракте.



1 – стенка капилляра, 2 – паровой пузырь, 3 – нерастворимые в жидкости компоненты, 4 – слаборастворимые компоненты, 5 – диффузионный пограничный слой

Рис. 1 – Физическая схема взаимодействия компонентов и потока

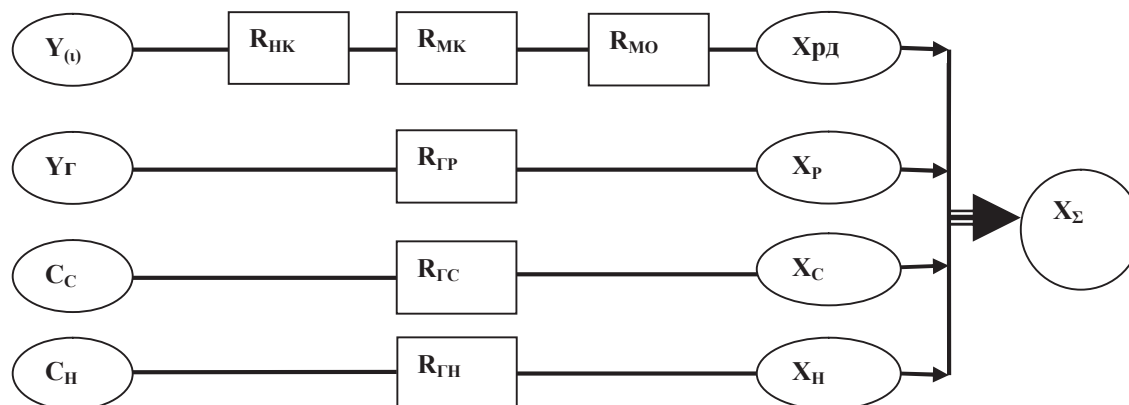


Рис. 2 – Эквивалентная электродиффузионная схема сопряженных процессов переноса гидро-диффузионными потоками в системе «твёрдая фаза – жидкость – электромагнитное поле»

Исходя из классической теплофизической схемы массопереноса [2, 3, 4] и структуры межклеточной структуры механизм диффузионного переноса из волокнистой структуры в поток соответствует только части схемы (рис.1, 2). Последовательная цепочка диффузионных сопротивлений состоит из суммы: $\Sigma R = R_{НК} + R_{МК} + R_{МО}$.

Процесс конвективной массоотдачи от поверхности продукта в поток имеет наименьшее диффузионное сопротивление ($R_{МО}$). Жидкость перемещается в микрокапиллярах 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 инициируется поток жидкости из капилляров (j_2). Ранее [3, 4] этот процесс представлялся как бародиффузия. Однако это не классическая бародиффузия определенная А.В. Лыковым [6, 7]. Процесс возникает из-за растущего в капиллярах давления P_K (рис.1). Отдельные капилляры, где достигнуты условия для генерации паровой фазы, начинают периодически выбрасывать в поток жидкость из капилляров. Жидкость из нанокapилляров выбрасывается в микрокапилляры и далее в среду преодолевая сопротивление ($R_{ГР}$). По сути, это гидравлическое сопротивление. Частота таких выбросов и число функционирующих капилляров растет с ростом N - мощности излучения.

Параллельно с потоками (j_1) и (j_2) происходит перемещение слаборастворимых (поток j_3) и нерастворимых (поток j_4) компонентов.

Механизмы процессов переноса и соответствующие модели сведены в табл.2.

Суммарный поток всех компонентов в интегральной форме определится:

$$\Sigma M_I = (M_{P1} + M_{P2} + M_C + M_H) F^{-1} = \frac{Y - X_{рд}}{R_D} + \rho \left[\frac{P_K - P_0}{R_{ГР}} + \frac{P_K - P_0}{R_{ГС}} + \frac{P_K - P_0}{R_{ГН}} \right] \quad (1)$$

Согласование текущей концентрации растворимых веществ в твердой фазе (Y) и в экстракте ($X_{рд}$) проводится по углу наклона рабочей линии процесса (в технологии связан с гидромодулем).

Таблиця 2 – Механізми переноса компонентів із капілярної міжклітинної структури

| Характеристика потоку | Движущая сила | Сопротивление потока | Масса перемещенного компонента | Модель процесса |
|---|------------------------------------|--|--------------------------------|--|
| Конвективный диффузионный массоперенос | Разность концентраций $Y - X_{PD}$ | Диффузионное сопротивление, R_D | M_{P1} (поток j1) | $\frac{dM_{P1}}{Fd\tau} = \frac{Y - X_{PD}}{R_D}$ |
| Механический перенос растворимых веществ из пограничного слоя | Разность давлений $P_K - P_0$ | Гидравлическое сопротивление, R_{GP} | M_{P2} (поток j1) | $\frac{dM_{P2}}{\rho S d \tau} = \frac{P_K - P_0}{R_{GP}}$ |
| Механический перенос слаборастворимых веществ из капилляров | Разность давлений $P_K - P_0$ | Сопротивление, R_{GC} | M_C (поток j3) | $\frac{dM_C}{\rho S d \tau} = \frac{P_K - P_0}{R_{GC}}$ |
| Механический перенос нерастворимых веществ из капилляров | Разность давлений $P_K - P_0$ | Сопротивление, R_{GH} | M_H (поток j4) | $\frac{dM_H}{\rho S d \tau} = \frac{P_K - P_0}{R_{GH}}$ |

Соответствующие сопротивления процессам переноса определяются в зависимости от характера движущих сил. Так, для диффузионных процессов следует учитывать интенсивность массопереноса в условиях стесненной конвективной диффузии внутри капилляра (коэффициент массоотдачи β_1) и коэффициент внешней конвективной диффузии (β_2):

$$R_D = \frac{1}{\beta_1} + \frac{A}{\beta_2} \quad (2)$$

Интенсивность переноса остальных компонентов определяется балансом соответствующих сил, которые формируются в капилляре межклеточного пространства (рис.3).

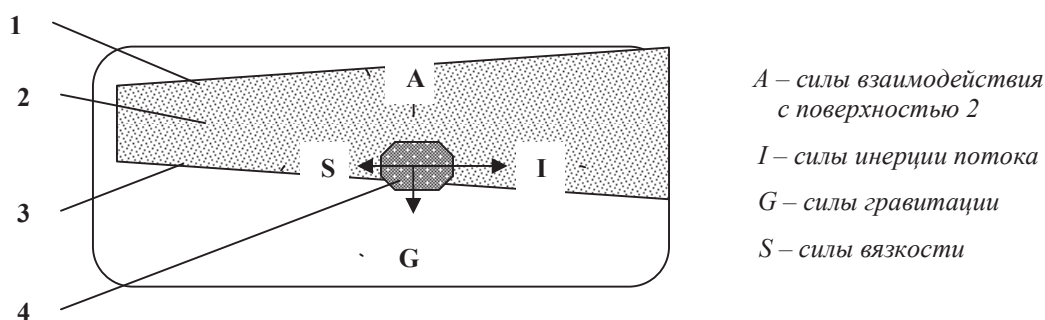


Рис. 3 – Баланс сил, действующих на компонент (4) в межклеточном пространстве (3) продукта (1).

Результирующая этих сил определит скорость потока конкретного компонента. При действии сил поверхностного натяжения, что характерно для микрокапилляров, связь разности давлений в капилляре (ΔP) и скорости потока (w) имеет вид:

$$\Delta P = \frac{\rho w^2}{2} \left[\frac{\lambda l}{d} + \sum \xi \right] + \rho gl + \frac{\sigma}{d} \quad (3)$$

В соотношении (3)

l - длина капилляра; d - диаметр; σ - коэффициент поверхностного натяжения;

λ - коэффициент трения; ξ - коэффициент местного сопротивления; ρ - плотность потока.

Нестационарное одномерное поле концентраций растворимых веществ определяется уравнением конвективной диффузии Фика:

$$\frac{dX}{d\tau} = D \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{\partial X}{\partial x} w \quad (4)$$

Координата x совпадает с осью капилляра. При определенных условиях второе слагаемое в соотношении (4) может практически определять интенсивность переноса растворимого компонента.

Для нерастворимых компонентов чисто диффузионный поток отсутствует:

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{\partial C}{\partial x} w \quad (5)$$

Для расчета значения скорости потока в уравнениях (3 - 5) необходимо учесть конкретные силы, действующие на компонент в капилляре.

Механизм процесса переноса из клетки. Пищевое сырье растительного происхождения и отходы многих пищевых производств являются структурированными и их необходимо активировать - разрушить структуру клеток с целью извлечения и дальнейшей переработки ценных компонентов. Основными процессами в пищевых технологиях являются: деструкция, экстракция и сушка. Рассмотрим реакцию оболочки клетки при последовательном энергетическом и механическом воздействии. В основе анализа непрерывно – гетерогенная модель системы [2].

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.

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

$$\frac{dV_k}{d\tau} = K \cdot \varepsilon \cdot F_k \frac{\rho_{\tau}}{\rho_k} [C_{\tau}(\tau) - C_k(\tau)] + F_k \cdot \varepsilon w + \frac{1 - \varepsilon}{r \cdot \rho_n} \cdot \int q_u \cdot dF \quad (6)$$

В соотношении (6) первое слагаемое учитывает эффект массопереноса, второе – изменение объема за счет инфильтрации, а третье – изменение объема за счет теплопередачи при частичном парообразовании. В (6) приняты обозначения: K – коэффициент массопереноса; F_k – площадь поверхности оболочки клетки; ε – доля каналов в оболочке; ρ_{τ} , ρ_k , ρ_n – плотность, соответственно, жидкости в межклеточном объеме, в клетке и пара, образовавшегося в клетке; q – плотность теплового потока; w – скорость истечения; C – доля сухих веществ.

Тепловой поток, передаваемый клетке, расходуется на нагрев "сухой" части, нагрев и частичное испарение жидкости:

$$Q_k = \int_V \int_0^{\tau} c_{Pc} \{ [1 - C_k(\tau)] V_k(\tau) \} \rho_c dV d\tau + \int_V \int_0^{\tau} c_{PB} \cdot C_k(\tau) \cdot V_k(\tau) dV d\tau + \int_V \int_0^{\tau} q_V dV d\tau \quad (7)$$

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 [3].

Комбинированные процессы переноса из растительного сырья при экстрагировании. Выполненный выше анализ позволяет поставить задачу исследования комбинированных процессов переноса компонентов из всех элементов растительного сырья. Выделены возможные механизмы процессов переноса, рассмотрены режимы и стадии процессов в системе «объем клетки – оболочка – межклеточное пространство – среда». Результаты анализа сведены в табл.3.

Научные гипотезы подтверждены на практике. В условиях коньячного производства прошли испытания экстрактора с электромагнитным интенсификатором. В различных режимах эксплуатации интенсивность массопереноса возрастала в десятки и тысячи раз. Дегустаторы отметили положительные структурные изменения в продукте, в первую очередь ароматических компонентов. Появляется возможность на наномасштабном уровне строить букет коньячного спирта. В технологии кофе степень извлечения компонентов из зерен повышается на 15%. Обеспечивается атмосферное давление в аппарате, температура процесса не выше 1000С. Энергетические затраты снижаются на 50%. Опытные образцы растворимого жидкого 60% концентрата кофе «ЖИКО» имеют высокие вкусовые характеристики [1].

Использование нанотехнологических подходов позволило получить чистую воду с содержанием солей менее 4мг/кг [16, 17], экологически чистый концентрат жидкого дыма и масла [13]. Рассмотренные механизмы способны существенно интенсифицировать процессы активации сырья, активации и инактивации микроорганизмов [13, 14].

Таблиця 3 – Механізми і стадії процесів переносу компонентів із рослинного сир'я при безградієнтному підводі електромагнітної енергії

| Елементи сир'я | Режим і механізм процесу | Стадії процесів |
|---------------------------|---|--|
| Межклеточное пространство | Массоперенос при экстрагировании за счет диффузионных механизмов | 1) Поступление экстрагента в каналы; 2) Диффузия растворимых веществ в стесненных условиях капилляра; 3) Конвективная диффузия от границы раздела в среду |
| Межклеточное пространство | Массоперенос растворимых и нерастворимых компонентов из каналов в среду за счет инерционных сил | 1) Формирование центра парообразования; 2) Рост давления в канале; 3) Выброс компонентов из каналов в среду |
| Объем клетки | Комбинированное энергетическое, фильтрационное и диффузионное воздействие на содержимое клетки, механическое воздействие на мембрану клетки | 1) Формирование центра парообразования; 2) Рост давления в клетке, увеличение ее объема; 3) Переход компонентов из объема клетки в межклеточное пространство |
| Оболочка клетки | Деформация оболочки клетки за счет сил внутреннего давления | 1) Повышение степени напряженного состояния мембраны клетки; 2) Увеличение диаметров проницаемых каналов мембраны; 3) Разрыв мембраны |

Выводы. При экстрагировании в условиях электромагнитного поля возможно возникновение специфического потока из межклеточного пространства нерастворимых экстрагентом компонентов. Такой эффект обнаружен впервые и ему дано название «механодиффузионный эффект при безградієнтном волновом підводі енергії к полярним молекулам електромагнітним полем». Для иницирования механодиффузионного эффекта при экстрагировании требуется четкое согласование структурных характеристик сырья, особенностей экстрагента и параметров электромагнитного поля. Результатом организации таких процессов может быть: повышение выхода целевых компонентов, переход в раствор ценных компонентов, которые не извлекались традиционными методами (ароматических комплексов, компонентов вкуса и пр.). Открываются новые возможности для создания технологий кофе, коньяков, растительных масел, экстрактов с повышенным содержанием целевых компонентов и при ощутимом снижении энергетических затрат.

Литература

1. Бурдо О.Г. Пищевые наноэнерготехнологии – Херсон, 2013 – 294с.
2. Бурдо О.Г. Наномасштабные эффекты в пищевых технологиях // Инженерно-физический журнал. Минск, т.78, № 1.-2005. - С.88-93.
3. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок – Одесса: Полиграф, 2010 – 368с.
4. Бурдо О.Г., Ряшко Г.М. Экстрагирование в системе «кофе- вода».- Одесса, 2007.- 176с.
5. Бурдо О. Г. Мікро – і нанотехнології – новий напрямок в АПК. Наукові праці. – Випуск 29. - Одеса: Одеська національна академія харчових технологій -2006.-С.3-9.
6. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
7. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия, 1980. 248 с.
8. Акулич П.В.Термогидродинамические процессы в технике сушки /Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАНБ, 2002.-268с.
9. Ефремов Г.И. Макрокинетика процессов переноса.М.:2001.-289 с.
10. Рынок нано: от нанотехнологий к нанопродуктам /Г.Л.Азоев [и др.]; под.ред. Г.Л.Азоева.- М.: БИНОМ, 2011. - 319с.
11. Головин Ю.И. Наномир без формул – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.- 543с.
12. 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.
13. Бурдо О. Г., Рибіна О.Б., Сталімбовская А.С. Энергетическая эффективность пищевых нанотехнологий. /Інтегровані технології та енергозбереження – Харьков: НТУ „ХПІ” 2006.–№2.

14. Бурдо О.Г., Рыбина О.Б. Процессы инактивации микроорганизмов в микроволновом поле – Одесса: Полиграф, 2010 – 200с.
15. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Борщ А.А. Электромагнитные технологии обезвоживания сырья /Problemele energeticii regionale, Chisinau, №1 (18), 2012.- pp.69- 79.
16. Burdo O.G., Kovalenko E.A., Kharenko D.A. Intensification of processes of low-temperature separation of food solutions /Applied Thermal Engineering, № 28 2008. - pp. 311- 316.
17. Бурдо О.Г., Миличук С.И., Мордынский В.П., Харенко Д.А. Техника блочного вымораживания – Одесса: Полиграф, 2011 – 294с.

УДК 536.755:021.1.016

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА СУШКИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПРОДУКТА ПОЛУЧЕНИЯ КАТАЛИЗАТОРА ГИАП

**Рудобашта С.П., д-р техн. наук, профессор, *Кошелева М.К., канд. техн. наук, профессор
Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина, г. Москва
*Московский государственный университет дизайна и технологии, г. Москва**

Исследованы кинетические закономерности процесса сушки типичного капиллярно-пористого материала: промежуточного продукта получения катализатора ГИАП. Получено аналитическое решение для оценки продолжительности стадии прогрева при исследовании массопроводности при сушке. Проведены экспериментальные исследования динамики процесса сушки, на основе которых показано единство механизма массопереноса в данном материале при температуре сушки как ниже, так и выше 100 °С. Разработаны рекомендации по выбору и кинетическому расчету промышленного аппарата.

Kinetic regularities of the drying process of a typical capillary-porous material: the intermediate product for producing a catalyst GIAP. An analytical solution for estimating the duration of the heating step in the study of mass conductivity at drying. Experimental studies of the dynamics of the drying process on the basis of which shows the unity of the mechanism of mass transfer in this material at a drying temperature both below and above 100 °C. The recommendations for the selection and kinetic calculation of industrial apparatus.

Досліджено кінетичні закономірності процесу сушіння типового капілярно-пористого матеріалу: проміжного продукту отримання катализатора ГИАП. Отримано аналітичне рішення для оцінки тривалості стадії прогріву при дослідженні массопроводності при сушінні. Проведено експериментальні дослідження динаміки процесу сушіння, на основі яких показано єдність механізму масопереносу в даному матеріалі при температурі сушіння як нижче, так і вище 100 °С. Розроблено рекомендації щодо вибору та кінетичного розрахунку промислового апарату.

Ключевые слова: капиллярно-пористый материал, кинетика и динамика сушки, массопроводность, интенсификация.

Целью работы является исследование кинетических закономерностей процесса сушки типичного капиллярно-пористого материала: промежуточного продукта получения никелевого катализатора ГИАП, (ПППК ГИАП), разработка рекомендаций по организации промышленного процесса сушки.

Для практического применения зонального метода расчета кинетики процесса сушки [1,3,7] необходимо знание функции взаимосвязи между среднеобъемными температурой и влагосодержанием материала, а также данные по массопроводности, массоотдаче и динамическому равновесию в системе, анализ свойств материала как объекта сушки.

При экспериментальном исследовании массопроводных свойств высушиваемых материалов использовались образцы в форме стержней с влагоизолированной боковой поверхностью, с торцов которых происходит испарение влаги [1, 2, 6]. Образцы предварительно термостатировались при температуре опыта, но в момент перемещения их из термостата в сушильную камеру и при последующем испарении влаги с торцевых поверхностей, происходило некоторое понижение температуры. Однако, благодаря интенсивному теплопритоку через влагоизолированную поверхность, образец довольно быстро прогревался и, начиная с некоторого момента времени, его среднеобъемная температура становилась близкой к температуре среды.

Для выделения на кривой сушки изотермического (с заданной погрешностью) участка необходима расчетная зависимость, по которой можно оценивать время наступления изотермической стадии. Анали-