

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

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ И СООБЩЕНИЙ

Том 2

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

Минск 2016

УДК 663.241.031-035.2:66.021.3/4:66-022.532

МЕХАНОДИФфуЗИОННЫЙ ЭФФЕКТ – НОВОЕ ЯВЛЕНИЕ В ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСЕ

О. Г. Бурдо, С. Г. Терзиев, В. Н. Бандура, И. И. Яровой

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса, Украина

Очевидны научно-технические противоречия между растущими требованиями к качеству пищевого продукта, энергоемкости его производства и техникой тепломассо-переноса. Выдвигается гипотеза, что решение этих противоречий лежит в плоскости поиска новых принципов организации тепломассообменных 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.

Парадигма и научные основы разрабатываемых в ОНАПТ пищевых нанотехнологий (НТ) включают: гипотезу бародиффузионного переноса из наномасштабных элементов сырья [1], термодинамическую схему нанопроцесса и тепло-механическую модель растительной клетки [2], кинетическую модель массопереноса [3].

Имеются факты, объяснить 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 (ЭМП) [2]. Ряд выявленных несоответствий с принятыми положениями приведен в табл. 1. Вывод однозначный: в раствор переходит большее количество компонентов, чем может быть растворено. Объясняются эти факты тем, что в условиях ЭМП 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 сугубо механический поток, мощность которого определяется разностью давлений. Его можно инициировать, им можно управлять параметрами электромагнитного поля.

Таблица 1

Сопоставление экспериментальных фактов с литературными данными

Система	Сведения о параметрах процесса	Факты в условиях электромагнитного поля
Древесина – водно-спиртовые растворы	В раствор переходит до 46% древесины	В раствор перешло более 80% древесины
Древесина – водно-спиртовые растворы		Повышенное содержание ароматических компонентов
Зерна кофе – вода	В раствор переходит до 30% содержимого зерен	В раствор перешло более 40% содержимого зерен
Зерна кофе – вода		Повышенное содержание ароматических компонентов
Зерна амаранта – спирт	Спирт практически не растворяет сквален	В полученном масле амаранта до 4% сквалена

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 электромагнитной энергии к полярным молекулам». В результате генерации паровых пузырьков 2 в глубине микрокапилляра 1 повышается давление, возникает гидравлический поток, который увлекает за собой экстракт из пограничного слоя 5, нерастворимые 3 и слаборастворимые 4 компоненты (рис. 1). Таким образом, из капилляра 1 выходит диффузионный поток экстракта, который дополняется потоком целого комплекса компонентов не характерных вообще для классических диффузионных процессов.

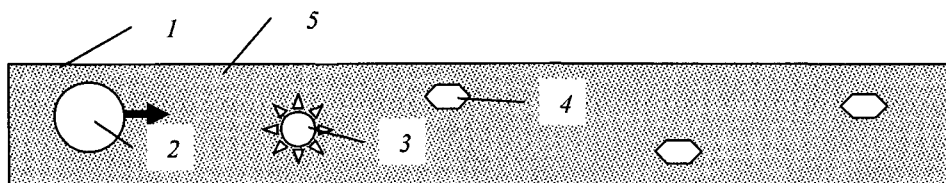


Рис. 1. Физическая схема взаимодействия компонентов и потока

Структура потока из капилляра 1 поясняется эквивалентной электрической схемой (рис. 2), где $Y_{(t)}$ и Y_{Γ} – текущее в твердой фазе и граничное значения концентрации растворимых компонентов соответственно; X_{Σ} – суммарное значение всех перенесенных в экстракт компонентов; C_C и C_H – концентрации в твердой фазе слаборастворимых и нерастворимых в экстрагенте компонентов соответственно; X_C и X_H – то же, но в экстракте.

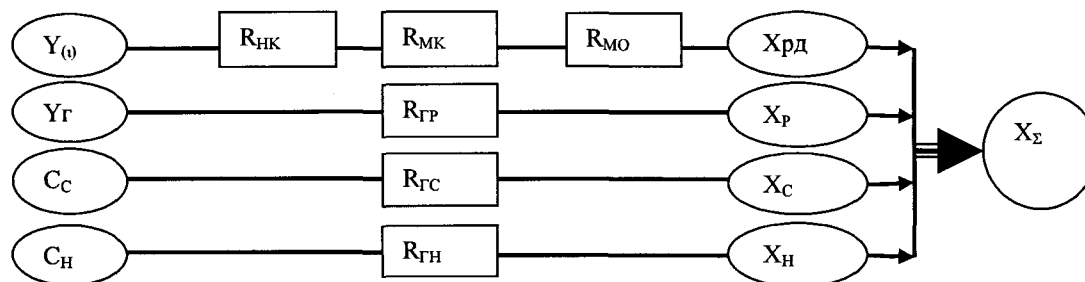


Рис. 2. Эквивалентная электродиффузионная схема сопряженных процессов переноса гидродиффузионными потоками в системе твердая фаза – жидкость – электромагнитное поле

Исходя из классической теплофизической схемы массопереноса [2], механизм диффузионного переноса из волокнистой структуры в поток соответствует только части схемы (рис. 1, 2). Последовательная цепочка диффузионных сопротивлений состоит из суммы: $R_{НК}$ (нанокапилляры), $R_{МК}$ (микрокапилляры) и $R_{МО}$ (массоотдачи).

Суммарный поток всех компонентов в интегральной форме:

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

Интенсивность переноса остальных компонентов определяется балансом соответствующих сил, которые формируются в капилляре межклеточного пространства. Результирующая этих сил определит скорость потока конкретного компонента. Нестационарное одномерное поле концентраций растворимых веществ определяется уравнением конвективной диффузии Фика, а для нерастворимых компонентов чисто диффузионный поток отсутствует. Соответствующие механизмы и модели сведены в табл. 2.

Таблица 2

Механизмы переноса компонентов из межклеточной структуры

Характеристика потока	Движущая сила	Сопротивление потоку	Масса компонента	Модель процесса
Конвективный диффузионный массоперенос	Разность концентраций $Y - X_{PD}$	Диффузионное, R_D	M_{P1} (поток j_1)	$\frac{dM_{P1}}{Fd\tau} = \frac{Y - X_{PD}}{R_D}$
Механический перенос растворимых веществ из пограничного слоя	Разность давлений $P_K - P_0$	Гидравлическое, $R_{ГР}$	M_{P2} (поток j_2)	$\frac{dM_{P2}}{\rho S d\tau} = \frac{P_K - P_0}{R_{ГР}}$
Механический перенос слаборастворимых веществ из капилляров	Разность давлений $P_K - P_0$	Гидравлическое, $R_{ГС}$	M_C (поток j_3)	$\frac{dM_C}{\rho S d\tau} = \frac{P_K - P_0}{R_{ГС}}$
Механический перенос нерастворимых веществ из капилляров	Разность давлений $P_K - P_0$	Гидравлическое, $R_{ГН}$	M_H (поток j_4)	$\frac{dM_H}{\rho S d\tau} = \frac{P_K - P_0}{R_{ГН}}$

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. Рассмотрим реакцию оболочки клетки при последовательном энергетическом и механическом воздействии. В основе анализа непрерывно-гетерогенная модель системы [1].

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:

$$\tau_0 < \tau < \tau_n; \quad P_0 < P_a \leq P_n; \quad T_0 < T_a \leq T_n;$$

$$\frac{dV_k}{d\tau} = K \varepsilon F_k \frac{\rho_s}{\rho_k} [C_s(\tau) - C_k(\tau)] + F_k \varepsilon w + \frac{1 - \varepsilon}{r \rho_n} \int q_u dF. \quad (2)$$

В соотношении (2) первое слагаемое учитывает эффект массопереноса, второе – изменение объема за счет инфильтрации, а третье – изменение объема за счет частичного парообразова-

ния. здесь K – коэффициент массопереноса; F_K – площадь поверхности оболочки клетки; ε – доля каналов в оболочке; $\rho_э$, 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.

На втором этапе выдержка необходима для завершения массопереносных процессов. На третьем этапе происходит резкий сброс давления, что приводит к интенсивному выходу содержимого через поры клеточной оболочки. При определенных условиях возможен частичный либо полный разрыв оболочки. В этом случае задачу можно представить в виде модели напряженного состояния сферической оболочки со сквозными отверстиями [2].

Научные гипотезы подтверждены на практике. В условиях коньячного производства электромагнитный экстрактор обеспечивал интенсификацию массопереноса в тысячи раз, позволял на наномасштабном уровне строить букет коньячного спирта. В технологии кофе степень извлечения компонентов из зерен повышалась на 15%, а затраты энергии снижались на 50%. Опытные образцы 60% концентрата кофе имеют высокие вкусовые характеристики [4]. Использование нанотехнологических подходов позволило получить чистую воду с содержанием солей менее 4 мг/кг, экологически чистый концентрат жидкого дыма и масла [5, 6].

Выделены (табл. 3) возможные механизмы процессов переноса в системе объем клетки – оболочка – межклеточное пространство – среда.

Таблица 3

Механизмы и стадии процессов переноса компонентов из растительного сырья при безградиентном подводе электромагнитной энергии

Элементы сырья	Режим и механизм процесса	Стадии процессов
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, и 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

Рассмотренные механизмы способны существенно интенсифицировать процессы активации сырья, активации и инактивации микроорганизмов [7].

Выводы. В условиях ЭМП возможно возникновение специфичного потока из межклеточного пространства нерастворимых экстрагентом компонентов. Такой эффект обнаружен впервые и ему дано название «механодиффузионный эффект». Для его инициирования требуется четкое согласование структурных характеристик сырья, особенностей жидкой фазы 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.).

Литература

1. Burdo O. G. Nanoscale effects in food-production technologies // *J. of Engineering Physics and Thermophysics*. 2005. Vol. 78, Iss. 1. Pp. 90–96.
2. Бурдо О. Г. Пищевые наноэнерготехнологии. Херсон, 2013. – 294 с.
3. Бурдо О. Г., Бандура В. Н. Тепломассоперенос в наномасштабных элементах пищевого сырья // ММФ–2012: XIV Минский междунар. форум по тепло- и массообмену: Тез. докл. и сообщ. / Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. 10–13 сентября 2012 г. Минск, 2012. Т. 2, Ч. 2. С. 611–614.
4. Бурдо О. Г., Ряшко Г. М. Экстрагирование в системе «кофе – вода». Одесса, 2007. – 176 с.
5. Burdo O. G., Kovalenko E. A., Kharenko D. A. Intensification of processes of low-temperature separation of food solutions // *Appl. Thermal Engineering*. 2008. № 28. Pp. 311–316.
6. Бурдо О. Г., Милинчук С. И., Мордынский В. П., Харенко Д. А. Техника блочного вымораживания. Одесса: Полиграф, 2011. – 294 с.
7. Бурдо О. Г., Рыбина О. Б. Процессы инактивации микроорганизмов в микроволновом поле. Одесса: Полиграф, 2010 – 200 с.

ТЕПЛОВЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ С НАНО- И МИКРОЧАСТИЦАМИ, В БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

Баранов А. Ю. Оценка энергоэффективности аппаратов для общего криотерапевтического воздействия.....	217
Большев К. Н., Иванов В. А., Ефимов В. М., Степанов А. А. Температурный мониторинг тела пловцов в процессе заплыва через Берингов пролив при экстремально низкой температуре воды.....	220
Бринь А. А., Такопуло Д. А., Фисенко С. П., Ходыко Ю. А. Применение броуновской диффузии, термофореза, электрофореза и диэлектрофореза для очистки газового потока от наночастиц.....	222
Бурдо О. Г., Терзиев С. Г., Бандура В. Н., Яровой И. И. Механодиффузионный эффект – новое явление в тепломассопереносе.....	224
Гортышов Ю. Ф., Щелчков А. В., Хакимзянов Р. Р., Аксянов Р. А., Попов И. А. Интенсификация теплоотдачи и критические тепловые потоки при кипении воды на микроструктурированных поверхностях в условиях свободной конвекции.....	228
Гринчук П. С., Стетюкевич Н. И., Шевцов В. Ф., Чернухо Е. В. Методы тепловых испытаний теплоизолирующих покрытий на основе микросфер и энергосберегающих пленок светопрозрачных элементов ограждающих конструкций.....	232
Гузей Д. В., Минаков А. В., Пряжников М. И., Рудяк В. Я. Экспериментальное исследование вынужденной конвекции наножидкостей.....	234
Дмитриев А. С., Макаров П. Г. Особенности испарения жидкости из малых капель коллоидных растворов и образования осадочных структур различной морфологии.....	237
Дмитриев А. С., Макаров П. Г., Эльбуз М. А. Мезоскопический слой металлических микросфер как условие кипения жидкости в режиме «прыгающих пузырей».....	239
Еналеев Р. Ш., Теляков Э. Ш., Амерханова Г. И., Качалкин В. А. Прогнозирование массовых тепловых поражений в чрезвычайных ситуациях.....	241
Жолудь А. М. Анализ магнитной сепарации эритроцитов с учетом их распределения по магнитным свойствам.....	245
Кашевский Б. Э., Кашевский С. Б., Терпинская Т. И., Улащик В. С. Исследование влияния распределения магнитных частиц в опухоли на эффективность локальной магнитной гипертермии.....	249
Кашевский С. Б. Влияние диполь-дипольного и гидродинамического взаимодействия на ориентационную динамику однодоменных магнито жестких феррочастиц.....	253
Козулин А. А., Промахов В. В., Жуков И. А. Исследование напряженно-деформированного состояния оксидной керамики при тепловом ударе.....	257
Колпаков А. В. Расчетно-теоретическая оценка возможности качественного изменения радиационного теплового потока к стенке ракетного двигателя посредством использования особенностей радиационных свойств наночастиц.....	260
Левин М. Л., Маханёк А. А. Тепловой эффект метаболизма лактата при общей газовой криотерапии.....	264
Малиновский А. И., Рабинович О. С. Моделирование наноуглеродного СВЧ-нагревателя с учетом межчастичного теплообмена излучением.....	268
Панченко О. А., Зайцева Н. А., Кабанцева А. В. Методология и технология экстремального криовоздействия при постстрессовых расстройствах.....	272
Пряжников М. И., Минаков А. В., Рудяк В. Я. Исследование критической плотности теплового потока на цилиндрической поверхности при кипении наножидкостей.....	276
Саверченко В. И., Фисенко С. П., Ходыко Ю. А. Химические превращения наночастиц при распылительном пиролизе и процессы переноса в фемтолитровой капле.....	279