

Energetics of Eco-Industry of Food Concentrates Production

Burdo O., Terzsiev S., Levtrynska Ju.
Odessa National Academy of Food Technologies
Odessa, Ukraine

Abstract. The determination of eco-industry in food production is formulated. The problems of processes of dehydration, heat balance and prospects of technologies directed energy action are considered. We offer the ways of solving an energy problems in product drying. The hypostases are formulated and the possibilities of laminar and turbulent diffusion to heat transfer mechanisms are analyzed. Increasing of drying speed with barodiffusional flows involvement is demonstrated. The extraction kinetic model is given in differential form. The prospects of usage directed action principles in target compounds extraction processes are analyzed. The analysis of drying technologies energy efficiency on base new similarity (similarity of energy action) is carried out. We demonstrated that impulse electromagnetic field could trigger in new effect, which one named mechanodiffusion.

Keywords: eco-industry, barodiffusion, energy, food technologies, modeling.

Energetica eco-industriei de producere a concentratelor alimentare

Burdo O., Terziev S., Levtrinskaia Ju.
Academia Industriei Alimentare din Odesa,
Odesa, Ucraina

Rezumat. Se formulează definiția eco-industriei pentru industria alimentară. Problemele proceselor de deshidratare, bilanțului de căldură și perspectivele privind dezvoltarea tehnologiile cu acțiune energetică direcționată. Se propun modalități de rezolvare a problemelor energetice la uscarea produselor. Se formulează ipoteze și sunt analizate posibilitățile barodifuziei laminare și turbulente asupra mecanisme de schimb și de transfer de masă. S-a demonstrat, că utilizarea fluxurile barodifuzionale pot duce la creșterea vitezei de uscare. Se propune în formă diferențială modelul cinetic de extragere. Sunt analizate avantajele utilizării principiilor acțiunii orientate spre promovarea proceselor de extragere a componentelor la primul pas din structura capilară a materiei prime alimentare. Este efectuată analiza eficienței energetice a tehnologiei de uscare bazate pe utilizarea noului criteriu de similitudini - numărul acțiune energetice. S-a demonstrat, că câmp electromagnetic cu caracter de impuls poate iniția un efect principal nou, care este numit mecanodifuzional.

Cuvinte-cheie: eco-industria, barodifuzie, energie, tehnologii alimentare, modelarea.

Энергетика экоиндустрии производства пищевых концентратов

Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Левтринская Ю.О.
Одесская национальная академия пищевых технологий
Одесса, Украина

Реферат. Дано определение экоиндустрии пищевых производств. Обсуждаются проблемы процессов обезвоживания, тепловой баланс и перспективы технологий направленного энергетического действия. Предлагаются пути решения энергетических проблем при сушке продуктов. Формулируются гипотезы и анализируются возможности ламинарной и турбулентной бародиффузии на механизмы тепломассопереноса. Показано, что использование бародиффузионных потоков может привести к росту скорости сушки. Предложена в дифференциальной форме кинетическая модель экстрагирования. Анализируются преимущества использования принципов направленного действия в процессах извлечения целевых компонентов из капиллярной структуры пищевого сырья. Проведен анализ энергетической эффективности сушильных технологий на основе нового числа подобия – числа энергетического действия. Показано, что импульсное электромагнитное поле может инициировать принципиально новый эффект, который назван механодиффузионным.

Ключевые слова: экоиндустрия, бародиффузия, энергия, пищевые технологии, моделирование.

1. ВВЕДЕНИЕ

Производство пищи является энергоемкой отраслью во всех индустриально развитых странах [1-3]. Пищевые технологии развиваются по пути стабильного роста

уровня потребления энергетических ресурсов. Если ввести понятие энергетический коэффициент полезного

действия (КПД) продовольственной цепочки, то он не превысит 10% [4].

Серьезные энергетические проблемы характерны для пищевых концентратной отрасли, продукция которой требует обезвоживания сырья, а это всегда является энергоемкой технологией. Одновременно ужесточаются требования по безопасности пищевых продуктов и регламентируются экологические условия работы предприятия. Очевидно, что пищевые технологии, и, в первую очередь, производство пищевых концентратов следует переводить на инновационные принципы решения энергоэкологических проблем.

В работе рассмотрены пути решения этих проблемных вопросов в системе агропромышленного комплекса (АПК), показана перспектива новых принципов адресной доставки энергии к элементам пищевого сырья, определена эффективность внедрения электромагнитных систем для реализации поставленных условий. Впервые поставлена и решается задача перевода пищевых технологий на рельсы экоиндустрии.

2. Задачи экоиндустрии пищевых технологий.

Понятия и принципы экоиндустрии завоевывают популярность в развитых и развивающихся странах [1, 5]. Но относительно пищевых технологий – это направление практически не развивается. Вместе с тем, именно экоиндустрия способна в комплексе решать противоречивые задачи, которые стоят перед современными пищевыми технологиями. Представляется, что определение этого направления можно сформулировать следующим образом. Экоиндустрия АПК – это последовательная, непрерывная цепь технологических процессов, которые обеспечивают максимальную энергетическую эффективность, минимальные термические воздействия на пищевое сырье, предельно низкую нагрузку на атмосферу и литосферу (рис.1).

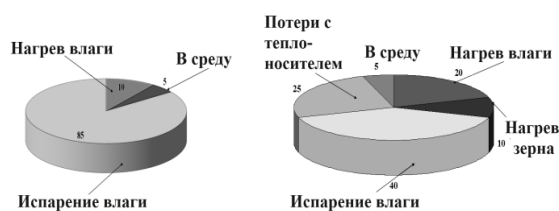


Рис.2. Энергетика обезвоживания.



Рис. 1. Задачи экоиндустрии

Синтез экоиндустриальной технологии должен основываться на современных принципах организации процессов переноса. В лаборатории «Пищевых нанотехнологий» Одесской национальной академии пищевых технологий (ОНАПТ) используются следующие подходы [5 - 9]:

- принципы адресной доставки энергии к элементам пищевого сырья;
- наноэнерготехнологии;
- вакуумные и волновые технологии;
- комбинированные технологии;
- инициирование бародиффузии;
- механодиффузионные явления.

Пищевые продукты, полученные по предложенным принципам, практически полностью сохранят функциональные свойства сырья, их производство потребует меньших затрат энергии, а глубокая переработка и безотходные технологии сведут до минимума нагрузку на окружающую среду.

3. Энергетический баланс технологий обезвоживания

Удаление влаги – одна из основных задач в технологиях пищевых концентратов. Применяются два принципа: выпаривание и сушка. Казалось бы, у этих процессов одинаковые задачи – перевести в пар влагу. Но затраты энергии на удаление единицы влаги оказываются существенно разными. Если энергетический КПД самого несовершенного процесса выпарки 85%, то лучшие сушильные технологии не превышают 40% [8]; (рис.2).

Причины в том, что в конвективных сушилках задача достижения высоких значений коэффициентов массопереноса решается путем увеличения скорости (расхода) сушильного агента. Однако повышение расхода приводит к пропорциональному росту потерь теплоты в окружающую среду (рис.3). Эти противоречия не имеют практического решения, и резервы энергоэффективности в конвективных сушилках исчерпаны.

В конвективных сушилках, как правило, необходимую температуру сушильного агента достигают путем смешивания горячих газов с воздухом из окружающей среды. Чем больше степень смешивания, тем больше и потери теплоты с отработавшим теплоносителем (рис.3,а). Системы адресной доставки энергии на основе двухфазных термосифонов (ТС) (ряды ТС показаны прямыми линиями) используют инновационные принципы (рис.3.,б).

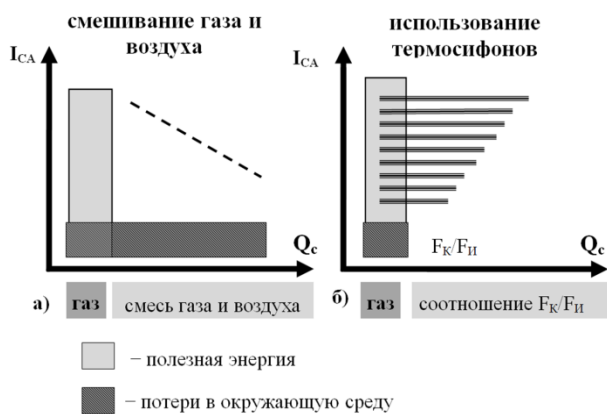


Рис.3. Традиционные схемы организации теплопередачи при сушке, в диаграмме энтальпия сушильного агента (I_{CA}) – тепловой поток в окружающую среду (Q_c)

4. Пути решения научно-технических противоречий при сушке.

Представляется, что следует искать новые принципы организации теплопередачи. Классификация инновационных подходов включает два направления: градиентные и безградиентные. В основе новых подходов лежат следующие гипотезы.

Гипотеза 1. Современные технические средства (высокоэффективные тепловоды – тепловые трубы (ТТ) и ТС) позволяют организовать адресную доставку энергии:

- к поверхности сырья во всем объеме;
- воздействовать на пограничный слой вязкого и дисперсного продукта самим

теплопередающим модулем. Комплексные исследования таких систем проведены в работах [8,9].

Гипотеза 2. Использование электромагнитных источников энергии позволит организовать адресную доставку энергии непосредственно к влаге в продукте, что может инициировать мощный бародиффузионный поток влаги из твердой фазы продукта. Традиционные способы сушки характеризуются сугубо диффузионным потоком J_D , который последовательно преодолевает диффузионные сопротивления капилляров R_k и массоотдачи в среду R_c . Эти способы являются градиентными, и их характер существенно отличается от предлагаемых объемных (безградиентных) технологий (рис.4). При бародиффузии возникает поток J_b , который преодолевает гидравлическое сопротивление R_b .

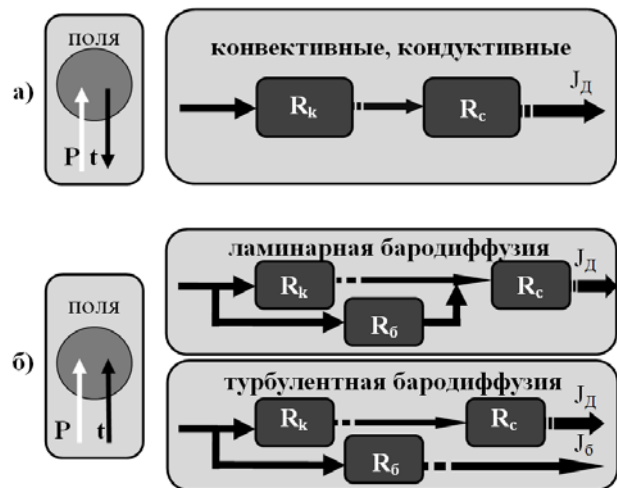


Рис.4. Схемы тепломассопереноса: а) градиентные; б) безградиентные.

Если в традиционных схемах градиенты температур T и влажностей W не совпадают, то при объемном подводе энергии максимальные значения температур и влажностей находятся в глубине продукта (рис.5). Именно этот фактор позволяет в условиях электромагнитного поля (ЭМП) инициировать из капиллярной структуры мощный гидродинамический поток, механизм которого изложен в [5]. Ламинарная бародиффузия доставляет влагу на поверхность продукта, а турбулентная – непосредственно в объем воздушной среды [5]. Иначе выглядят и линии сушки (рис.5).



Рис.5. Линии обезвоживания.

Если в традиционных схемах сушки выражены периоды постоянной и падающей скоростей (рис.5, а), то в сушилках 3 поколения микроволновая (МВ) энергия обеспечивает постоянную подпитку влагой поверхность продукта за счет ламинарной бародиффузии (рис.5, б). Если реализуется режим турбулентной бародиффузии, то влага в виде тумана выбрасывается непосредственно в поток воздуха. Парадоксально, но процесс обезвоживания протекает с нарастающей скоростью обезвоживания. Такие картины получены экспериментально [10]. Наиболее низкие значения скорости сушки в первый период работы объясняются тем, что поверхностная влага блокирует процесс бародиффузии. Последние начинают развиваться по мере удаления части поверхностной влаги.

5. Моделирование теплопереноса при экстрагировании.

Экстрагирование является одним из основных процессов в технологиях растворимого кофе. Это периодический, энергоемкий процесс, отходы которого (кофейный шлам) являются серьезными загрязнителями литосферы. Предложенные принципы экстрагирования в МВ-поле [5] подтвердили свою эффективность, но требуют развития научных основ теплопереноса в условиях электромагнитного поля.

Предложена математическая модель кинетики экстрагирования в ЭМП, в основе которой использованы идеи А.В.Лыкова [8].

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

В (1) с помощью феноменологических коэффициентов K_{ij} устанавливаются функциональные связи между давлением P , температурой t , концентрациями целевых компонентов, соответственно, на поверхности C_P , в межклеточном пространстве C_M , в клеточной структуре сырья C_K . Модель учитывает кинетику процессов экстрагирования во времени τ .

Поставлена нестационарная трехмерная задача массопереноса, которая должна дополняться системой уравнений, описывающих сопряженные процессы переноса конвективной диффузии, диффузией в стесненных условиях капилляра и действием бародиффузии, представленную моделью точечного источника [5]. Модель сложна для аналитического решения, но она позволяет перейти к формированию соответствующих критериальных уравнений.

Суммарным результатом действия всех движущих сил будет массовый поток J , который складывается из диффузионного потока j_1 (находится из уравнения Фика: $j_1 = -D \cdot dc_T/d\delta$, потока j_2 (конвективная диффузия в стесненных условиях капилляра) и потоком конвективной диффузии (интенсивность которого определяется коэффициентом массоотдачи β_K . Параллельно этим потокам в микроволновом поле возникает бародиффузионный поток j_3 , который определяется повышенным давлением в капиллярах [5].

$$j_2 = \beta_C \cdot (X_\Gamma - X_\Pi) = \beta_K \cdot (X_\Pi - X_\Theta) \quad (2)$$

$$j_3 = \beta_P \cdot (P_K - P_\Theta) \quad (3)$$

Поток массы j_3 определяется эффективным коэффициентом массоотдачи β_P и разностью давлений в капилляре P_K и в потоке P_Θ . Последовательная цепочка поля концентраций X отражена индексами: Γ – граничная между фазами, Π – на поверхности

продукта, \mathcal{E} – в ядре потока экстрагента. Поток j_3 создается мощной гидродинамической движущей силой, он турбулизует пограничный слой, и может быть на несколько порядков больше j_2 . Возникает проблема отразить в классических уравнениях массопереноса влияние этого потока. На основе принципов теории подобия О.Г. Бурдо предложил новый безразмерный комплекс – число энергетического действия, физический смысл которого отражает отношение расходов энергии МВ технологии (Q) и базового варианта (Q_0). Тогда, число $Bu = Q/Q_0$. Для задач обезвоживания:

$$Bu = N \cdot (r \cdot V \cdot \rho)^{-1} \quad (4)$$

А для процессов экстрагирования в МВ – поле:

$$Bu = N \cdot (r \cdot w \cdot d^2 \cdot \rho)^{-1} \quad (5)$$

В соотношениях (4,5) принято: N – мощности излучения; V – объемный расход удаляемой влаги; r скрытая теплота фазового перехода; d – определяющий размер; ρ – плотность. Соотношение (4, 5) не только удачно обобщили базы экспериментальных данных, но и дали инструмент для сравнения традиционных и инновационных образцов сушильной техники (табл.1) по показателю энергетической эффективности.

В табл.1 рассмотрены сушилки: 1 – базовые первого поколения; 2 – модернизированные первого поколения; 3 – блочные второго поколения; 4 – рекуперативные второго поколения; 5 – третьего поколения (достигнутый результат); 6 – третьего поколения (ожидаемый результат).

Таблица 1. Оценка энергетической эффективности сушилок.

	МДж/кг удаленной влаги	Тепловой КПД, %	Число Бурдо
1	4,26 – 6,3	0,36 – 0,5	1,85 – 2,7
2	3,8 – 5,1	0,45 – 0,6	1,67 – 2,22
3	3,54	0,65	1,54
4	2,7 – 2,88	0,8 – 0,85	1,18 – 1,25
5	1,9	-	0,82
6	0,2	-	0,09

Базовый вариант (№1) – это традиционные конвективные сушилки. Модернизация

сушилок термосифонной системой тепловой утилизации – под номером 2. Сушилки третьего поколения (№3) отличаются тем, что в зоне предварительного нагрева продукта осуществляется адресная доставка энергии к продукту с помощью испарительных ТС. В сушилках (№4) такая адресная доставка энергии организована и в зоне сушки. Это серьезно снизило потери тепловой энергии с уходящими газами.

Сушилки четвертого поколения, где энергия доставляется непосредственно к влаге в продукте, вообще не имеют общепринятого теплового КПД, а число Bu отражает тенденции развития сушильной техники [8].

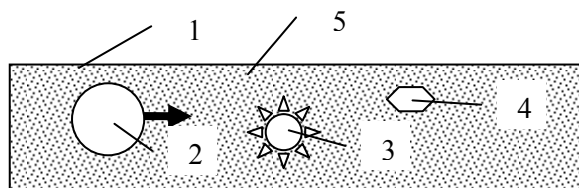
6. Механодиффузионный эффект при тепломассопереносе

Очевидны научно технические противоречия между растущими требованиями к качеству пищевого продукта, энергоемкости его производства и техникой тепломассопереноса. 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 [7], термодинамическую схему нанопроцесса и тепломеханическую модель растительной клетки [6], кинетическую модель массопереноса [5].

Представляется, что в условиях ЭМП можно организовать гидродинамический 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.

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 с собой экстракт из пограничного слоя (5), нерастворимые (3) и слаборастворимые (4) компоненты (рис.6).



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

Рис. 6. Физическая схема взаимодействия компонентов и потока.

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

Массовый поток M_{P1} определяется разностью концентраций $(Y - X_{PD})$ и диффузионным сопротивлением R_D

$$\frac{dM_{P1}}{Fd\tau} = \frac{Y - X_{PD}}{R_D} \quad (6)$$

Массовый поток M_{P2} характеризует выход растворимых компонентов из диффузионного пограничного слоя и определяется разностью давлений $(P_K - P_0)$ и гидравлическим сопротивлением R_{GR}

$$\frac{dM_{P2}}{\rho S d\tau} = \frac{P_K - P_0}{R_{GR}} \quad (7)$$

Массовый поток M_C характеризует выход слаборастворимых и нерастворимых компонентов из канала и определяется разностью давлений $(P_K - P_0)$ и гидравлическим сопротивлением R_{GS}

$$\frac{dM_C}{\rho S d\tau} = \frac{P_K - P_0}{R_{GS}} \quad (8)$$

Поток экстрагента из капилляров турбулизирует пограничный слой, благодаря чему сопротивление массопереносу бародиффузией может быть на несколько порядков ниже, чем в традиционных схемах массоотдачи.

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

Выводы. Производство пищевых концентратов является энергоемкой отраслью и сопровождается серьезными загрязнениями как атмосферы, так и литосферы. Перевод производства на принципы экоиндустрии позволяет в комплексе решать противоречивые энергоэкологические проблемы. Эффективным инструментом решения этих проблем являются технологии адресной доставки энергии к элементам пищевого сырья, непосредственно к влаге в продукте.

В работе показано, как согласование структуры сырья и параметров электромагнитного поля позволяет управлять потоками из объема сырья: организовывать ламинарную и турбулентную бародиффузию. Такая технология отличается тем, что удаление влаги происходит в виде тумана, что в разы снижает энергозатраты при сушке.

Литература (References)

- [1] Energy from waste and the food processing industry/ Process Safety and Environmental Protection – Volume 90, Issue 3, May 2012, Pages 203–212/ George M. Hall, Joe Howe/ The Institution of Chemical Engineers. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.
- [2] Green Technologies in Food Production and Processing: Joyce I. Boye, Yves Arcand/ Springer Science & Business Media, 2012. – 681 p.
- [3] Winds of change: East Asia's sustainable energy future / Xiaodong Wang [et al.] ; World Bank. – Washington : The World Bank, 2010. – XVII, 154 p
- [4] Burdo O.G. Energeticheskie paradoksyi ekonomiki [Energy paradoxes of the economy]/Problemele energeticii regionale, Chisinau, №1 (21), 2013.- pp.67–74.
- [5] Burdo O.G., Pischevyie nanoenergotehnologii [Food nanotechnology] – Kherson, 2013 –294 p.

[6] Nanoscale effects in food-production technologies, Burdo O.G, // Journal of Engineering Physics and Thermophysics – 2005.- Vol.78, Issue 1.– P.90–96.

[7] Burdo O.G. Nanomasshtabnyie efektyi v pischevyyih tehnologiyah [Nanoscale Effects in food technologies] //Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. Minsk, vol.78, no. 1.-2005. - pp.88–93.

[8] Burdo O.G. Evolyutsiya sushilnyih ustanovok [Evolution of drying equipment] – Odessa: Poligraf, 2010 – 368p.

[9] Burdo O.G. Energetika pischevyyih nanotehnologiy [Food nanotechnology energetic]

/Problemele energeticii regionale, Chisinau, №1 (), 2012.- pp.69–79.

[10]Burdo O.G., Terziev S.G., Yarovoy I.I., Borsch A.A. Elektromagnitnyie tehnologii obezvozhvaniya syrya [Electromagnetic technologies of raw material dehydration]. Problemele energeticii regionale, Chisinau, №1 (18), 2012.- pp.69- 79.

[11]Burdo O.G., Terziev S.G., Ruzhitskaya N.V., Makievskaya T.L. Protsessyi pererabotki kofeynogo shlama [Coffee sludge recycling process]. – Kiev: EnterPrint, 2014. - 228 p.

Сведения об авторах:



Бурдо Олег Григорьевич – заслуженный деятель науки и техники Украины, доктор технических наук (1988г.), профессор, заведующий кафедры процессов, оборудования и энергетического менеджмента ОНАПТ. Автор более пятисот научных работ и 11 монографий. Область научных интересов: тепломассообмен, энергоэффективное оборудование (экстракторы, тепломассоутилизаторы, пиролизеры, криоконцентраторы и др.), получение новых неэнергоёмких продуктов. E-mail: terma_onaft@rambler.ru



Терзиев Сергей Георгиевич. – кандидат технических наук. Председатель правления ПАО ЭННИ ФУДЗ. Сотрудник кафедры процессов, оборудования и энергетического менеджмента ОНАПТ. Автор 80 научных работ. Подготовил 1 кандидата технических наук. Области научных интересов: теплотехнологии АПК, технологии экстрагирования кофе и утилизации кофейного шлама, системы тепломассоутилизации.



Левтринская Юлия Олеговна – аспирант кафедры процессов, оборудования и энергетического менеджмента ОНАПТ. Сфера научных интересов: экстрагирование, массообменные процессы, энергоэффективные технологии. E-mail: levtrinska@ukr.net