

# Электротехнологии адресной доставки энергии при обработке пищевого сырья

\* О. Г. Бурдо<sup>а</sup>, \*\* В. Н. Бандура<sup>б</sup>, Ю. О. Левтринская<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Одесская национальная академия пищевых технологий,  
ул. Канатная, 112, г. Одесса, 65082, Украина, \*e-mail: [terma\\_onaft@rambler.ru](mailto:terma_onaft@rambler.ru)

<sup>б</sup> Винницкий национальный аграрный университет,  
ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21000, Украина, \*\*e-mail: [bandura\\_3@ukr.net](mailto:bandura_3@ukr.net)

Показано, что основные проблемы развития человечества (энергия, экология, пища) в первую очередь характерны для пищевых отраслей, а их решение связано с поиском принципиально новых подходов к термической обработке сырья. Обоснованы перспективы электротехнологий адресной доставки энергии к отдельным элементам пищевого сырья. Сформулированы гипотезы энергоэффективных процессов обезвоживания, экстрагирования и инактивации микроорганизмов. На основе критического анализа литературных источников и исследования механизмов взаимодействия электромагнитного поля с пищевым сырьем предложен безразмерный комплекс – число энергетического воздействия. Это число использовано для оценки энергетики процессов массопереноса и их кинетики. Представлены результаты аналитического и экспериментального моделирования процессов сушки и пастеризации. Рассмотрены этапы конверсии энергии в сушильных технологиях.

*Ключевые слова:* пищевое сырье, электромагнитное поле, сушка, пастеризация, энергоемкость, энергетический КПД.

УДК 664.023.061.3-048.34:66.021.3:004.94

## ВВЕДЕНИЕ

Традиционные технологии производства продуктов питания в индустриально развитых государствах отличаются значительной энергоемкостью [1–6]. Во многих странах пищевая отрасль является лидером по потреблению энергетических ресурсов. Причем если объемы производства удваиваются каждые 15 лет, то объемы потребления энергии – каждые 12. Это приводит к росту удельных затрат энергии в экономиках, что при снижении запасов органического топлива становится тревожным фактором для всего человечества. Острота энергетических и экологических вопросов стимулировала постановку научных исследований для прогнозирования сценариев развития человечества. Межгосударственная группа европейских ученых (базовая лаборатория которых находилась в Риме) представила результаты исследований в виде глобальной прогнозной модели развития человечества [2], которая получила название «модель Римского клуба».

Предложенная модель была сценарного типа. Модель учитывала ключевые параметры состояния общества. Начались исследования с формирования базы данных на 1970 г. Установлены тенденции изменения основных показателей. Последовательно рассматривались: запасы органического топлива, смертность, рождаемость, население планеты, производство товаров, объем услуг, нагрузка на окружающую среду. Период исследований составлял 70 лет. В

первом, самом пессимистичном сценарии считалось, что все тенденции, установленные на момент разработки модели, сохранятся. Прогноз определил, что в 2030 г. человечество ожидает острейший энергоэкологический кризис.

Дальше авторы изменили ограничения и представили сценарий для случая, если человечество сможет найти новые источники и энергетические ресурсы. Прогнозировался острый, чисто экологический кризис к 2060 г. Последующие сценарии проводились с нарастающим оптимизмом. Авторы предполагали, что со временем снизится нагрузка на окружающую среду в 4–5 раз. Тогда прогнозировался кризис обеспечения человечества пищей к концу столетия.

## АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Из глобальной модели развития человечества (модели Римского клуба) можно сделать вывод, что ключевыми проблемами на текущее столетие будут: энергия, экология и пища. Этот вывод иллюстрируется качественными зависимостями (рис. 1). Каждый кризис формируется из трех этапов: развитие, бурный рост и стабилизация на достигнутом уровне (рис. 1) [4].

Авторы устанавливали ограничения модели и прогнозировали сценарий развития. Однако, как добиться указанных ограничений, рецептов не было дано. В статье поставлена задача определения таких рецептов для пищевых технологий.

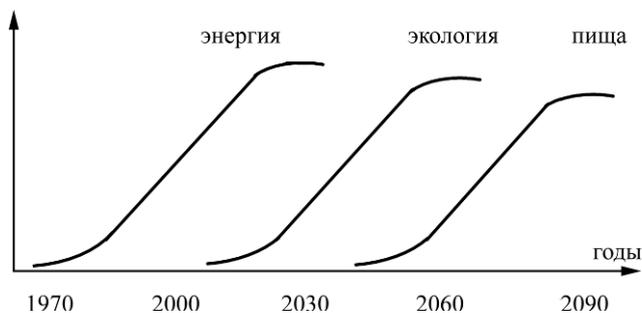


Рис. 1. Периоды формирования кризисов.

Безотходные технологии смогут решать проблемы экологической безопасности производства, а в пищевых отраслях – и резервных источников пищи. Однако решение этих проблем требует революционных преобразований в пищевой и перерабатывающей промышленности. Необходим переход к принципиально новым технологическим приемам. Производство неэнергоёмких пищевых продуктов повышенной пищевой ценности, создание ассортимента новых образцов, глубокая переработка пищевого сырья однозначно требуют использования современных приемов в технологиях [1, 3–6].

Традиционные пищевые технологии оперируют огромными потоками энергии, которая подводится ко всему объёму сырья. Кроме того что энергия используется не эффективно, часто термические воздействия приводят к ухудшению качественных показателей готового продукта. В работе ставится задача найти способы энергетического воздействия непосредственно на отдельные частицы дисперсного материала, элементы пищевого сырья (влага, микроорганизмы, оболочки клеток, поры, капилляры и пр.). В результате ожидается существенное повышение эффективности пищевых технологий: снижение удельной энергоёмкости, улучшение качества готового продукта, рост степени извлечения целевых компонентов сырья, повышение производительности и пр. Ставится задача найти эффективные принципы, подходы для локальных действий, направленных на интенсивные, низкоэнергоёмкие операции с пищевым сырьём и даже с отдельными наноразмерными элементами этого сырья.

Основным процессом большинства пищевых технологий является термическая обработка. Именно этот процесс определяет качество готового продукта, затраты энергии и себестоимость его производства. Очевидны научно-технические противоречия между растущими требованиями к качеству пищевого продукта, энергоёмкости его производства и техникой тепломассопереноса. Ряд основных пищевых технологий парадоксально решают задачи использования энергетических ресурсов (табл. 1).

Решение поставленных задач связано с эффективным использованием современных принципов энергетического воздействия, учитывающих разные свойства отдельных структур сырья, с привлечением прогрессивных средств теплопередачи и термотрансформации. Такие задачи в работе решаются на основе электромагнитных технологий [7–15].

Выдвигается гипотеза, что решение указанных 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.

#### МЕТОДЫ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Представляется, что принципы оценки эффективности использования энергии оборудованием пищевых производств следует серьезно переосмыслить. Часто используемый тепловой КПД далеко не всегда эффективен. Например, тепловой КПД пастеризатора считается как отношение энергии, подведенной к продукту, к энергии использованного пара. Фактически расходами считаются потери в окружающую среду. При таком подходе КПД пастеризатора составляет 95–97%. Однако вся подведенная к продукту энергия не является полезной. Логично считать полезной только ту энергию, которая потреблена непосредственно микроорганизмами и пошла на процесс инактивации. При таком подходе энергетический КПД пастеризационных аппаратов чрезвычайно низкий – 0,004%. А более 99,9% расходуется практически на «порчу» пищевого продукта [16].

Аналогичная ситуация наблюдается в оценке теплового КПД сушильных установок. Здесь расчет ведут как отношение энергии, которая физически необходима для перевода в пар влаги в продукте, к энергии, потраченной сушильным агентом. В инновационных сушилках развиваются принципы удаления влаги из сырья не только в виде паровой фазы, но и в виде капель жидкости. Это, например, технологии фильтрационной сушки [7]. Здесь такой подход становится абсурдным. Тепловой КПД выпарных аппаратов составляет 85%. Однако можно ли не учитывать потери энергии с вторичным паром? Даже в многоступенчатых вакуум-выпарных установках такие потери существенны.

Предлагается для сравнения энергетической эффективности шире использовать подходы,

Таблица 1. Энерготехнологические возможности решения задач пищевых производств

| № | Задача                         | Традиционные решения   | Гипотезы  |
|---|--------------------------------|--|---|
| 1 | Инактивация микроорганизмов    | Энергия подводится ко всему объему продукта и горячим продуктом пастеризуется.     | Возможности адресной доставки энергии непосредственно к микроорганизму.                                   |
| 2 | Сушка сырья                    | Энергия подводится к промежуточному потоку, который переводит влагу в пар.         | Возможности адресной доставки энергии непосредственно к влаге в объеме продукта.                          |
| 3 | Сушка сырья                    | Вся удаляемая влага продукта переводится в паровую фазу.                           | Возможности удаления влаги в виде двухфазного потока.   |
| 4 | Извлечение целевых компонентов | Растворение компонента экстрагентом и диффузия его в экстракт.                     | Возможности дополнительного переноса из межклеточного пространства и из клеток нерастворимых компонентов. |
| 5 | Ректификация                   | Энергия дефлегмации и дистилляции не используется.                                 | Возможность трансформации энергии дефлегмации и дистилляции тепловым насосом.                             |
| 6 | Вакуум-выпарка                 | Нет эффективных способов утилизации энергии вторичного пара.                       | Возможность трансформации энергии вторичного пара тепловым насосом.                                       |
| 7 | Пастеризация                   | Нагрев продукта осуществляет парогенератор, а его охлаждение – холодильная машина. | Возможность замены парогенератора и холодильной машины тепловым насосом.                                  |

освоенные в энергетическом менеджменте [7], где учитывается расход энергии на единицу продукта (МДж/кг либо МДж/л и т.п.). Если сравниваются аппараты, использующие разные источники энергии, то можно посчитать энергетическую эффективность, выраженную приведенными материальными затратами. Известны подходы оценки эффективности сушилок параметром МДж на 1 кг испаренной влаги. Однако в случае, когда влага удаляется из объема продукта в виде тумана [7], такой КПД будет не корректным.

#### МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПИЩЕВЫМ СЫРЬЕМ

При взаимодействии пищевого сырья, которое, как правило, насыщено водой, с электромагнитным полем (ЭМП) возникает [9–15, 17–19] специфическое явление, название которому можно дать «механодиффузионный эффект при безградиентном волновом подводе электромагнитной энергии к полярным молекулам». Как видно на рис. 2, в результате генерации паровых пузырьков (2) в глубине микрокапилляра (1) повышается давление, возникает гидравлический поток, который увлекает с собой раствор из пограничного слоя (5), нерастворимые (3) и слаборастворимые (4) компоненты.

Таким образом, из капилляра (1) выходит диффузионный поток раствора, который дополняется потоком целого комплекса компонентов, в целом не характерных для классических

диффузионных процессов. Частота выбросов и число функционирующих капилляров растут с ростом  $N$  – мощности излучения. Массовый поток  $j_2$  определяется эффективным коэффициентом массоотдачи  $\beta_p$  и разностью давлений в капилляре  $P_k$  и в потоке  $P_e$ .

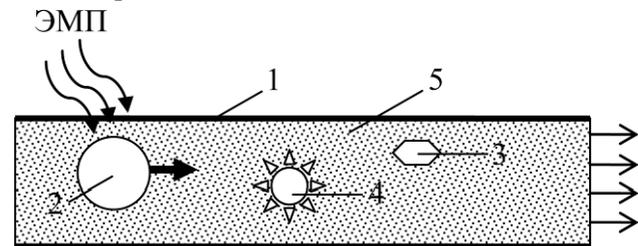


Рис. 2. Физическая схема взаимодействия пищевой системы и электромагнитного поля: 1 – стенка капилляра; 2 – паровой пузырек; 3 – нерастворимые в жидкости компоненты; 4 – слаборастворимые компоненты; 5 – диффузионный пограничный слой.

Поток  $j_2$  создается мощной гидродинамической движущей силой, он турбулизирует пограничный слой и может быть на несколько порядков больше классического диффузионного потока  $j_1$ . Возникает проблема отразить в классических уравнениях массопереноса влияние этого потока. На основе принципов теории подобия предложен новый безразмерный комплекс – число энергетического действия [7, 17], которое учитывает влияние электромагнитного поля (число  $Bu$ ). Это соотношение между энергией излучения и той энергией, которая необходима для аналогичных процессов в традиционных технологиях. Число  $Bu$  определяет как энергетическую эффективность оборудования, так и режим массопереноса. До опреде-

Таблица 2. Расчетные модели

| Процесс                                 | Число $Bu$                            | Модель процесса                    |
|---|---------------------------------------|------------------------------------|
| Активация и инактивация микроорганизмов | $Bu = N(\xi VC_p \Delta t \rho)^{-1}$ | $F_0 = A \cdot Re^n Pr^m Bu^k$     |
| Экстрагирование                         | $Bu = N(rwd^2 \rho)^{-1}$             | $Sh = A \cdot Re^n Sc^m Bu^k$      |
| Сушка                                   | $Bu = N(rV\rho)^{-1}$                 | $Sh = A \cdot Re^n Sc^m Pe^p Bu^k$ |

ленных значений числа  $Bu$  имеют место ламинарные режимы движения жидкости в капиллярных каналах твердой фазы. Число  $Bu$  может показывать условия перехода к более интенсивному массопереносу, который логично назвать режимом турбулентной бародиффузии [7]. В общем виде число энергетического действия характеризует соотношение расходов энергии инновационной технологии ( $Q$ ) и базового варианта (традиционной технологии):

$$Bu = Q/Q_0.$$

Для анализируемых процессов методами теории подобия определены структуры моделей в обобщенных переменных и соотношения для расчета числа  $Bu$  (табл. 2).

В соотношениях принято:  $F_0$ ,  $Sh$ ,  $Re$ ,  $Pr$ ,  $Sc$  – соответственно числа Фурье, Шервуда, Рейнольдса, Прандтля, Шмидта;  $N$  – мощность излучения;  $V$  – объемный расход удаляемой влаги;  $r$  – скрытая теплота фазового перехода;  $d$  – определяющий размер;  $\rho$  – плотность.

Сопротивление массопереносу бародиффузией может быть на несколько порядков ниже, чем в традиционных схемах массоотдачи [14].

Рассмотренные механизмы способны существенно интенсифицировать процессы активации сырья, активации и инактивации микроорганизмов [11, 14–16].

### ЭФФЕКТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СПОСОБОВ ПОДВОДА ЭНЕРГИИ

В разработанных инновационных электромагнитных теплотехнологиях сушки реализуется следующая гипотеза:

– применение при обезвоживании адресной доставки энергии непосредственно к влаге в объеме продукта позволит инициировать мощный гидродинамический поток, который возникает при взаимодействии электромагнитного поля с полярными молекулами влаги в капиллярах. Это приведет к удалению воды не только в паровой фазе, а и тумана, что существенно повысит интенсивность теплообмена за счет резкого снижения внутреннего диффузионного сопротивления, уменьшения энергетических затрат и времени процесса обезвоживания.

Эта гипотеза связана с радикально новыми способами организации процесса обезвоживания с привлечением принципов нанотехнологий для развития бародиффузионных процессов [7, 18, 19].

Последние годы характеризуются бурным развитием сушильной техники с электромагнитными источниками энергии (ЭИЭ) [8–9, 11–15]. Вместе с тем совершенствование разработок ведется на основе инженерной интуиции. Уровень понимания процессов взаимодействия продукта и электромагнитных волн значительно ниже представлений электрофизических явлений в генераторах электромагнитного излучения. Техника электромагнитных генераторов опередила теорию теплообмена в процессе сушки при электромагнитном подводе энергии. Если учесть, что прикладные проблемы даже традиционной сушки не доведены до общепризнанных инженерных методов проектирования, то специфика сушки при электромагнитном подводе энергии практически не изучена. Однако успешное моделирование процессов сушки с ЭИЭ может дать мощный импульс широкому внедрению перспективной техники в пищевые технологии.

Характерно, что в этих технологиях отличаются и линии сушки. Если в традиционных схемах сушки выражены периоды постоянной и падающей скоростей, то в инновационных сушилках микроволновая энергия обеспечивает постоянную подпитку влагой поверхность продукта за счет ламинарной бародиффузии (рис. 3а). Если реализуется режим турбулентной бародиффузии, то влага в виде тумана выбрасывается непосредственно в поток воздуха (рис. 3б). Парадоксально, но процесс обезвоживания протекает с нарастающей скоростью. Такие картины получены экспериментально [7, 19]. Наиболее низкие значения скорости сушки в первый период работы объясняются тем, что поверхностная влага блокирует процесс бародиффузии, которая начинает развиваться по мере удаления части поверхностной влаги.

Важную роль (рис. 4) играет и вид самой энергии: традиционная конвективная (КВ), инфракрасная (ИК) и микроволновая (МВ).

В традиционной конвективной схеме сушильный агент отдает энергию сначала поверхностной влаге (ПВ), затем сухой части продукта

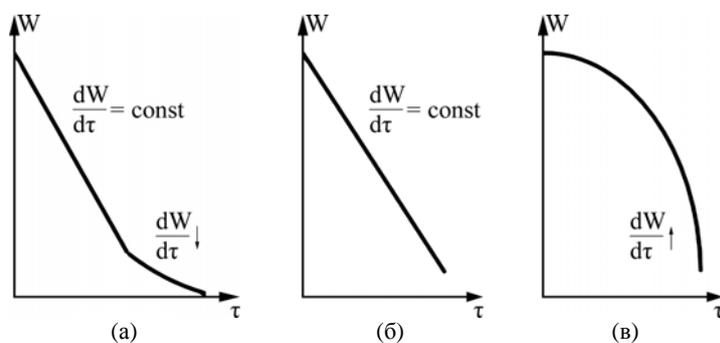


Рис. 3. Линии удаления влаги: (а) – традиционная сушка; (б) – ламинарная бародиффузия; (в) – турбулентная бародиффузия.

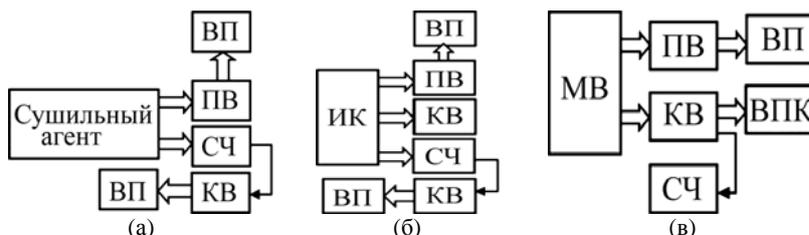


Рис. 4. Принципиальные схемы сушки: (а) – традиционная конвективная; (б) – инфракрасная; (в) – микроволновая.

(СЧ), которая передает энергию влаге в капиллярах (КВ). Так протекает традиционная конвективная сушка (рис. 4а), результатом которой считается поток влажного пара (ВП). В ИК сушке (рис. 4б) капиллярная влага удаляется частично непосредственно электромагнитной энергией, а частично так, как и в конвективной сушке.

В случае микроволновой (МВ) сушки (рис. 4в) из капилляров за счет бародиффузии может наблюдаться поток смеси влажного пара и капель воды (ВПК). Состав такой смеси и характеризует удельные затраты энергии на процесс обезвоживания. Чем больше доля капель – тем меньше затрат энергии.

В конвективной сушилке конверсия энергии выглядит так. Преобразование энергии в схеме «топливо – водяной пар» проходит при КПД 50%, а при КПД сушки в 40% полезная энергия составляет 8 МДж. Это эквивалентно 3 кг удаленной из продукта влаги. В предлагаемой сушилке с электромагнитным подводом энергии полученный результат (приведенный к первичному ресурсу, топливу) вдвое выше (табл. 3), а технически возможный уровень составляет 50 кг влаги.

Подробно конверсия энергии топлива в элементах сушильных установок поясняется схемами (рис. 5). Сравнение проводится для традиционной и микроволновой схем.

Электродиффузионные модели сушильных технологий [19] приведены в табл. 4.

В традиционной схеме (табл. 4, № 1) поток должен преодолеть внутридиффузионное ( $R_k$ ) и конвективное ( $R_c$ ) сопротивления от поверхности

продукта в окружающую среду. Результирующий диффузионный поток –  $J_d$ . В схеме с электромагнитными генераторами энергии возникает мощный бародиффузионный поток ( $J_b$ ), который преодолевает гидродинамическое сопротивление ( $R_b$ ). В случае ламинарной бародиффузии (табл. 4, № 2) поток доставляет компоненты к поверхности продукта, что обеспечивает стабильный массоперенос от поверхности ( $J_c$ ). При этом  $J_c > J_d$ . В случае турбулентной бародиффузии (табл. 4, № 3) поток ( $J_b$ ) способен доставлять компоненты прямо в среду, параллельно традиционному потоку  $J_d$ . При этом  $J_b \gg J_d$ .

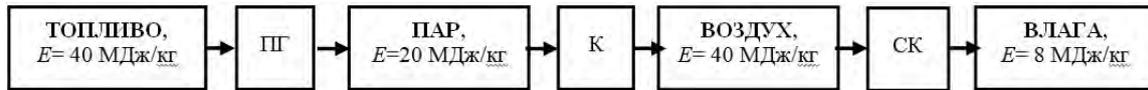
Условием функционирования бародиффузионного потока являются следующие факторы:

- наличие в объеме продукта жидкости с полярными молекулами;
- соответствие параметров электромагнитного поля решаемой задаче массопереноса;
- согласование структурных характеристик продукта с параметрами электромагнитной энергии.

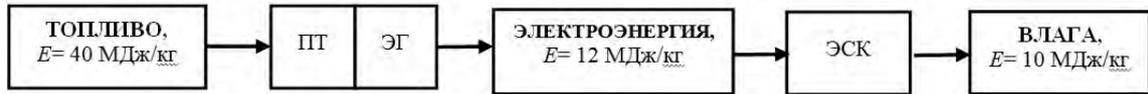
Применение технологий адресной доставки энергии при сушке сырья дает возможность значительно интенсифицировать процесс [18]. Из объема сырья выходит двухфазный поток в виде пара и мелкодисперсных капель воды. Поскольку традиционный тепловой КПД учитывает только выход пара, то предложен метод учета энергетической эффективности на основе числа  $Bu$  (табл. 2). Результаты сравнения разных вариантов сушки приведены в табл. 5. Базовый вариант (№ 1) – это традиционные конвективные сушилки, а конкретно для зерна – № 2. Модернизация сушилок термосифонной систе-

Таблица 3. Энергетика сушильных технологий

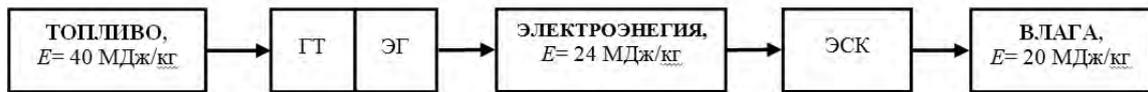
| Схема         | Энергия<br>1 кг топлива | Полезная<br>энергия | Количество<br>удаленной влаги |
|---------------|-------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Традиционная  | 40 МДж                  | 8 МДж               | 3 кг                          |
| Микроволновая | 40 МДж                  | 12–16 МДж           | 6 кг                          |



(а)



(б)



(в)

Рис. 5. Конверсия энергии в сушильных технологиях (все параметры приведены к 1 кг топлива): (а) – традиционные конвективные технологии; (б) – микроволновая сушка в схемах с паровой турбиной; (в) – микроволновая сушка в схеме с газовой турбиной. Условные обозначения: ПГ – парогенератор; К – паровой калорифер; СК – конвективная сушильная камера; ПТ – паровая турбина; ЭГ – электрогенератор; ГТ – газовая турбина; ЭСК – электромагнитная сушильная камера.

Таблица 4. Электродиффузионные модели сушильных технологий

| № | Схема массопереноса | Поля |   |
|---|---------------------|------|---|
|   |                     | P    | t |
| 1 |                     | ↓    | ↑ |
| 2 |                     | ↑    | ↑ |
| 3 |                     | ↑    | ↑ |

Таблица 5. Оценка энергетической эффективности сушильной техники

| №            | Конструкции сушилок                    | МДж/кг удаленной<br>влаги | Тепловой КПД, % | Число Вн  |
|--------------|--|---------------------------|-----------------|-----------|
| 1            | Базовые конвективные                   | 6,00–8,00                 | 0,30–0,38       | 2,60–3,50 |
| Зерносушилки |  |                           |                 |           |
| 2            | Базовые 1-го поколения                 | 4,26–6,30                 | 0,36–0,50       | 1,85–2,70 |
| 3            | Модернизированные<br>1-го поколения    | 3,80–5,10                 | 0,45–0,60       | 1,67–2,22 |
| 4            | Блочные 2-го поколения                 | 3,54                      | 0,65            | 1,54      |
| 5            | Рекуперативные<br>2-го поколения       | 2,70–2,88                 | 0,80–0,85       | 1,18–1,25 |
| 6            | 3-поколения<br>(достигнутый результат) | 1,90                      | –               | 0,82      |
| 7            | 3-поколения<br>(ожидаемый результат)   | 0,20                      | –               | 0,09      |

мой тепловой утилизации – № 3. Сушилки № 4 отличаются тем, что в зоне предварительного нагрева продукта осуществляется адресная доставка энергии к продукту с помощью испарительных термосифонов. В сушилках № 5 такая

адресная доставка энергии организована и в зоне сушки. Это серьезно снизило потери тепловой энергии с уходящими газами. Сушилки № 4 и № 5 рассматриваются как установки второго поколения.

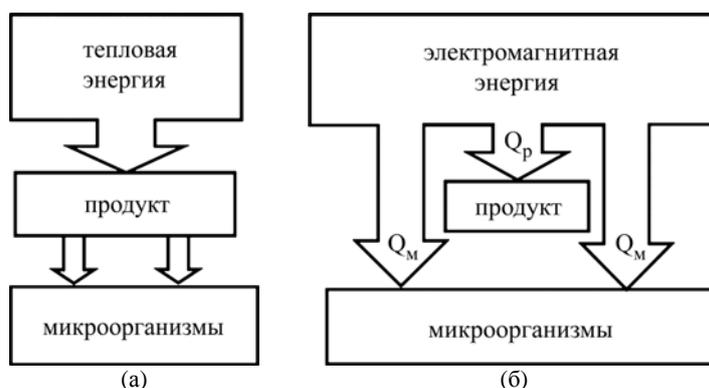


Рис. 6. Схемы подвода энергии: (а) – традиционная; (б) – микроволновой пастеризатор.

Сушилки третьего поколения № 6 и № 7, где энергия доставляется непосредственно к влаге в продукте, вообще не имеют общепринятого теплового КПД, а число  $Vi$  работает и отражает тенденции развития сушильной техники [7].

Число энергетического воздействия удачно обобщило базы экспериментальных данных в процессах инактивации, обезвоживания и экстрагирования [7–19]. Представляется, что число  $Vi$  может ответственно характеризовать энергетическую специфику всех задач, применяемых при адресной доставке энергии.

#### ИННОВАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ ПАСТЕРИЗАЦИИ

Технически задача пастеризации в традиционных технологиях решается путем нагрева до летальной температуры всего объема продукта (рис. 6). Если учесть, что допустимый объем микроорганизмов в пищевом сырье регламентируется (например, для молока второго сорта до  $40 \cdot 10^{-6}$  от общего объема), то энергия, которая расходуется непосредственно на микроорганизмы, не превышает четырех тысячных процента. Если учесть, что после пастеризации следует охлаждение с применением холодильных машин, то энергетический КПД снизится еще на порядок.

Выдвигается гипотеза, что при согласовании гидродинамических параметров обрабатываемой жидкости с характеристиками электромагнитного поля появляется возможность использовать отличия в электрофизических характеристиках микроорганизма и пищевого продукта, эффективно реализовать механизмы селективного (направленного) энергетического воздействия на микроорганизм и снизить уровень температур при обработке продукта [15, 16].

Ставится задача организовать параллельный подвод энергии к продукту ( $Q_p$ ) и к микроорганизму ( $Q_m$ ). В результате будут достигнуты более мягкие режимы термообработки, повы-

сится качество продукта и снизятся затраты энергии (рис. 6).

С повышением доли  $Q_m$  сокращается величина  $Q_p$  и уменьшаются общие затраты энергии на процесс пастеризации. Снижаются температуры продукта, что сохраняет функциональные свойства пищевого сырья. При этом появляется возможность существенного повышения энергетического КПД процесса пастеризации.

При микроволновой пастеризации важное значение имеют гидродинамические параметры потока. Рассмотрим условия обработки микроорганизмов электромагнитным полем (рис. 7). Эффект избирательного обогрева в большей степени проявляется для микроорганизма, расположенного на поверхности продукта. Для микроорганизма, который расположен в глубине, линии тока больше искривлены, что приводит к большей диссипации энергии. Поэтому проведены эксперименты по определению влияния толщины слоя продукта (рис. 7). Опыты проводились при частоте магнетрона 2,2 ГГц.

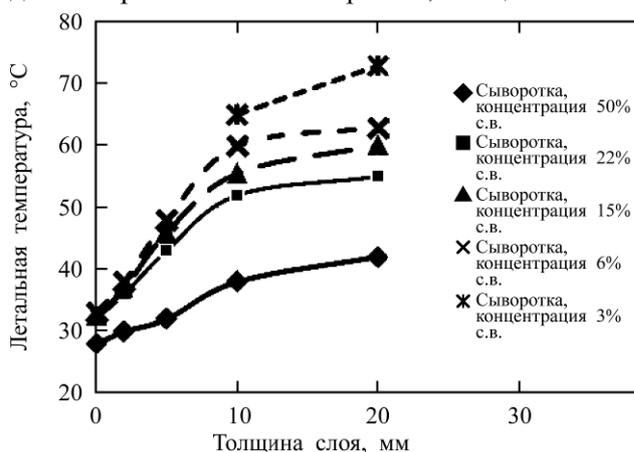


Рис. 7. Механизм процесса микроволновой обработки продукта.

Установлено, что зависимость летальной температуры микроорганизмов от толщины слоя продукта имеет нелинейный характер (рис. 7). Причем наиболее существенное влияние характерно для микроразмерных слоев. Более того, если при толщине слоя 20 мм летальные



Рис. 8. Конструкции пастеризационных модулей.

Таблица 6. Результаты испытаний микроволнового пастеризатора

| Расход, мл/с | Время выхода на режим, мин | 32°C | 34°C | 36°C | 38°C | 40°C |
|--------------|----------------------------|------|------|------|------|------|
| 0,6          | 14                         | 5    | 10   | 25   | 80   | 100  |
| 0,4          | 17                         | 33   | 85   | 100  |      |      |
| 0,3          | 18                         | 50   | 90   | 100  |      |      |

Таблица 7. Технические характеристики микроволнового пастеризатора

| Параметр              | Традиционный подход | Микроволновой пастеризатор, результат достигнутый/ожидаемый |
|-----------------------|---------------------|---|
| Энергоемкость, МДж/кг | 0,2                 | 0,02/2*10 <sup>-5</sup>                                     |
| Температура, °С       | 80–100              | 30/10–20  |
| КПД, %                | 0,004               | 0,04/20–40  |

температуры в разы отличались для продукта с разной концентрацией воды, то при толщине до 1,5 мм эта зависимость нивелируется (рис. 7). Поэтому модули для опытного образца электрофизического пастеризатора были выполнены с рабочим зазором между радиопрозрачными пластинами, равным 0,75–2 мм (рис. 8).

Разработанные модули (рис. 8) прошли испытания в составе микроволнового пастеризатора. Опыты проводились с виноматериалом, степень инактивации микроорганизмов определялась в заводской лаборатории общепринятыми методами. Процент инактивированных микроорганизмов определяется расходом продукта и температурным режимом (табл. 6).

Результаты испытаний (табл. 6) показали, что при правильном согласовании мощности электромагнитного поля, конструкции модуля и режима течения продукта уровень температур его обработки снижается на 50°–55°С. Видно, что уже при температуре 36°С прошла полная инактивация микроорганизмов в потоке (табл. 6). При этом продукт полностью сохранил свою пищевую ценность. Кроме того, на порядок снижены энергетические затраты (табл. 7).

## ВЫВОДЫ

Электромагнитное поле может инициировать возникновение гидродинамического потока из межклеточного пространства пищевого сырья. Этот гидравлический поток – бародиффузия, его движущей силой является разность давлений

внутри объема сырья и окружающей среды. Бародиффузия работает параллельно с классическим диффузионным потоком, но ее мощность может на порядки превышать традиционные. Для инициирования бародиффузии требуется четкое согласование структурных характеристик сырья, особенностей жидкой фазы и параметров электромагнитного поля. В зависимости от такого согласования может развиваться ламинарная или турбулентная бародиффузия. 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.).

Механизм селективного подвода энергии в системе «раствор – микроорганизмы» может использоваться как инструмент управления процессом развития микроорганизмов. Существует некоторая критическая плотность потока электромагнитной энергии, приближение к которой активирует рост микроорганизмов, а превышение приводит к их инактивации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Lin S., Yip N.Y., Cath T.Y., Osuji C.O. et al. *Environ Sci Technol.* 2014, **48**(9), 5306–5313. DOI: 10.1021/es405173b
2. Rosenberg E., Lind A., Aamodt Espegren K. *Energy.* 2013, **61**, 419–431.
3. Cheilari A., Guillen J., Damalas D., Barbas T. *Mar Policy.* 2013, **40**, 18–24.

4. Barney G.O. *The Global 2000 Report to the President of the U.S. entering 21<sup>st</sup> century*. Pentagon press. 1980. 17 p.
5. Saha M., Darnton G. *Business and Society Review*. 2005, **110**(2), 117–157. DOI: 10.1111/j.0045-3609.2004.00007.x
6. Turner G.M. *Global Environ Chang*. 2008, **18**(3), 397–411.
7. Бурдо О.Г. *Пищевые нанотехнологии*. Херсон: Гринь Д.С. 2013. 294 с.
8. Datta A.K., Anantheswaran R.C. *Handbook of Microwave Technology for Applications*. Marcel Dekker, Inc., 2001. 511 p.
9. Lopez-Avila V., Young R. *Anal Chem*. 1994, **66**, 1097–1106.
10. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Бандура В.Н., Яровой И.И. *Тезисы докладов и сообщений, XV Минский международный форум по тепло- и массообмену*, 23–26 мая, 2016, **2**, С. 224–228.
11. Chan C.H. *Water Environ Res*. 2015, **88**(10), 1192–1229. DOI:10.1016/j.seppur.2015.01.041
12. Flyrez N. *J Chem Technol Biot*. 2015, **90**(4), 590–607. DOI 10.1002/jctb.4519.
13. Microwave-assisted Extraction for Bioactive Compounds Theory and Practice. Chemat Farid, Cravotto Giancarlo (Eds.) *Food Engineering Series*. 2013, 238 p.
14. Lebovka N., Vorobiev E., Chemat F. *Enhancing Extraction Processes in the Food Industry*. Taylor & Francis Group, LLC CRC, 2012, 518.
15. Ojha S.C. *Anaerobe*. 2016, **38**, 14–20. DOI: 10.1016/j.anaerobe.2015.10.015
16. Бурдо О.Г., Рыбина О.Б. *Процессы инактивации микроорганизмов в микроволновом поле*. Одесса: Полиграф, 2010. 200 с.
17. Burdo O.G. *J Eng Phys Thermophys*. 2005, **78**(1), 90–96.
18. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Левтринская Ю.О. *Проблемы региональной энергетики*. 2015, (3), 112–118.
19. Burdo O.G., Zycov A.V., Terziev S.G., Ruzhitskaya N.V. *J Eng Res Appl*. 2016, **6**(3), 144–150.

Поступила 07.07.16  
После доработки 07.10.16

### Summary

In the paper we emphasize that the main problems in human development (energy, ecology, food), in the first place, are typical for the food production sector and their solutions are connected with searching for fundamentally new approaches at the thermal processing of raw materials. Prospects of electro-technologies of the targeted energy delivery to single elements of food raw materials are substantiated. Hypotheses for the energy effective processes of dehydration, extraction and inactivation of microorganisms are formulated. On the base of the literature sources analyses and our study of the electromagnetic field interaction with food raw materials, the dimensionless complex – the number of energy action is offered. That number is used for the evaluation of mass-transfer processes energy and its kinetics. The modeling results of analytical and experimental processes for drying and pasteurization processes are represented. The steps of energy conversion in drying technologies are considered.

*Keywords: food raw materials, electromagnetic field, drying, pasteurization, energy capacity, energy efficiency.*