

Бурдо О.Г., Ряшко Г.М., Светличный П.И.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПИЩЕВЫХ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

В индустриально развитых странах потребление энергии одним жителем достигло 280 ГДж в год. Стремительный рост энергопотребления при серьезном снижении запасов топлива может привести к глобальной катастрофе, если не изменить отношение к наиболее дефицитному ресурсу на Земле – к энергии.

Серьезной проблемой во всех индустриально развитых странах является энергообеспечение пищевых технологий. Особенно актуальна эта проблема для Украины, где сфера АПК требует до 20 % общего расхода энергоресурсов. Поэтому дефицит энергии, высокая стоимость топлива требует серьезного подхода и оперативного решения задачи. Более того, энергетическое воздействие на продукт приводит часто к потере витаминов, денатурации белков, инактивации ферментов и другим нежелательным структурным изменениям продукта. Как правило, организация термообработки сырья при более низком уровне энергетических воздействий дает двойной эффект: снижается количество потребляемой энергии и повышается качество готового продукта. А в результате – получение более дорогого продукта при снижении затрат на его производство. Комплексное решение этих проблем возможно при внедрении на пищевых производствах нанотехнологий [1].

Влияние нанотехнологий на современную жизнь человека можно сравнить с влиянием цифровых технологий. Прогнозируется, что использование нанотехнологий станет основой для принципиально новых технологических процессов, а оборот глобального рынка нанопродуктов в 2010 г. составит 145...900 млрд. амер. долл. При использовании нанотехнологий в пищевой промышленности становится возможным не только снижение стоимости производства, но и получение принципиально новых продуктов с существенно повышенной пищевой ценностью, не имеющих аналогов в современном производстве. Используя позицию энергоэффективности можно провести анализ процессов пищевого производства.

Пастеризация. Суть этого процесса состоит в угнетении деятельности микроорганизмов, что достигается обычно путем повышения температуры всего объема продукта до летального уровня. Если учесть соотношение энергии, которую необходимо подвести непосредственно к микроорганизмам, к общим затратам энергии, то обнаружится, что КПД процесса не превышает 4 тысячных процента. Альтернативой в данном случае может выступить низкотемпературная пастеризация, которая существенно повысит пищевую ценность продукта и снизит энергозатраты.

Концентрирование. Ежегодно в развитых странах на предприятиях пищевой промышленности выпаривается до 100 млрд. кг воды из сахарного сиропа, соков, молока, экстрактов и т.п., на что расходуется $3 \cdot 10^{11}$ МДж энергии. Более того, термические методы удаления воды (выпаривание) снижают качественные показатели продукта: появляется привкус варки, теряются витамины, происходит денатурация белка, ухудшается аромат и цвет. Однако внедрение низкотемпературных технологий концентрирования осуществляется довольно медленно, не смотря ни на их энергоэффективность, ни на высокое качество получаемых криоконцентратов.

Экстрагирование. Процесс определяет степень извлечения ценных компонентов из сырья и качество готового продукта при производстве сахара, растительного

масла, растворимых кофе и чая, ликероводочных изделий, пищевых красителей и др., а также в фармацевтической промышленности. Это трудоемкий и низкоэффективный процесс, так, например, в коньячном производстве массоперенос растворимых веществ из древесины длится годами. Усовершенствование процесса позволит комплексно решить проблемы как энергоэффективности, так и ресурсосбережения.

Сушка. Сушка является заключительной стадией многих пищевых производств, она в значительной степени определяет как качество готового продукта, так и энергоемкость всей технологии [2]. Процесс в наиболее распространенной конвективной сушке растительного сырья характеризуется противоположным направлением градиентов температур и влагосодержаний в продукте. С этим связан целый ряд нерешенных проблем, характерных для традиционной конвективной сушки, основные из которых значительная продолжительность процесса и неоправданно высокие удельные затраты энергии, превышающие значения теплоты фазового перехода для воды в 2...4 раза.

В таблице 1 сведены параметры энергоемкости ключевых процессов пищевых технологий. Оценка проведена без учета традиционных для предприятий Украины прямых потерь и общезаводских затрат энергии.

Таблица 1 – Энергоемкость пищевых технологий в Украине

| Технологии | Единицы измерения | Традиционные технологии | | | Новые неэнергоемкие технологии | |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------|
| | | Современный уровень | Физически достижимая граница | Технически целесообразная граница | Микротехнология | Нанотехнологии |
| Пастеризация | МДж/кг продукта | 0,2 | 0,05 | 0,1...0,15 | 0,08 | 0,01 |
| Сушка | МДж/кг испаренной влаги | 4...6 | 2,5 | 3...3,5 | 1 | 0,15 |
| Концентрирование растворов | МДж/кг извлеченной воды | 1,5...3 | 0,4 | 0,8...1,2 | 0,15 | 0,01 |
| Экстрагирование | МДж/кг экстракта | 0,15...0,25 | 0,01 | 0,1 | 0,05 | 0,02 |

Моделирование энергетики наномасштабных процессов. Смена традиционных подходов, ориентация на высокие технологии позволяет прогнозировать новые принципы организации процессов, в основе которых лежит их комбинированное прохождение [3]. Это пищевые нанотехнологии, поскольку воздействие осуществляется на наномасштабном уровне: на оболочках клетки, микроорганизма, поры.

Жидкие пищевые системы (суспензии, аэрозоли и т.п.) специфичны. Наличие в системе клеточно-волокнутой структуры не учитывается феноменологическим подходом, который сводится к анализу непрерывной системы. Поскольку, содержимое клеток является главной целью технологии, то модель должна отражать кинетику переноса на границе клетки и среды, внутри поры, капилляра. Поэтому подход к моделированию комбинированных процессов в пищевых системах должен предусматривать и комбинированные приемы при системном анализе.

Рассмотрим моделирование наномасштабного процесса на примере экстрагирования из капиллярно-пористого сырья с комбинированным электрофизическим воздей-

ствием на процесс. Механизм комбинированного процесса массопереноса экстрактивных веществ из волокнистой структуры в раствор поясняется электродиффузионной моделью [4]. Диффузия в твердой фазе определяется по закону Фика. Жидкая фаза капилляра по его радиусу имеет одинаковую концентрацию, и растворимые вещества движутся в середине капилляров к поверхности капиллярно-пористых частиц.

Одновременно с этим потоком за счет электромагнитного поля возникает другой поток. Энергия, концентрируясь в жидкой фазе капилляров твердого тела, вызывает её закипание, что ведет к образованию паровых пузырьков и возникновению градиента давления, благодаря чему жидкость из капилляра периодически выбрасывается в поток. По сути, это бародиффузия, которая определяется давлением, растущим в капиллярах. Частота выбросов и число функционирующих капилляров растет пропорционально мощности электрофизического воздействия. Предлагается аналогия с центрами парообразования, поток, возникающий под действием электромагнитного поля, турбулизирован пограничный слой, вследствие чего сопротивление массопереносу бародиффузией может быть на порядки ниже, чем в традиционных схемах массоотдачи.

В одномерной записи вдоль оси x дифференциальное уравнение массопереноса имеет вид:

$$\frac{dC}{d\tau} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial C}{\partial x} w_x. \quad (1)$$

Поле концентраций (C) определяется суммарным действием микрокинетики (первое слагаемое) и макрокинетики (второе слагаемое). Рассмотрим задачу диффузии в капилляре тела в процессе экстрагирования. Перемещение экстрактивных веществ внутри капилляра к поверхности тела определяется градиентом концентрации по оси x и величиной коэффициента диффузии (D). Подъем температуры процесса несколько увеличивает значение коэффициента диффузии, однако, стесненность в условиях капилляра не дает ощутимой интенсификации процесса. Более того, уровень температуры является противоречивым фактором, т.к. требования к качеству продукта диктуют целесообразность её снижения. Но, в соотношении (1) есть еще одно слагаемое, которое учитывает конвективный перенос в капилляре за счет перемещения раствора со скоростью w_x . Возникает вопрос, нельзя ли организовать это движение?

В такой постановке задача сводится к двум: гидравлической (по оценке гидравлического сопротивления капилляра) и термодинамической (по определению энергии, которая требуется для преодоления этого сопротивления). Выполним оценку с этих позиций требуемой работы разделения. Расчет проведем для капиллярного канала растительного сырья. Примем диаметр капилляра равным 0,2 мм, а его длину – 4 мм.

Произведение гидравлического сопротивления такого канала (ΔP) на величину перемещаемого объема жидкости даст необходимую для реализации процесса энергию. Это количество энергии, которое необходимо при механическом воздействии на жидкость в капилляре, т.е. для фильтрационного процесса. Для инициирования бародиффузии при энергетическом воздействии требуется преодолеть сопротивление канала за счет перехода части жидкости в паровую фазу, поэтому следует определить термодинамические параметры пароводяной смеси в канале при начальном давлении (P_1) и давлении, которое обеспечивает бародиффузию $P_2 = P_1 + \Delta P$.

Изменение состояния пароводяной смеси в канале происходит при постоянном объеме, поэтому необходимое для достижения давления P_2 количество теплоты составит:

$$Q = M \left[(i_2 - P_2 v_{\tilde{n}2}) - (i_1 - P_1 v_{\tilde{n}1}) \right], \quad (2)$$

где Q – тепловой поток; M – массовый поток; i_1 – энтальпия начальная; i_2 – энтальпия конечная; v_{CM} – удельный объем смеси в канале.

В свою очередь v_{CM} определяется в зависимости от значений удельных объемов, соответственно, жидкой и паровой фаз и степени сухости пара. В результате подвода энергии энтальпия жидкости в канале растет от i_1 до i_2 . При этом:

$$i_1 = i'_1 + r_1 \cdot x_1, \quad i_2 = i'_2 + r_2 \cdot \frac{v''_m - v'_2}{v_2 - v'_2}, \quad (3)$$

где v' , v'' – удельный объем жидкой и паровой фаз соответственно; x – степень сухости пара, r – теплота фазового перехода.

Для выбранных значений диаметра и длины капилляра определяющее влияние оказывает кинетический напор. При $w < 1$ его вклад составляет до 95 %, а значение ΔP находится в пределах 20 кПа. При этом значении w для механического извлечения жидкости из капиллярных каналов принятых размеров (т.е. для организации процесса фильтрования) необходимо энергии $E = 20$ Дж/кг, а для извлечения жидкости за счет фазового преобразования части жидкости в пар – $Q = 85$ кДж/кг.

Аналитическое построение математической модели такого комбинированного процесса, даже при значительных упрощениях, практически невозможно [5], поскольку гидродинамическая ситуация в потоке определяется турбулентным течением экстрагента, осложненным вихревой диффузией из каналов частиц, импульсным характером поля, определяющим число и производительность центров точечного массообмена.

Поэтому для получения математической модели процесса предлагается использовать путь экспериментального моделирования, основанного на теории подобия с использованием метода “размерностей”. Благодаря использованию такого подхода был установлен общий вид уравнения в обобщенных переменных для расчета коэффициента массоотдачи при комбинированном протекании процессов экстрагирования через числа подобия Шервуда (Sh), Рейнольдса (Re), Шмидта (Sc) и экспериментально определяемые константы (A, k, n, g): $Sh = A \cdot (Re)^n \cdot (Sc)^k \cdot (Bu)^g$.

Для экспериментального определения коэффициента массообмена в случае извлечения экстрактивных веществ из кофейного зерна при комбинированном процессе экстрагирования исследовалась эффективность процесса от гидромодульного соотношения, размера частиц сырья, мощности импульсного электромагнитного поля, температуры экстрагента и др.

Получены результаты исследований, которые позволяют сделать вывод, что влияние импульсного электромагнитного воздействия повышает общий выход экстрактивных веществ на 30 %, а увеличение объемного расхода экстрагента в 3 раза позволяет увеличить этот же показатель на 45-50 % [5]. После обработки результатов было установлено, что показатель степени при числе Re составляет 0,48.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют об эффективности использования принципа проведения процесса экстрагирования в комбинации с электрофизическим влиянием.

Перспективным является разработка соответствующих технических решений для реализации комбинированных наномасштабных процессов, безусловно, различных для экстракторов, сушилок и других аппаратов. Проведем оценку эффективности некоторых новых принципов (табл. 2).

Таблица 2 – Энергетический эффект нанотехнологий

| Технологический процесс | Механизм | Эффект |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Низкотемпературная пастеризация | Селективное действие на микроорганизм | Повышение энергетической эффективности в 10^3 раз |
| Энергоэффективная сушка | Объемный подвод энергии, инициирование бародиффузии | Снижение расхода энергии в 40...50 раз |
| Кондуктивно-конвективная сушка зерна | Локальный теплоподвод к слою зерна, глубокая рециркуляция теплоносителя, теплоутилизация | Снижение расхода топлива на 18...40% |
| Криоконцентрирование растворов | Перевод воды в твердую фазу, рециклинг льда | Снижение расхода энергии в 2...5 раз |
| Термообработка вязких продуктов | Механо-термическое воздействие на пограничный слой | Интенсификация процесса в 2...20 раз |
| Экстрагирование с электромагнитным интенсификатором | Объемный подвод энергии, инициирование бародиффузии | Интенсификация массопереноса в $5...10^3$ раз |

Выводы. Комбинированные процессы открывают новые возможности при управлении изменениями структуры продукта, снижения энергоемкости производства и организации принципиально новых пищевых нанотехнологий. Комплекс выполненных исследований и производственных испытаний подтверждает сформулированные выше механизмы и гипотезы.

Литература

1. Бурдо О.Г. Наномасштабные эффекты в пищевых технологиях // Инженерно-физический журнал. – 2005. – январь-февраль, том 78, №1, С. 88-93
2. Burdo O.G., Terziev S.G., Zykov A.V. Optimization of Heat Pipes and Mass Recovery // 5-th Int. Seminar “Heat Pipe, Heat Pumps, Refrigerators”, 8-11 September, 2003. – Minsk, Belarus. – P. 161-166.
3. Бурдо О.Г. Ефекти харчових нанотехнологій // Удосконалення існуючих та розробка нових технологій для харчової та зернопереробної промисловості. – Наук. праці Од. держ. акад. харчових технологій. – Одеса: 2003. – Вип.20. – С. 203-209.
4. Терзиев В., Осадчук П., Бурдо О. Интенсификация экстрагирования у харчових технологіях // Харчова і переробна промисловість. – 1999. – №9. – С. 30-31.
5. Бурдо О.Г., Ряшко Г.М., Войтенко А.К., Саламаха В.И. Моделирование процессов экстрагирования // Холодильная техника и технология. – Одесса: 2004. – № 6. – С. 69-74.

УДК 663.243

Бурдо О.Г., Ряшко Г.М., Светлічний П.І.

ЕНЕРГЕТИЧНІ АСПЕКТИ ХАРЧОВИХ НАНОТЕХНОЛОГІЙ

Розглянуто перспективи впровадження нанотехнологій у харчовому виробництві. Виконано аналіз нанопроцесів під час пастеризації, сушіння, екстрагування, концентрування сировини. Проведено оцінку енергетичних витрат при поступовому впровадженні нанотехнологій й в різних галузях.