

УДК 637.133.4.001.76

Бурдо О.Г., Рыбина О.Б., Сталымбовская А.С.

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПИЩЕВЫХ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Мир ожидает новый бум, имя которого – нанотехнологии. Лидерами в нанонауках в конце прошлого столетия были Япония и Израиль. Однако, с 1997 г. к ним с серьезным размахом присоединились США. И, несмотря на серьезные трудности в понимании, измерении, моделировании нанопроцессов, нанонауки мгновенно стали привлекательными для промышленников. Появился уже нанобизнес, формируется рынок нанопродуктов. Динамично растет финансирование нанонаук. Нанотехнологии открывают новые возможности, переворачивают современные представления в сфере электроники, медицины, энергетики, биотехнологии, экологии, материаловедения. Даже проблемы обороны и бытовой техники развиваются по пути нанотехнологий. Нанонауки обещают революционные изменения в технологических методах, поэтому можно прогнозировать острую конкуренцию на уровнях как науки, так и техники, бизнеса. Подтверждением этого факта является устойчивый рост финансирования нанонаук в США (рис. 1).

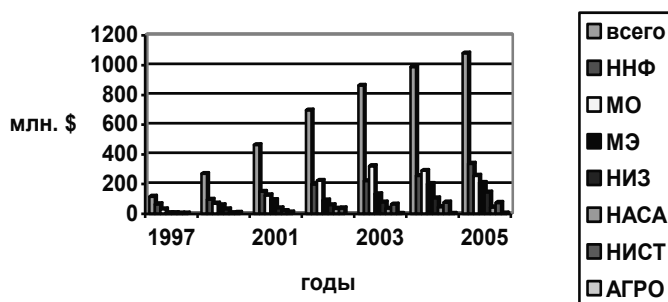


Рисунок 1 – Динамика бюджетного финансирования в США

Из диаграммы видно, что в первые годы нанонауки финансировались практически только Национальным научным фондом (ННФ), министерствами обороны (МО) и энергетики (МЭ). В последние годы финансировать нанонауки начали Национальный институт здоровья (НИЗ), космическое агентство (НАСА), Национальный институт стандартов и технологий (НИСТ), Агентство экологии, аграрное ведомство и пр. Таким образом, достижения нанонаук определили перспективы нанотехнологий, что привлекло нанобизнес. Все это поясняет щедрые инвестиции в исследования по проблеме.

В пищевых производствах задачами нанотехнологий является воздействие на естественные наномасштабные объекты [1]. В качестве примеров рассмотрим возможности нанотехнологий в высокотемпературном процессе пиролиза древесины и в низкотемпературных процессах стерилизации пищевых продуктов.

Сухая перегонка древесины (пиролиз) – это термическое разложение древесины без доступа кислорода. В результате этого процесса получают твердые, жидкие и газообразные продукты. Твердым продуктом пиролиза является древесный уголь, остающийся в камере сгорания в виде твердого остатка после завершения процесса пиролиза древесины. Жидкие и газообразные продукты выделяются совместно в виде сложной парогазовой смеси, который при последующем охлаждении разделяется на жидкий дистиллят и неконденсируемые газы.

Перспектива развития нанотехнологий позволяет рассмотреть процесс пиролиза древесины на разных стадиях:

Стадия пиролиза	Температура, °С	Выделяющиеся продукты
1. Сушка	120–150	вода
2. Начало разложения	150–275	СО, СО <sub>2</sub> , уксусная кислота, др.
3. Образование и испарение основного количества продуктов разложения древесины	275–450	СО, СО <sub>2</sub> , СН <sub>4</sub> , эфиры, карбонильные соединения, углеводороды, уксусная кислота, метанол, смола
4. Прокаливание древесного остатка	450–550	тяжелая смола, СО <sub>2</sub> , СО, Н <sub>2</sub> , углеводороды

Состав и количество продуктов термического разложения зависят от температуры, продолжительности процесса, метода нагрева древесины и породы древесины. Химизм и механизм процесса пиролиза до сих пор полностью не изучен, для полного анализа процесса необходимы новые методы исследования представленные высокими технологиями, а именно нанотехнологиями.

Тепловая обработка продукта в целях уничтожения в нем болезнетворных микроорганизмов и снижения общего их количества является обязательной операцией в технологиях консервирования. Как правило, ограничиваются задачами пастеризации, но и при стерилизации ставят задачу уничтожения только тех микроорганизмов, которые способны развиваться в продукте. В настоящее время строгой теории стерилизации нет, поэтому в основе разработки режимов стерилизации лежат результаты экспериментальных исследований. Принято, технологическими параметрами процесса стерилизации считать летальную температуру ( $t_l$ ), текущее время ( $\tau$ ), начальную обсемененность продукта ( $Nm_0$ ). Обсемененность в момент времени  $\tau$  ( $Nm$ ) определяется с помощью показателя летального времени ( $D_t$ ), которое отражает время, необходимое для уменьшения количества микроорганизмов в 10 раз от первоначального уровня при постоянстве температуры процесса ( $t = const$ ):  $\log(Nm_0 / Nm) = \tau / (D_t)$  [2].

Известно, что  $\log Nm$  уменьшается со временем по линейному закону, линейной является и зависимость  $\log(D_t)$  от  $t_l$ . Установлен характер влияния рН среды, наличия жиров, белков и специй на значение ( $D_t$ ). Далее модель строилась на знании величины ( $D_t$ ). Тогда вышеприведенное соотношение представляется в виде:

$$\log \tau = \log D_t + \log \log(Nm_0 / Nm) \quad (1)$$

Технически задача решается нагревом до уровня летальной температуры всей массы продукта (рис. 2а).

Если учесть соотношение энергии, которое необходимо подвести непосредственно к микроорганизмам ( $Q_M$ ), с общими затратами энергии ( $Q_C$ ), то получится, что энергетический КПД процесса пастеризации не превышает 4 тысячных процента. Если учесть, что после пастеризации следует, как правило, охлаждение с применением холодильных машин, то КПД снизится еще на порядок.

Снизить затраты энергии на процесс стерилизации можно за счет того, что диэлектрические характеристики продукта и микроорганизма отличаются. Применяв электромагнитный подвод энергии, можно осуществить непосредственное воздействие на микроорганизм. Схема такого энергоподвода представлена на рис. 2б. В этом случае, суммарный расход энергии складывается из энергии подведенной к самому продукту ( $Q_{II}$ ) и к микроорганизмам:  $Q_C = Q_{II} + Q_M$ . Рост КПД системы связан с организацией распределения потоков, причем со снижением  $Q_{II}$  и увеличением  $Q_M$ . Задачей новой технологии является повышение доли  $Q_M$ .

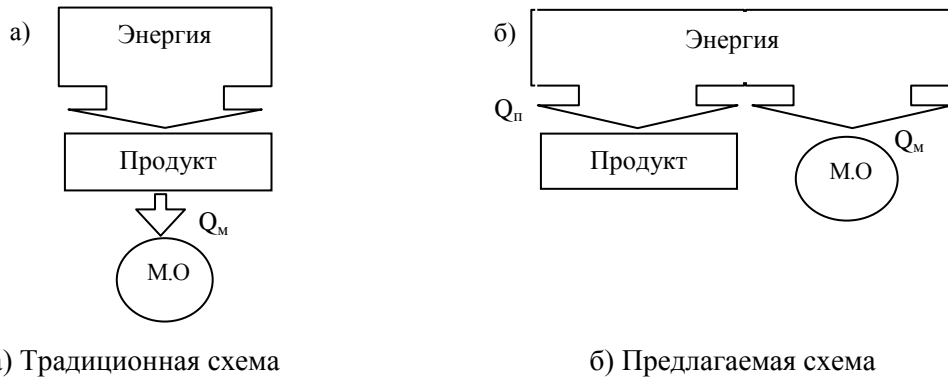


Рисунок 2 – Схема энергоподвода при стерилизации

Для моделирования процесса селективного действия определяем следующие дифференциальные уравнения для температурных полей:

Для включений интегрируем:

$$\alpha_1^2 \frac{\partial t_1}{\partial t} = \frac{\partial^2 t_1}{\partial r^2} + \frac{2\partial t_1}{r\partial t} + \frac{q_{v1}}{\lambda_1}, \text{ при } 0 \leq r \leq R; \quad (2)$$

для среды

$$\alpha_2^2 \frac{\partial t_2}{\partial t} = \frac{\partial^2 t_2}{\partial r^2} + \frac{2\partial t_2}{r\partial t} + \frac{q_{v2}}{\lambda_2} \text{ при } R < r, \quad (3)$$

где  $R$  – радиус включения,  $t_1, t_2$  – температура,  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты температуропроводности,  $\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности,  $q_{v1}$  и  $q_{v2}$  – удельные тепловые мощности (индекс «1» относится к включению, а индекс «2» – к среде).

Начальные условия для этих уравнений

$$t_1(r, 0) = t_0 \text{ при } 0 \leq r \leq R; \quad t_2(r, 0) = t_0 \text{ при } R < r, \quad (4)$$

На границе между включениями и средой должны выполняться граничные условия четвертого рода

$$t_1(R, \tau) = t_2(R, \tau) \text{ при } \tau \geq 0; \quad (5)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial r}. \quad (6)$$

В общем случае решение записанных уравнений довольно громоздко.

При любых длительностях импульса уравнения (2)–(5) дают следующее решение:

$$\frac{\theta}{\theta_{ad}} = \frac{1}{4Fo} \left[ 2 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{1}{2\sqrt{Fo}} \right) + 4Fo \left( \operatorname{erf} \left( \frac{1}{2\sqrt{Fo}} \right) - \frac{2}{\sqrt{\pi Fo}} \exp \left( -\frac{1}{4Fo} \right) \right) \right) \right], \quad (7)$$

Однако в случае, когда теплообменом между микроорганизмами и средой можно пренебречь (это, в частности имеет место, когда электромагнитная энергия подается

в форме коротких импульсов), решение вышеприведенных уравнений принимает следующий простой вид

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0 = \frac{q_{v1}}{c_1 \rho_1} \tau \quad \text{и} \quad \Delta t_2 = t_2 - t_0 = \frac{q_{v2}}{c_2 \rho_2} \tau, \quad (8)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – удельные массовые теплоемкости,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотности.

Удельная тепловая мощность  $q_v$  (мощность, выделяющаяся в единице объема) выражается формулой

$$q_v = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2, \quad (9)$$

где  $f$  – частота,  $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная,  $\varepsilon''$  – коэффициент потерь (мнимая составляющая диэлектрической постоянной),  $E$  – напряженность электрического поля.

Между напряженностями электрического поля включения и среды существует прямая пропорциональная зависимость  $E_1 = \gamma E_2$ .

Коэффициент  $\gamma$  для включений сферической формы записывается так

$$\gamma = \frac{3\varepsilon_2'}{\varepsilon_1' - 2\varepsilon_2'}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon_1'$  и  $\varepsilon_2''$  – действительная составляющая диэлектрических проницаемостей. Из формул (8) и (9) следует

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{\gamma^2 \varepsilon_1'' c_2 \rho_2}{\varepsilon_2'' c_1 \rho_1}, \quad (11)$$

В качестве примера оценим величину  $\Delta t_1 / \Delta t_2$  для электромагнитной обработки молока, содержащего в качестве включений клетки дрожжей. Для дрожжей:  $\varepsilon_1' = 60$ ;  $\varepsilon_1'' = 17,5$ ,  $c_1$  и  $\rho_1$  примем равными соответствующим параметрам воды  $c_1 = 4200$  Дж/кг·К;  $\rho_1 = 103$  кг/м. Для молока:  $\varepsilon_1' = 60$ ;  $\varepsilon_1'' = 7$ ;  $c_1 = 4000$  Дж/кг·К;  $\rho_1 = 1,032 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

По приведенным значениям констант вычисляем  $\gamma = 1$  и  $\Delta t_1 / \Delta t_2 \approx 2,5$ .

В рассматриваемом случае (отсутствует теплообмен между включениями и средой) избирательный нагрев проявляется в максимальной степени. Полученные цифры показывают, что при этом условии увеличение температуры внутри дрожжевой клетки в 2,5 раза больше, чем увеличение температуры в окружающей среде – молоке.

Оценки по отношению (11) удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. В качестве модельной среды использовались молочная и казеиновая сыворотки с микроорганизмами *Saccharomyces cerevisiae*. Выбор был обусловлен возможностью использования простого экспресс – метода для исследования.

В пищевые среды вводились дрожжи *Saccharomyces cerevisiae*, 1,5–2 % сахара как дополнительное питание и выдерживались при температуре 20–25 °С до начала брожения. Затем суспензию в стеклянной емкости помещали в камеру и проводили обработку электромагнитным полем.

Подсчет микроорганизмов проводился двумя способами: методом посева под МПА и под сусло – агар, а также экспресс – методом [3].

Сравнение обоих методов показало, что результаты, полученные в обоих случаях, примерно совпадают. Поэтому в дальнейшем исследования проводились в основном экспресс-методом. Подсчет дрожжевых клеток проводили в камере Горяева. Перед подсчетом суспензию предварительно разводили водой в зависимости от количества клеток

и концентрации сухих веществ в субстрате, который исследовался. Для закрашивания мертвых клеток добавляли метиленовый синий.

Исследовали молочную творожную сыворотку с концентрацией сухих веществ 3 %, 7 %, 15 %, 22 % и 47 %, а также казеиновую сыворотку с кислотной коагуляцией с концентрацией сухих веществ 6 %, 16 % и 26 %. Содержание сухих веществ в сыворотке повышали методом криоконцентрирования. Измеряли летальность – процент мертвых клеток  $N_{уб}$  относительно их общего количества  $N_{общ}$  в зависимости от температуры нагрева.

Из приведенных данных следует, что температура среды, при которой летальность достигает 100 %, уменьшается с увеличением концентрации сухих веществ. Время обработки, при котором летальность достигает 100 %, составляет 10-17 секунд.

Следует отметить, что летальность дрожжевых клеток зависит также от толщины слоя суспензии. Так, при толщине  $h=30$  мм летальность равна 100 % при температуре 62 °С, а при толщине  $h = 5$  мм – при температуре 48 °С. Опыты, проведенные для различных концентраций, подтвердили эту тенденцию.

Наблюдаемое уменьшение температуры с уменьшением толщины обрабатываемого слоя, по – видимому, объясняется тем, что при больших толщинах продукта плотность электромагнитного потока уменьшается по мере продвижения к глубинным слоям.

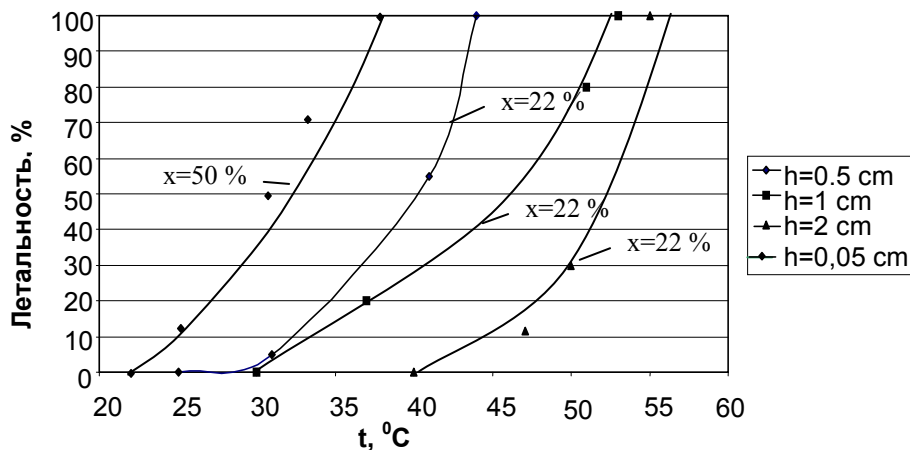


Рисунок 3 – Зависимость летальности дрожжевых клеток от температуры при различной толщине слоя творожной сыворотки

#### Литература

1. Бурдо О.Г. Наномасштабные эффекты в пищевых технологиях.-Инженерно-физический журнал (НАИ Беларуси).2005.Т78, №1, с. 88–93
2. Osterholm M.T., Potter M.E. Irradiation Pasteurization of Solid Foods.–Emerging Infection Diseases,1997,V.3, №4, p. 1–4
3. Бурдо О.Г., Рибіна О.Б. Дослідження процесів низькотемпературної пастеризації.- Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр. Вип.13, Т.2.–Донецьк: ДонДуЕт, 2005, С. 133–140

УДК 637.133.4.001.76

Бурдо О.Г., Рибіна О.Б., Сталімбовська А.С.

#### ЭНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ХАРЧОВИХ НАНОТЕХНОЛОГІЙ

У роботі запропоновано напрямки по зниженню енерговитрат шляхом впливу на природні наномасштабні об'єкти. Розглянуті процеси стерилізації та пастеризації на прикладі процесу низькотемпературної стерилізації харчових продуктів.

Наведено результати впливу електромагнітних полів на мікроорганізми.