

УДК 532.528:: 536.423

Иваницкий Г.К., Шурчкова Ю.А., Недбайло А.Е.*Институт технической теплофизики НАН Украины*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ БАКТЕРИАЛЬНЫХ КЛЕТОК В ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МОЛОКА

Розглянуто застосування гідродинамічної кавітації, що створюється у відцентрових насосах для руйнування бактеріальних клітин з метою стерилізації молока. Експериментально досліджено дію кавітаційних ефектів при різних температурах на пригнічення мікрофлори молока. Аналіз результатів експерименту проведено в рамках математичної моделі, яка дозволяє кількісно розрахувати ступінь динамічного впливу на клітинні структури таких потужних кавітаційних механізмів, як ударні імпульси тиску та зсувні напруження, що ініціюються в процесі еволюції кавітаційного кластера. Встановлено, що величина динамічних імпульсів, необхідних для руйнування бактеріальної клітки, залежить від радіуса та товщини клітинної стінки, а також від границі міцності структури стінки на розрив.

h – толщина клеточной стенки;
 P – давление;
 T – температура;
 R – радиус клеточной стенки;
 π – осмотическое давление;
 σ – динамическое натяжение;
 СКФ – сверхкритический флюид.

Введение

Кавитационные методы интенсификации технологических процессов применяются в различных производствах, связанных с обработкой жидких продуктов. В последние годы кавитация используется для управления кинетикой протекания химических, биохимических и биологических процессов в технологических средах [1-4]. Наномасштабные кавитационные эффекты позволяют направленно влиять на фи-

Рассматривается использование эффектов гидродинамической кавитации, возникающих в центробежных насосах, для разрушения бактериальных клеток с целью стерилизации молока. В эксперименте при разных температурах исследовалось влияние кавитации на инактивацию микрофлоры молока. Анализ эксперимента проводился с использованием математической модели, позволяющей количественно оценить уровень воздействия на клеточные структуры бактерий таких действенных механизмов кавитации, как ударные волны и сдвиговые напряжения, инициируемые в процессе развития кавитационного кластера. Установлено, что величина импульсов давления, необходимых для разрушения бактериальной клетки, зависит от радиуса и толщины клеточной стенки, а также от предела прочности структуры стенки на разрыв.

Индексы:

c – клетка;
 cr – критический;
 sat – насыщенный;
 SCF – в состоянии СКФ;
 v – пар.

зико-химические свойства вещества [4], разрушать макромолекулы и супрамолекулярные структуры [2-4], инактивировать бактериальные клетки [5-9]. Кавитация находит широкое применение в промышленных технологиях обработки пищевых продуктов [3,10].

При иницировании кавитации реализуются основные принципы дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЭ) – временная и пространственная дискретизация вводимой энергии, и

концентрация ее в локальных точках жидкой среды в форме мощных энергетических импульсов. Это дает основание рассматривать кавитацию как один из наиболее жестких и действенных механизмов ДИВЭ [11,12].

При использовании кавитационных технологий в масштабах производства гидродинамическая кавитация обладает несомненным преимуществом по сравнению с акустической, поскольку обеспечивает более высокую производительность при существенно меньших энергозатратах [3,10]. Кавитационная обработка жидких продуктов осуществляется с использованием традиционных гидродинамических устройств, таких как профилированные сопла [2,8,9], пропеллерные или турбинные мешалки [2], клапанные гомогенизаторы [7,8], насосы [2,9], роторные аппараты [1,3,10]. В работе [9] показано, что при однократном прохождении через центробежный насос водной суспензии зоопланктона при нормальной температуре регистрируется гибель до 30 % микроорганизмов.

Данное исследование проводилось в связи с обоснованием возможности использования эффектов кавитации, возникающих в рабочем колесе центробежных насосов, с целью гидромеханического или/и термического воздействия на обрабатываемую жидкую среду.

В ИТТФ НАН Украины разработана технология термовакуумной обработки (ТВО) биологически активных жидких продуктов с целью повышения их качественных показателей. Использование этой технологии в молочной промышленности обеспечивает улучшение таких показателей молока, как кислотность, термоустойчивость и стерильность. [13,14]. Эффективность технологии ТВО обусловлена инициированием в аппарате различных механизмов ДИВЭ, в том числе механизмов взрывного вскипания и кавитации. В данной технологии кавитационные эффекты реализуются в рабочем колесе центробежных насосов, которые в качестве продуктовых насосов используются для перекачивания жидкого продукта, и по условиям технологии номинально работают в кавитационном режиме. В процессе ТВО

молоко последовательно подвергается двукратному кавитационному воздействию. Первая стадия кавитационной обработки происходит в насосе, который работает в интервале температур 50...60 °С. После выхода из насоса молоко проходит термическую обработку в пастеризаторе ($T_{\max} = 80...95$ °С). Вторая стадия кавитационной обработки осуществляется перед выходом из аппарата в центробежном насосе, работающем в интервале температур 25...30 °С. Уровень кавитационного воздействия в каждом из насосов, как показано ниже, зависит от температурного режима обработки.

Следовательно, в технологии ТВО центробежные насосы, предназначенные для перекачивания больших объемов обрабатываемой жидкости, выполняют также функцию кавитирующего устройства. В работе [15] представлены результаты аналитического исследования кавитации в центробежных насосах, используемых в технологии ТВО, и проведены расчеты интенсивности динамических эффектов кавитации в зависимости от режимов обработки. Целью данного исследования является выяснение степени вклада и роли механизмов гидродинамической кавитации, инициируемых в центробежных насосах аппарата ТВО, в дезинтеграцию бактериальных клеток и в подавление активности присутствующих в молоке микроорганизмов в процессе термовакуумной обработки.

Динамические и термические эффекты кавитации

Кавитацией называется совокупность явлений, возникающих в жидкости, когда давление p_l в локальном объеме с температурой T_l становится ниже давления насыщения $p_{sat}(T_l)$, а затем резко возрастает до значений $p_l > p_{sat}(T_l)$. На первой стадии процесса формируются и растут паровые пузырьки, образующие в совокупности кавитационный кластер. На второй стадии ($p_l > p_{sat}(T_l)$) пузырьки интенсивно сжимаются и затем схлопываются, инициируя динамические и термические кавитационные эффекты. В [11,12] в рамках теоретических положений ДИВЭ рассматривается эволюция

пузырьков кавитационного кластера с учетом межфазного теплообмена и кинетики фазовых переходов.

На стадии сжатия пузырьков, когда кинетическая энергия радиального движения жидкости трансформируется в потенциальную энергию сжатого пара и сжатой жидкости, в окрестности пузырька реализуется эффект гидравлического удара. Температура и давление пара в предельно сжатом пузырьке и в прилегающем к нему слое жидкости достигают аномально высоких значений ($T_l \cong T_v > 5000 \text{ К}$, $p_l \cong p_v > 100 \text{ МПа}$) [4,11], которые намного превышают критические значения ($T_{l,v} \gg T_{cr}$ и $p_{l,v} \gg p_{cr}$). После перехода в закритическую область межфазная граница между пузырьком и жидкостью исчезает. На месте пузырька образуется квазисферическая горячая зона, в пределах которой жидкость в течение короткого времени находится в состоянии сверхкритического флюида (СКФ) [4,11]. В центре зоны СКФ температура $T_{SCF \max} \gg T_{cr}$, а на внешней границе $T_{SCF \min} \gg T_{cr}$. Величины T_{SCF} и p_{SCF} определяются теплопередачей от пара к жидкости, выделением теплоты конденсации и нагревом жидкости в процессе ударного сжатия. В состоянии СКФ вода обладает уникальной способностью растворять почти все органические вещества, которые в конденсированной воде практически нерастворимы [16]. В этом состоянии электропроводность воды и степень ионизации ее молекул возрастают на 5...8 порядков. Время пребывания воды в состоянии СКФ порядка 10 нс, но это достаточно большой интервал, если учесть, что характерные времена протекания химических и биохимических процессов и разрушения молекулярных структур измеряются в масштабе пикосекунд.

Динамическое действие кавитации обусловлено следующими факторами.

1. В процессе роста и сжатия пузырьков, благодаря суперпозиции радиальных потоков к каждому пузырьку, внутри кластера формируются сложные нестационарные микротечения с чрезвычайно высокими значениями скоростей сдвига и сдвиговых напряжений, действие

которых проявляются в течение всего время существования кластера.

2. При схлопывании каждый пузырек кластера является центром сферической ударной волны с амплитудой давления, превышающей 100 МПа [4,10,11]. Нестационарные поля скоростей и давлений в жидкости внутри кластера носят чрезвычайно сложный характер.

3. В процессе сжатия пузырьков среднеобъемное давление внутри кластера быстро возрастает и на завершающей стадии может превысить 10 МПа. При одновременном схлопывании пузырьков давление в объеме кластера резко падает и в окружающую среду излучается высокоамплитудный результирующий импульс.

Влияние кавитации на микрофлору молока

Методы гидродинамической кавитации успешно применяются для бактериальной санации жидких сред [2,3,8,10], в том числе для уничтожения вредной микрофлоры в молоке и в молочных продуктах в процессе обработки.

Содержимое бактериальной клетки – цитоплазма, которая представляет коллоидный раствор аминокислот, ферментов, углеводов, солей и др., отделена от окружающей жидкости тонкой (8...10 нм) полупроницаемой плазматической мембраной с диаметром пор (ионных каналов) 0,4...0,5 нм. Внутренняя поверхность мембраны подвергается действию осмотического давления цитоплазмы (0,3...1,0 МПа). Растягиванию и разрыву мембраны под действием осмотического давления препятствует окружающий ее прочный каркас – тонкая клеточная стенка с крупными порами (4...5 нм), проницаемая для воды, солей и низкомолекулярных соединений. Предел прочности клеточных стенок микроорганизмов достигает 100 МПа, что сравнимо с пределом прочности некоторых сортов стали [6,7].

Роль механизмов кавитации в инактивации бактериальных клеток далеко не изучена. Гибель микроорганизмов связывается с гидромеханическими, термическими, химическими, электрическими эффектами кавитации или с совокупным действием этих факторов [2,5-9,17].

По данным электронной микроскопии [2,5,17], дезинтеграция клетки обусловлена разрушением ее клеточной стенки.

Содержащиеся в молоке микроорганизмы представлены грамотрицательными бактериями – палочками и грамположительными бактериями – палочками и сферическими кокками. Последние обладают большей толщиной и прочностью стенки по сравнению с грамотрицательными, и для их разрушения необходим более высокий уровень воздействия.

Нами проведены экспериментальные исследования степени инактивации ряда содержащихся в молоке бактерий, а также изменение общей бактериальной обсемененности (ОБС) молока при обработке в аппарате ТВО. Характеристики исследуемых микроорганизмов содержатся в табл. 1.

По стандартной методике определялось количество жизнеспособных бактерий (в единицах КОЕ/мл) в исходном молоке ($T_l = 4\text{ }^\circ\text{C}$) и в трех пробах: 1) после прохождения через центробежный насос ($T_l = 50\dots 60\text{ }^\circ\text{C}$) перед пастеризацией; 2) на выходе из пастеризатора ($T_l = 95\text{ }^\circ\text{C}$); 3) после прохождения через

центробежный насос на выходе из аппарата при $T_l = 30\text{ }^\circ\text{C}$. Результаты исследования представлены в табл. 2 и на рис.1.

После нагревания молока от $4\text{ }^\circ\text{C}$ до $50\dots 60\text{ }^\circ\text{C}$ и кавитационной обработки в первом насосе общая бактериальная обсемененность уменьшается более чем на два порядка. После термообработки в пастеризаторе при $T_l = 95\text{ }^\circ\text{C}$ этот показатель снижается еще более чем на порядок. После прохождения зоны адиабатного вскипания и последующей кавитационной обработки во втором насосе при $T_l = 30\text{ }^\circ\text{C}$ обсемененность уменьшается почти на порядок.

Количество бактерий *S.aureus* и *E.coli* снижается до нуля уже на первых этапах обработки, так как они характеризуются низкой прочностью стенки. В пробах, взятых на выходе из аппарата, практически отсутствуют выжившие клетки грамположительной палочки *Lactobacillus*, тогда как их содержание в пробах, взятых после пастеризатора еще довольно велико. После обработки в заметном количестве остаются лишь активные клетки *L.lactis*, обладающие более прочной клеточной стенкой. Выжившие бактерии этого класса определяют,

Табл. 1. Характеристика исследуемых микроорганизмов

Бактерии	Характеристика	Форма	R_c , мкм	h_c , нм	σ_{cr} , МПа	p_{cr} , МПа
<i>S. aureus</i>	грамположит.,	сфера	0,6	36	10	1,20
<i>L.lactis</i>	грамположит.,	сфера	0,6	40	20	2,67
<i>Lactobacillus</i>	грамположит.,	палочка	0,4	35	20	1,75
<i>E.coli</i>	грамотрицат.,	палочка	0,3	12	3	0,80

Табл. 2. Количество микроорганизмов в молоке на различных этапах ТВО

Микроорганизм	Количество микроорганизмов в молоке на этапе ТВО, КОЕ/мл			
	исходное молоко	кавитация при $T_l = 30\text{ }^\circ\text{C}$	пастеризация при $T_l = 95\text{ }^\circ\text{C}$	адиабатное вскипание, кавитация при $T_l = 30\text{ }^\circ\text{C}$
ОБС молока	$10^{6,9}$	$10^{4,4}$	$10^{3,0}$	$10^{2,4}$
<i>S. aureus</i>	$10^{2,8}$	0	0	0
<i>L.lactis</i>	$10^{5,7}$	$10^{4,1}$	$10^{2,7}$	$10^{2,2}$
<i>Lactobacillus</i>	$10^{5,8}$	$10^{4,0}$	$10^{2,6}$	0
<i>E.coli</i>	$10^{4,8}$	$10^{4,1}$	0	0

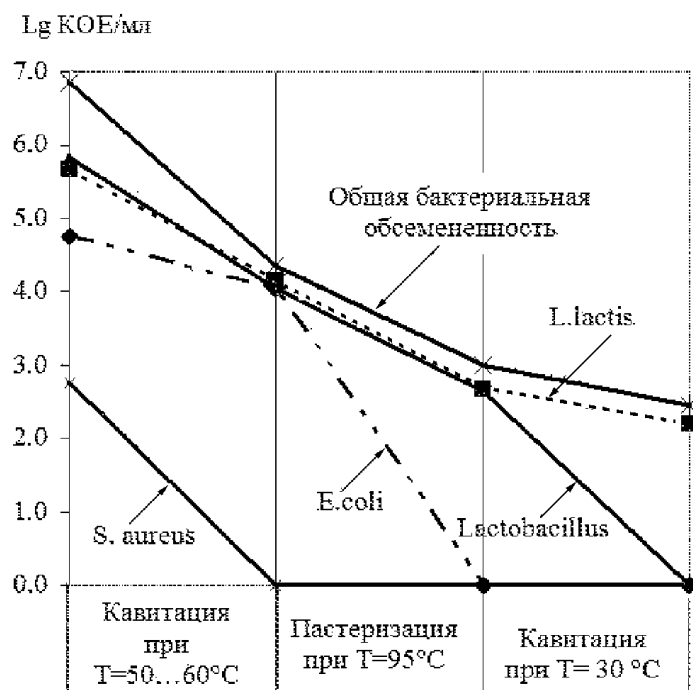


Рис. 1. Изменение общей бактериальной обсемененности и количества выживших бактериальных клеток исследуемых микроорганизмов на различных этапах термовакуумной обработки молока.

в основном, уровень остаточной обсемененности молока.

Эксперимент показал, что подавление микрофлоры молока, наряду с влиянием эффектов кавитации, обусловлено также термическим воздействием на продукт в начальной стадии обработки и в пастеризаторе. Вместе с тем, заметный вклад в инактивацию микроорганизмов вносит кавитация, создаваемая в центробежных насосах. Большинство исследователей склоняются к мнению, что роль кавитации в разрушении бактериальных клеток заключается в действии ударного и сдвигового механизмов на завершающей стадии сжатия кавитационного кластера [1,6-10]. Однако детализация этих механизмов на микроуровне и количественный расчет силового действия кавитации на клетки не проводились. В рамках этих механизмов нами выполнен анализ результатов проведенного эксперимента по инактивации микрофлоры молока. Количественные

расчеты выполнены с использованием модели динамики кавитационного кластера [11,12].

Действие ударных импульсов. Будем полагать, что гибель микроорганизмов связана с разрушением клеточной стенки бактерии вследствие ударного динамического воздействия импульсов давления, излучаемых кавитационным кластером. Рассмотрим бактериальную клетку в форме сферы или цилиндрической палочки, находящуюся в равновесии с жидкой средой с давлением $p_{i0} = 0,1$ МПа. На внутреннюю поверхность клеточной стенки с толщиной h_c через прилегающую к ней эластичную полупроницаемую плазматическую мембрану действует осмотическое давление содержимого клетки $\pi \gg p_{i0}$, вследствие чего в структуре стенки возникают растягивающие напряжения σ . Величины тангенциального σ_t и нормального σ_n напряжения в клеточной стенке бактерии-палочки оцениваются, соответственно, по формулам [6,18]:

$$\sigma_t = p_c R_c / h_c \text{ и } \sigma_n = p_c R_c / 2h_c, \quad (1)$$

а нормальное напряжение в стенке бактерии-кокки в форме сферы – по формуле:

$$\sigma_n = p_c R_c / 2h_c. \quad (2)$$

Параметр R_c в формуле (1) – радиус цилиндрической части бактерии-палочки, а в (2) – радиус сферы. Параметр p_c – давление, действующее на внутреннюю поверхность стенки. Если $p_c \gg \pi$, величина растягивающих напряжений может превысить предел прочности структуры стенки, что приводит к ее разрушению. Данные о размере клеток R_c и толщине клеточных стенок h_c , а также о величинах предельной прочности σ_{cr} многих классов бактерий содержатся в [7,8]. Для исследуемых нами микроорганизмов соответствующие параметры приведены в табл. 1. В последнем столбце представлены рассчитанные по формулам (1) и (2) значения давлений $p = p_{cr}$, которые обеспечивают превышение пределов прочности и разрыв клетки.

Увеличение давления в окружающей жидкости ($p_i \gg p_{i0}$) снижает давление на внутреннюю поверхность клеточной стенки, что

приводит к ослаблению действующих в ней напряжений. При $p_l > \pi$ напряжение в клетке $\sigma \rightarrow 0$. Под действием кавитационного импульса с амплитудой $p_{l \max}$ избыточное давление на внешнюю поверхность плазматической мембраны резко возрастает до величины $\Delta p = p_{l \max} - \pi$, что ведет к сжатию цитоплазмы. Как следствие, потенциальная энергия сжатой цитоплазмы возрастает, и после резкого сброса внешнего давления трансформируется в кинетическую энергию возвратного движения плазматической мембраны, а затем реализуется в форме ударного действия на внутреннюю поверхность клеточной стенки. Если амплитуда импульса давления $p_{l \max} > p_{cr}$, ударное воздействие может привести к разрушению стенки и к гибели клетки.

На рис. 2 для разных значений температуры жидкости T_l показаны рассчитанные в рамках модели [11] по данным работы [15] импульсы давления, излучаемые кавитационным кластером в рабочем колесе насоса в момент схлопывания пузырьков. При повышении температуры жидкости от 20 до 60 °С

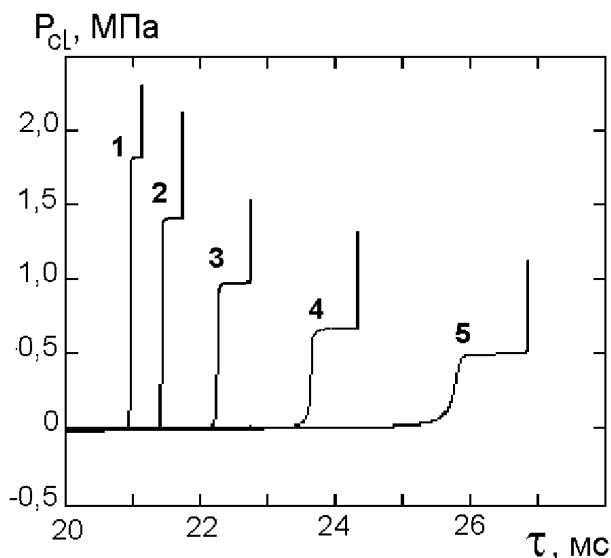


Рис. 2. Изменение во времени давления в объеме кавитационного кластера при различных значениях температуры жидкости T_l : 1 – 20°С; 2 – 30°С; 3 – 40°С; 4 – 50°С; 5 – 60°С. Высокоамплитудные импульсы соответствуют моменту схлопывания пузырьков кластера.

амплитуда импульсов $p_{l \max}$ понижается от 2,3 МПа до 1,2 МПа. Сравнение рассчитанных амплитуд импульсов давления $p_{l \max}$, периодически возникающих в рабочем колесе насоса, с величинами p_{cr} , содержащимися в последнем столбце табл. 1, подтверждают правомерность рассмотренного механизма ударного действия. Величина импульсов давления недостаточна для разрушения прочной клеточной стенки бактерий *L.lactis*, что согласуется с результатами эксперимента. Вместе с тем, полученные результаты показывают, что наблюдаемое в эксперименте интенсивное подавление жизнедеятельности бактерий *Lactobacillus* на завершающей стадии обработки при $T_l = 30$ °С, можно объяснить действием кавитации во втором насосе, когда реализуется условие $p_{l \max} = p_{cr}$.

Очевидно, что инактивация клеток под действие импульсов давления объясняется и другими причинами кроме механического разрушения клеточной стенки. Взаимодействие ударного импульса с клеткой может искажать молекулярную структуру стенки, отвечающую за ее нормальное функционирование, в частности, влиять на стабильность капсул, липополисахаридного и протеинового слоев на внешней поверхности клеточной стенки. Рассмотрение этих факторов ударного воздействия выходит за рамки данного исследования.

Действие сдвиговых напряжений. Другим возможным механизмом динамического влияния кавитации на бактериальные клетки является действие сдвиговых напряжений как результат суперпозиции радиальных течений, возникающих в окрестности пузырьков в процессе их роста и сжатия. Даже на этапе монотонного расширения кластера, когда скорость роста пузырьков не превышает 2 м/с, скорости сдвига в локальных зонах жидкости в силу микромасштабности процесса достигают величин $5 \cdot 10^4$ с⁻¹ и при этом охватывают область протяженностью в десятки микрометров вблизи растущего пузырька.

В работе [11] приведена система уравнений модели динамики ансамбля паровых пузырьков, позволяющая рассчитать мгновен-

ные значения давления и вектора скорости в локальных точках внутри 3D кавитационного кластера на всех стадиях его эволюции. С помощью модели можно оценить уровень сдвиговых напряжений при различных условиях образования и развития кластера. На рис. 3, а, представлены расчетные данные по изменению величины скорости в плоскости XU , проходящей через центр кластера, в направлении X на участке длиной 0,3 мм для восьми последовательных значений координаты Y с интервалом 10 мкм. На рис. 3, б для того же момента времени показано изменение направления вектора скорости в тех же локальных точках. Представленные данные указывают на сильную завихренность микро течений внутри кластера.

Расчеты показывают, что скорости сдвига в локальных точках кластера на границах взаимодействия микропотоков составляют

$10^5 \dots 10^6 \text{ с}^{-1}$, что сравнимо со значениями этого параметра, достигаемых в роторных аппаратах и в клапанных гомогенизаторах. Применительно к маловязким жидкостям (вода, молоко) это соответствует величинам сдвиговых напряжений порядка 0,001...0,1 МПа. По мнению многих исследователей, сдвиговые напряжения такого уровня способны разрушить клеточные стенки даже грамположительных бактерий [7,8,10]. Полученные нами результаты согласуются с результатами исследования других авторов. В работе [7] отмечается, что значения скоростей сдвига, необходимых для разрушения клеток грамположительных бактерий в форме сферы, лежат в интервале $3 \cdot 10^6 \dots 9 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$, а для разрушения грамположительных бактерий в форме палочки – в интервале $2 \cdot 10^4 \dots 7 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. Для разрушения грамотрицательных палочек достаточны сдвиговые скорости порядка $5 \cdot 10^3 \dots 7 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$.

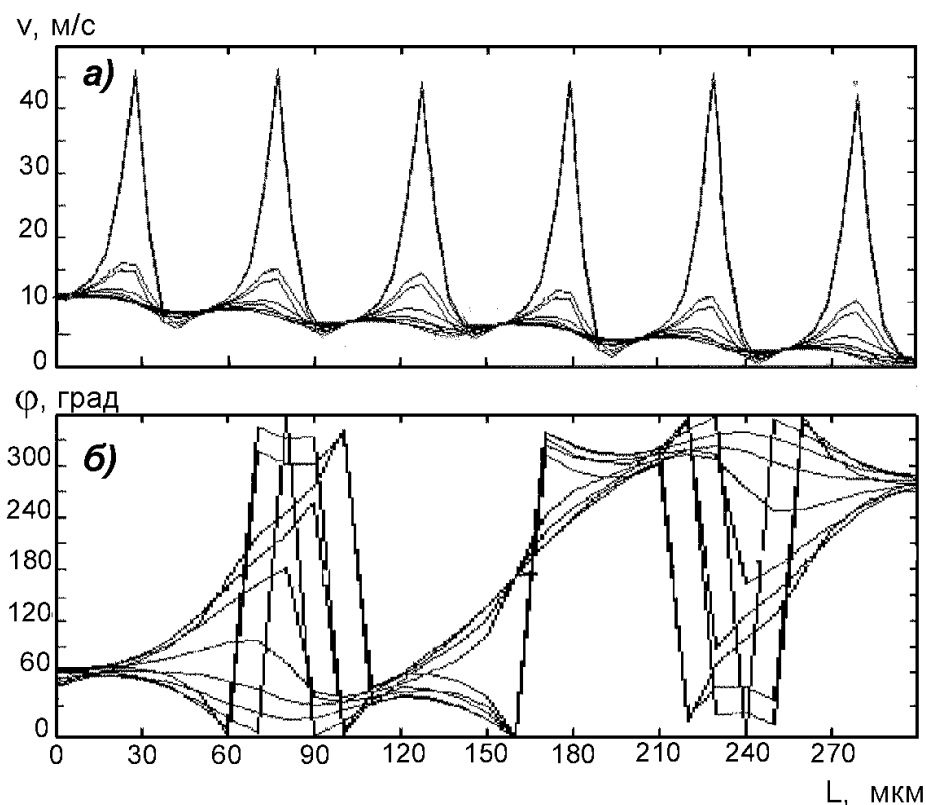


Рис. 3. а) Изменение величины вектора скорости вдоль направления X в 3D кавитационном кластере для восьми последовательных значений координаты Y с интервалом 10 мкм. б) Изменение направления вектора скорости в том же направлении X для тех же значений координаты Y .

Следовательно, рассчитанные нами значения скоростей сдвига способны разрушить клеточные стенки исследуемых в работе микроорганизмов, что подтверждает правомочность предположения о влиянии сдвигового механизма на дезинтеграцию бактериальных клеток молока.

Заключение

Результаты экспериментального и аналитического исследования показали, что эффекты кавитации, создаваемые в центробежных насосах, вносят заметный вклад в инактивацию микрофлоры молока в процессе его термовакuumной обработки. Очевидно, что подавление жизнедеятельности микроорганизмов в технологии ТВО обусловлено совместным влиянием различных факторов. В первом насосе кавитационной обработке подвергается уже нагретое молоко, что снижает активность содержащихся бактерий еще перед входом в насос. На входе пастеризатора большинство бактериальных клеток молока инактивировано после первой кавитационной обработки. Завершающей кавитационной обработке во втором насосе подвергаются микроорганизмы, выжившие после прохождения этапа пастеризации.

В результате совместной термической и гидромеханической обработки обсемененность молока на выходе из аппарата ТВО снижается до уровня, соответствующего стандартам для пастеризованного молока. Существенный вклад кавитации в подавление нежелательной микрофлоры молока позволяет снижать температуру пастеризации. Уменьшение чрезмерного термического воздействия на термолабильный продукт способствует повышению его качественных показателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Промтов М.А.* Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов // Вестник ТГТУ. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 861–869.

2. *Вітенько Т. М.* Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах. – Тернопіль: ТДТУ, 2009. – 224 с.

3. *Gogate P.R., Pandit A.B.* A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future. // Ultrason. Sonochem. 2005. – Vol. 12, P. 21–27.

4. *Suslick K.S., Millan M.M., Reis J.T.* Chemistry induced by hydrodynamic cavitation // Journ. Amer. Chem. Soc. – 1997. – Vol. 119, № 3. – P. 9303 – 9306.

5. *Marc D., Wenger A., DePhillips P., Bracewell D.G.* Microscale Yeast Cell Disruption Technique for Integrated Process Development Strategies. // Biotechnol. Prog. – 2008. – № 24. – P. 606 – 614.

6. *Caprita N.C.* Tensile Strength of Cell Walls of Living Cells // Plant Physiol. – 1985. – Vol. 79, P. 485 – 488.

7. *Фухте Б.А., Гурвич Г.А.* Введение в баллистическую дезинтеграцию микроорганизмов. – Пушкино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1982. – 123 с.

8. *Chisti Yu., Moo-young M.* Disruption of microbial cells for intracellular products. Review // Enzyme Microbiol. Techn. // 1986. – Vol. 8, April. – P. 194 – 204.

9. *Savant S.S., Anil A.Ch., Krishnamurthy V., Gaonkar Ch. et al.* Effect of hydrodynamic cavitation on zooplankton: a tool for disinfection // Biochem. Eng. Sci. – 2008. – Vol. 2, № 3. – P. 320– 328.

10. *Ashokkumar M, Rink R., Shestakov S.* Hydrodynamic cavitation – an alternative to ultrasonic food processing. // Electronic Journal “Technical Acoustics” <http://ejta.org>, 2011. – № 9. – P. 1 – 10.

11. *Долинский А.А., Иваницкий Г.К.* Тепло-массообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. – Киев: Наук. думка, 2008. – 381 с.

12. *Иваницкий Г.К.* Численное моделирование поведения пузырькового кластера в процессах гидродинамической кавитации // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2011. – № 2 (7), С. 52 – 58.

13. *Шурчкова Ю.А.* Адиабатное вскипание. – К.: Наук. думка, 1999. – 278 с.

4. *Долинский А.А., Шурчкова Ю.А.* Новая технология управления качеством молока // Молочная промышленность. – 2005. № 6. – С. 14.–16.

15. *Иваницкий Г.К., Недбайло А.Е.* Аналитическое исследование кавитации в рабочем колесе центробежных насосов // Пром. теплотехника. – 2012. – Т. 34, № 2. – С. 40 – 47.

16. *Артеменко С.В., Крийгсман П., Мазур В.* Термодинамическое поведение экологически опасных веществ в сверхкритических природных флюидах // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – Т. 42, № 6/5. – С. 34 – 40.

17. *Laroussi M., Mendis D.A., Rosenberg M.*

Plasma interaction with microbes // New Journal of Physics. – 2003. – № 5. – P. 1 – 10.

18. *Ильгамов М.А., Иванов В.А., Гулин Б.В.* Прочность, устойчивость и динамика оболочек с упругим наполнителем. – М.: Наука, 1977. – 184 с.

Получено 23.04.2012 г.

УДК 544.723

Бирюков А.Б.¹, Новикова Е.В.¹, Гнигнев П.А.¹, Манойлов Д.В.¹, Недбайло А.Н.²

¹ *Донецкий национальный технический университет*

² *Институт технической теплофизики НАН Украины*

ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ РЕАКТОРА СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОГРАНИЧЕННОГО ЧИСЛА ДАТЧИКОВ

Запропоновано алгоритм роботи експертної системи для аналізу теплової роботи реакторів піролітичного синтезу ВНМ, що заснована на побудові моментальних теплових балансів, яка не має в своєму складі газоаналізатора для визначення вмісту компонентів в газоподібному середовищі, що покидає реактор.

Предложен алгоритм работы экспертной системы для анализа тепловой работы реакторов пиролизического синтеза УНМ, основанной на построении моментальных тепловых балансов, не имеющей в своем составе газоанализатора для определения содержания компонентов в газообразной среде, покидающей реактор.

Working algorithm of expert system for carbon nanotubes pyrolytic synthesis reactors thermal work analysis basing on momentous heat balances constructing which has no gas analyzer for determining components content in gas flux living reactor in gauges set is proposed.

c – теплоемкость газообразной среды;

Q – статья теплового баланса;

t – температура газообразной среды;

V – расход газообразного потока (н.ф.у.);

Γ – условное обозначение инертного газа;

γ – доля инертного газа в составе исходной смеси газов для подачи в реактор;

τ – время;

χ – доля прореагировавшего углеводорода.

Индексы верхние:

эл. нагр. – электрический нагреватель;

пот. реак. – тепловые потери реактора;

энд. – указатель эндотермического эффекта;

Σ – указатель того, что берется интегральное значение величины за некоторый период времени.

Индексы нижние:

исх. угл. – исходный углеводород;

газ. прод. – газообразные продукты, покидающие реактор;

пр. – указатель принадлежности к приходной статье теплового баланса;

расх. – указатель принадлежности к расходной статье теплового баланса;

н, к – указатель того, что берется расход газов на входе и выходе из реактора соответственно.