

**Таблица 2 – Кинетические характеристики обезвоживания  
единичных капель биомассы и биосуспензии препарата «Лактин-К»**

| $T_r, ^\circ\text{C}$ | продукт      | тобщ, с | $\frac{\tau_{\text{кип}}}{\tau_{\text{обиц}}}$ | $T_{\text{кр1}}, ^\circ\text{C}$ | $\frac{dT_{\text{кр}}^{\text{корк}}}{d\tau}, ^\circ\text{C/с}$ | $\delta_0, \text{мм}$ | $\delta_{\text{кон}}, \text{мм}$ |
|-----------------------|--------------|---------|------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 70                    | биомасса     | 120     | -                                              | 32                               | 0,65                                                           | 1,5                   | 0,6                              |
| 120                   | биосуспензия | 56      | -                                              | 50                               | 2,5                                                            | 1,5                   | 0,8                              |
| 140                   | биомасса     | 62      | 0,1                                            | 47                               | 3,5                                                            | 1,3                   | 0,5                              |
|                       | биосуспензия | 50      | -                                              | 60                               | 3,0                                                            | 1,5                   | 0,75                             |
| 160                   | биомасса     | 50      | 0,06                                           | 62                               | 4,0                                                            | 1,3                   | 0,5                              |
|                       | биосуспензия | 43      | 0,01                                           | 64                               | 3,0                                                            | 1,55                  | 0,85                             |

В процессе обезвоживания капли биосуспензии при  $T_r = 160^\circ\text{C}$ , под влиянием большей интенсивности нагрева, на термограмме наблюдается некоторый изгиб кривой (рис. 2, кривая 3), который трудно определить как период кипения т.к. длительность его мала. На наш взгляд учитывая, что в распылительной камере диспергированная биосуспензия будет иметь размер, на порядок меньше исследуемых капель и температура теплоносителя будет уменьшаться, вероятность появления периода кипения мала. Поэтому, при обезвоживании биосуспензии препарата «Лактин-К», в условиях распылительной камеры можно рекомендовать температуру теплоносителя на входе в камеру равной  $160^\circ\text{C}$ .

#### Выводы

Проведенный комплекс экспериментальных исследований позволил определить особенности процесса обезвоживания единичных капель бакпрепарата «Лактин-К», оценить термическое влияние и структурные изменения, происходящие в капле (частице) на каждой стадии процесса сушки. На основе экспериментально полученных термограмм установлено, что введение компонентов защитной среды приводит к изменению кинетических характеристик: исчезновению периода кипения (нежелательного для термолабильных продуктов) и снижению темпа нагрева капли (частицы) ~ в 1,3 раза, что позволяет для данного препарата рекомендовать проведение процесса распылительной сушки при повышенных температурах теплоносителя на входе в сушилку.

#### Литература

1. Долинский А.А. Кинетика и технология сушки распылением / А.А. Долинский, К.Д. Малецкая, В.В. Шморгун. – Киев: Наук. думка, 1987. – 224 с.
2. Нежута А.А. Теоретические и практические основы технологии высушивания биопрепаратов / А.А. Нежута, А.Я. Токарик, А.А. Самуйленко. - Курск: гос. сельскохозяй. Академия, 2002. - 118 с.

УДК 532.528:637.13

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ НА МОЛОЧНЫЕ БЕЛКИ

Недбайло А.Е., м.н.с.

Институт технической теплофизики НАН Украины, г.Киев

*В статье рассмотрены механизмы воздействия эффектов гидродинамической кавитации на белковую систему молока в технологии термовакуумной обработки жидкостей. При рассмотрении увеличения термоустойчивости молока в условиях кавитации учитывалось прямое воздействие термогидродинамических эффектов процесса на белковые структуры, а также изменение свойств дисперсионной среды, что также обуславливает состояние коллоидной системы.*

*The paper deals with influence effects of hydrodynamic cavitation on protein system of milk in thermovacuum technology of processing of liquids. The direct influence of thermo- hydro- dynamical effects of process on protein structures and properties changes of the dispersion environment, which stipulate its state have been studied.*

**Ключевые слова:** гидродинамической кавитация, термовакуумная обработка, белковая структура, дисперсионная среды, коллоидной системы.

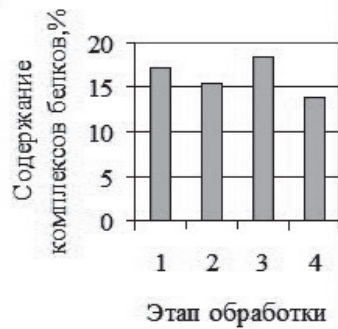
Кавитация широко используется для интенсификации процессов в химической, нефтехимической, фармацевтической и пищевой отраслях промышленности. Высокие градиенты температур и давлений создают уникальные условия для проведения химических реакций при экстремальных параметрах, что обеспечивает получение принципиально новых свойств обрабатываемых сред [1, 2]. При производстве пищевых продуктов большой интерес вызывает возможность управления свойствами биологических систем. В представленной работе рассмотрено влияние кавитационных механизмов на белковую систему молока в технологии термовакуумной обработки (ТВО) жидкостей, которая разработана в ИТТФ НАН Украины, и использует комбинацию теплового воздействия, адиабатного вскипания и гидродинамической кавитации.

Данная технология позволяет получать ряд положительных изменений в молоке, в частности, повышать его термоустойчивость, снижать кислотность, подавлять микрофлору и увеличивать сроки хранения. Аппарат для ТВО жидкостей состоит из двух секций, каждая из которых включает испарительную и конденсационную камеры. Обработка молока проходит в вакууме, что обеспечивает удаление из жидкости неконденсируемых газов. Подача жидкости из камеры в камеру осуществляется при помощи центробежных насосов. Кавитационные эффекты наблюдается в двух насосах установки: 1) в насосе, расположенном перед пастеризационной установкой, работающем в диапазоне температур 50...60 °C в зависимости от режимной температуры термообработки; 2) в насосе, расположенном после испарительных камер, работающем при температуре 30 °C.

Ранее было проведено аналитическое исследование параметров кавитации в насосах ТВО [3, 4] с использованием модели динамики парогазовых пузырьков [5]. В рамках исследования установлены размеры кавитационного кластера в зависимости от режимных параметров работы аппарата. В процессе его развития максимальный диаметр кластера достигает 3 мм. На завершающей стадии схлопывания амплитудные значения акустического импульса давления, излучаемого кластером в момент схлопывания, составляет 4...6 МПа. Чем ниже давление на входе в насос, тем более высокие импульсы давления наблюдаются при схлопывании. Было установлено, что интенсивность кавитации зависит также от температуры обрабатываемой жидкости. С повышением температуры среды эффективность кавитационных воздействий снижается. Модель динамики парогазовых пузырьков [5] позволила провести анализ уровня сдвиговых напряжений. Полученные данные указывают на сильную завихренность микротечений внутри кластера. По расчетным данным скорости сдвига в локальных точках кластера на границах взаимодействия микропотоков составляют 105...106 с<sup>-1</sup>, что обуславливает механическое воздействие на дисперсные частицы обрабатываемой жидкости. Сильное воздействие на обрабатываемую среду обусловлено также теплофизическими параметрами в окрестности кавитационных пузырьков. Установлено, что на стадии максимального сжатия в окрестности кавитационного пузырька температуры и давления достигают аномально высоких значений, которые намного превышают критические. В закритической области жидкость в течение короткого времени находится в состоянии сверхкритического флюида (СКФ) [5, 6]. В состоянии СКФ вода обладает уникальной способностью растворять почти все органические вещества, которые в конденсированной воде практически нерастворимы [7]. Время пребывания воды в таком состоянии составляет порядка 10 нс, что достаточно для протекания химических и биохимических процессов, разрушения молекулярных структур. Полученные значения теплофизических и кинетических параметров кавитации позволяют предполагать, что они оказывают существенное воздействие на все системы молока при его обработке. Влияние кавитационных механизмов на белковые структуры можно рассматривать в разрезе двух аспектов: 1) непосредственного влияния теплового и гидродинамического эффектов на белковые молекулы; а также 2) влияния на свойства дисперсионной среды, которые также определяют состояние белковой системы.

Для изучения воздействия кавитационной обработки на белки молока было проведено электрофоретическое исследование. Данный анализ проводился методом диск-электрофореза в полиакриламидном геле. Полученные результаты обрабатывались программой ImageMaster TotalLab v. 2.01 (Amersham Biosciences). Для анализа была выбрана система электрофоретического разделения по модифицированной методики Laemmli. Электрофорез был проведен на аппарате Hoefer Mighty Small (Amersham Biosciences, США) при силе тока 19 мА для концентрирующего геля и 35 мА для разделяющего геля. В качестве маркеров использовали LMW Calibration Kit (Amersham Biosciences, США).

Проведенные исследования фракционного состава белков молока показали, что при ТВО наблюдается снижение белков с высокой молекулярной массой (более 100 кДа) с 17 до 14 %, при этом наблюдается возрастание отдельных фракций белков с низкими молекулярными массами. Если рассматривать динамику комплексов белков молока по этапам обработки (рис. 1), то температурное воздействие влечет за собой возрастание комплексов белков, что согласуется с исследованиями многих авторов, и обусловлено осаждением сывороточных белков на казеиновые мицеллы [8].



- 1 — исходное молоко;  
 2 — кавитационная обработка (50...60°C);  
 3 — пастеризация;  
 4 — адиабатное вскипание + кавитационная обработка (30°C)

**Рис. 1 — Динамика комплексов белков с молекулярной массой свыше 100 кДа**

энергия ковалентных связей в несколько раз больше и достигает значений 125...400 кДж/моль [10]. При кавитации температуры в закритической области в окрестности кавитационного пузырька составляют свыше 2000°C, следовательно, вводимая в систему тепловая энергия  $kT$  более 20 кДж/моль, что в несколько раз превышает энергии водородной связи и гидрофобного взаимодействия. При таком воздействии происходит разрыв связей с малой энергией, что может приводить к разрушению белковых агрегатов. Энергия ковалентных S-S связей составляет около 293 кДж/моль. Современные исследования показывают [11, 12], что на белковые молекулы влияют сдвиговые напряжения, которые приводят к изменению конформации и разрыву S-S связей. Так, по данным [12], сдвиговые напряжения величиной 102с-1 достаточны для разрушения дисульфидной связи. Значения сдвиговых напряжений в микропотоках ансамбля кавитационных пузырьков, как уже упоминалось, составляют до 106 с-1, т.е. достаточны для разрушения данной связи в комплексах (мицеллах) белков молока. В работе [13] описано исследование влияния акустической обработки на молочные белки, при которой также наблюдалось снижение количества крупных белковых частиц и повышения термоустойчивости белков. Авторы данной работы связывают это с воздействием сдвиговых сил при акустической кавитации, которое разрушает межмолекулярные дисульфидные связи и гидрофобное взаимодействие. Одним из факторов, который способствует повышению термоустойчивости при кавитационной обработке, является дополнительная гидратация белков [14]. Вероятнее всего, процесс гидратации проходит во время пребывания белковых молекул в закритической области, и связан со свойствами воды в данной области.

Повышение показателя pH молока при ТВО и его сохранение во времени также влияют на состояние белковой системы. Такие изменения связаны с воздействием механизмов кавитации и адиабатного вскипания на воду как дисперсионную среду молока. Устойчивость белковых частиц в растворе согласно теории ДЛФО определяется системой сил действующих между частицами. Превалирование электростатических сил отталкивания над силами молекулярного притяжения обеспечивает стойкость коллоидной системы. Соотношение данных сил можно регулировать, влияя на водородный показатель (pH) обрабатываемой среды. Силы электростатического отталкивания обусловлены отрицательным зарядом белка, который несут полярные ионизированные группы  $-\text{COO}^-$ ,  $\text{PO}_3^{2-}$ . При снижении pH наблюдается избыток ионов  $\text{H}^+$ , что обуславливает их присоединение к ионизированным группам. Дополнительные ионы  $\text{OH}^-$  могут вернуть прежние равновесие коллоидной системе. Исследование показали, что при ТВО наблюдается возрастание показателя pH молока до 0,2 ед., что при обработке молока является весомым показателем, так как оно обладает буферными свойствами. Данные изменения в активной кислотности системы позволяют восстанавливать и поддерживать отрицательный заряд белков, обеспечивая тем самым их агрегационную устойчивость в коллоидном растворе.

#### Выводы

Проведенные исследования показали, что при помощи кавитационных механизмов появляется возможность целенаправленно управлять свойствами коллоидной системы молока. Повышение тепловой стабильности молочных белков обусловлено прямым влиянием термогидродинамических эффектов кавитации на белковые молекулы, а также изменением свойств дисперсионной среды при обработке.

## Література

1. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов // Вестник ТГТУ. – 2008. – Том 14, № 4. – С. 861 – 869.
2. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах: монографія. Тернопіль, в-во ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. – 224 с.
3. Иваницкий Г.К., Недбайло А.Е. Аналитическое исследование кавитации в рабочем колесе центробежных насосов // Промышленная теплотехника. – 2012. – Т. 34, №2. – С. 40 – 47.
4. Иваницкий Г.К., Шурчкова Ю.А., Недбайло А.Е. Использование гидродинамической кавитации для разрушения бактериальных клеток в технологии обработки молока // Промышленная теплотехника. – 2012. – Т. 34, №3. – С. 31 – 39.
5. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. – Киев: Наукова думка, 2008. – 381 с.
6. 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.
7. 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.
8. Горбатова К.К. Биохимия молока и молочных продуктов Издание 3-е, переработанное, дополненное, С.-Пб.: ГИОДР, 2004. – 320 с.
9. Shiming Lin, Ji-Liang Chen, Long-Sun Huang, Huan-We Lin. Measurements of the Forces in Protein Interactions with Atomic Force Microscopy // Current Proteomics, 2005, Vol. 2, No. 1, P. 55 -81.
10. Sheh-Yi Sheu, Dah-Yen Yang, H. L. Selzle, E. W. Schlag. Energetics of hydrogen bonds in peptides // PNAS, 2003. - Vol. 100, № 22. - P. 12683 – 12688.
11. Enrico Di Stasio, Raimondo De Cristofaro. The effect of shearstress on protein conformation: Physical forces operating on biochemical systems: The case of von Willebrand factor // Biophysical Chemistry, 2010, Vol. 153, № 1. - P. 1 – 8.
12. Macritchie F. Mechanical degradation of gluten proteins during high-speed mixing of doughs //Journal of Polymer Science: Polymer Symposia, 1975, Vol. 49, № 1, P. 85 – 90.
13. Ashokkumar M. Hot topic: sonication increases the heat stability of whey proteins //Journal of Dairy Science. – 2009. – №92(11). – P. 5353 - 5356
14. Ashokkumar M., Lee J., Zisu B., Bhaskarcharya R., Palmer M., Kentish S., Rink R., Shestakov S. Hydrodynamic cavitation – an alternative to ultrasonic food processing. // Electronic Journal “Technical Acoustics” <http://ejta.org>, 2011. – № 9. – P. 1 – 10.

УДК 66.047

## ТЕПЛОТЕХНІЧНИЙ АНАЛІЗ РОЗПИЛЮВАЛЬНИХ СУШАРОК ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ПОРОШКОВОЇ ФОРМИ СОЛОДОВИХ ЕКСТРАКТІВ

Турчина Т.Я., науковий співробітник  
Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ

*Представлено аналіз теплотехнічних можливостей двох моделей розпилювальних сушарок для отримання порошків солодових екстрактів.*

*Design thermotechnical possibilities analysis of spray dryer's two models for production malt extracts powders.*

**Ключові слова:** розпилювальна сушарка, діаметр камери, продуктивність, енерговитрати, солодовий екстракт.

Такі функціональні добавки, як солодові екстракти, що виготовляються з натуральної рослинної сировини, широко використовуються в харчовій галузі, у т.ч. у складі продуктів дитячого харчування, в якості збагачувачів біологічно активними речовинами широкого спектру, розрихлювачів, барвників та замінників цукру, що пояснює підвищений попит на них [1]. Порошкова форма солодових екстрактів є найбільш зручною для багатьох технологічних процесів, але в Україні вона до сих пір не виробляється.