

Champaign, IL 61801, 2015. P. 1–31.

2. Снежкин Ю.Ф., Петрова Ж.А. Тепломасообменные процессы во время получения каротиносодержащих порошков. Киев: ВД «Академперіодика», 2007. 162 с.
3. Снежкин Ю.Ф., Петрова Ж.А., Пазюк В.М. Энергоэффективные теплотехнологии производства функциональных пищевых порошков, Винница: ВНАУ, 2016. 458 с.
4. Петрова Ж.А., Слободянюк Е.С. Исследование кинетики сушки соево-морковной композиции. // Киев: НУХТ, материалы 83 международной научной конференции молодых ученых, аспирантов, студентов «Научные достижения молодёжи – решение проблем питания человечества в XXI столетии», часть 2, 5-6 апреля 2017. С. 159.

References

1. Theodore Hymowitz. (2015). The History of the Soybean. - Department of Crop Sciences, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL 61801, 1–31.
2. Snezhkin Yu.F., Petrova Zh.A. (2007). Teplomasoobmennyye protsesy vo vremya polucheniya karotinosoderzhashchih poroshkov. Kiev, «Akademperiodika», 162.
3. Snezhkin Yu.F., Petrova Zh.A., Pazyuk V.M. (2016). Energoeffektivnyie teplotehnologii proizvodstva funktsionalnyih pischevyih poroshkov. Vinnitsa, 458.
4. Petrova Zh.A., Slobodyanyuk E.S. (2017). Issledovanie kinetiki sushki soevo-morkovnoy kompozitsii. – Kiev: NUHT, materialy 83 mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodyih uchenyih, aspirantov, studentov «Nauchnyie dostizheniya molodYozhi – reshenie problem pitaniya chelochestva v XXI stoletii», chast 2, 5-6, 159.

УДК 532.528

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВОГО КЛАСТЕРА В ПРОЦЕССАХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ

Иваницкий Г.К., д-р техн. наук, ведущий. научн. сотр.
Институт технической теплофизики НАН Украины

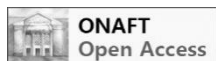
NUMERICAL INVESTIGATIONS OF BUBBLE CLUSTER BEHAVIOR IN HYDRODYNAMIC CAVITATION PROCESSES

Ivanitsky G.K.,
Institute of Engineering Thermophysics of NAS Ukraine

Copyright © 2017 by author and the journal “Scientific Works”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Аннотация. В настоящей работе освещаются различные аспекты гидродинамической кавитации, включая базовый механизм, анализ динамики единичного пузырька и кавитационного кластера с рекомендациями по оптимальным рабочим параметрам. Разрабатываемые в рамках этого направления технологии и оборудование могут быть использованы в различных отраслях пищевой промышленности.

Abstract. In recent years there has been a trend of widespread use of hydrodynamic cavitation in food technologies for the intensification of various processes and for local energy effects on the structure of raw materials and biological objects. The investigations were carried out with the aim of studying the physical nature of cavitation mechanisms, and also elucidating the influence of various factors on the kinetics of cavitation processes and on the intensity of dynamic cavitation effects. In water, under normal conditions, a large number (of order 10^{13} m^{-3}) of vapor-gas nuclei with diameters of 10^1 - 10^3 nm stably exists in equilibrium with the liquid. To initiate the growth of these micro-bubbles and to form a cavitation cluster, it is necessary to create strong tensile stresses in the liquid, i.e. reduce external pressure to negative values. It has been found an analytical relationship between the value of the minimum critical pressure, the bubble radius and the temperature of the liquid. Using the previously developed mathematical model of bubble ensemble dynamics, which takes into account the force interaction between the bubbles, the behavior of the cavitation clusters during its existence, including the initial stage of growth and the final stages of compression and collapse, has been analyzed. The amplitudes of the acoustic pulses emitted both by individual bubbles and the cluster as a whole at the final stage of the collapse was calculated, that allows the estimation of the micro-scale energy impact of cavitation action on the raw mate-

rials being processed. The occurrence of powerful cavitation effects was proven to be directly concerned with initiation of the water hammer phenomenon on the surface of each collapsing bubble. A computational experiment carried out in the framework of the mathematical model has shown that at the stage of cluster collapse for a time of 20-50 ns the extremely compressed bubbles are in a state of supercritical fluid with temperature above 2000 K and pressure of the order of 50 MPa.

The proposed methodology can be considered as an initial stage in the development of effective cavitation devices, with reference to the creation of innovative technologies based on the selection of the rational design of cavitation reactors and their optimum operation modes.

Key words: hydrodynamic cavitation, gas-vapor bubbles, cavitation cluster.

Ключевые слова: гидродинамическая кавитация, парогазовые пузырьки, кавитационный кластер

Введение. Использование мощных кавитационных механизмов является сегодня одним из наиболее действенных способов достижения высоких энергетических показателей в технологиях, связанных с обработкой жидких дисперсных сред, с целью повышения скорости проведения таких операций, как диспергирование, гомогенизация, экстрагирование, эмульгирование, стерилизация и другие. В последние годы в мире наблюдается тенденция широкого использования гидродинамической и акустической кавитации в пищевых технологиях для ускорения тепломассообменных, гидродинамических, биохимических микроуровневых процессов и для локального энергетического воздействия на структуру сырья и на биологические объекты [1-3]. Обстоятельные обзоры по использованию кавитации в различных отраслях пищевой промышленности и в сельском хозяйстве содержатся в работах [1,3].

Кавитационное воздействие на обрабатываемую среду осуществляется на молекулярном уровне, что позволяет направленно изменять физико-химические свойства продукта, разрушать макромолекулы, мицеллярные структуры и оболочки клеток микроорганизмов, ускорять протекание химических реакций, способствовать образованию свободных радикалов [2,3]. Для рационального решения этих задач необходимо понимание физической природы кавитационных механизмов и возможность их адекватного описания в пространственном и во временном наномасштабах.

Данное аналитическое исследование проведено в плане изучения физической природы кавитационных механизмов, а также для выяснения влияния различных факторов на кинетику протекания процессов кавитации и на характеристики динамических и термических кавитационных эффектов.

Условия инициирования кавитационных процессов. Кавитация – это явление, связанное с образованием, ростом и схлопыванием парогазовых пузырьков в результате последовательного создания в жидкости области пониженного, а затем повышенного давления. В результате схлопывания совокупности пузырьков происходит излучение высокоамплитудных акустических импульсов давления, которые оказывают мощное динамическое и термическое воздействие на окружающую жидкую среду и присутствующие в ней дисперсии и биологические структуры.

Паровые пузырьки стабильно существуют в жидкости при условии, что давление насыщенного пара внутри пузырька $p_{sat}(T_l)$ превышает действующее на него давление со стороны жидкости p_l . При нормальных условиях ($p_{l0}=0,1$ МПа, $T_{l0}=20^\circ\text{C}$) существование паровых пузырьков в воде невозможно. Формирование и рост кавитационных пузырьков при сбросе давления в жидкости связано с наличием в ней микроскопических парогазовых зародышей, содержащих наряду с водяным паром некоторое количество неконденсируемого газа. При заданных значениях p_{l0} и T_{l0} стабильное существование в жидкости парогазового пузырька с радиусом R_{b0} определяется условием

$$p_{gb0} + p_{sat}(T_{l0}) = p_{l0} + 2\sigma/R_{b0}, \quad (1)$$

где $p_{gb0}=f(p_{l0}, T_{l0}, R_{b0})$ - парциальное давление газа в пузырьке; $\sigma=f(T_l)$ - поверхностное натяжение жидкости. Чем меньше радиус равновесного пузырька R_{b0} , тем парциальное давление газа p_{gb0} выше по сравнению с давлением пара внутри пузырька $p_{vb}=p_{sat}(T_{l0})=const$. Очевидно, в жидкости могут стабильно существовать парогазовые пузырьки различного радиуса $R_{b0}=f(p_{gb0})$. При изотермическом расширении или сжатии пузырька и изменении его радиуса от начального значения R_{b0} до R_b давление газа в пузырьке изменяется по закону $p_{gb}=p_{gb0}(R_{b0}/R_b)^3$.

С увеличением давления в жидкости от p_{l0} до $p_{l1} > p_{l0}$ радиус пузырька уменьшится до значения $R_{b1} < R_{b0}$, а парциальное давление газа возрастет до $p_{gb1}=p_{gb0}(R_{b0}/R_{b1})^3$. Капиллярное давление $p_\sigma=2\sigma/R_{b1}$ повышается, а парциальное давление пара $p_{vb}=p_{sat}(T_{l0})$ остается неизменным. Из (1) следует, что при любом повышении давления p_l парогазовые пузырьки по-прежнему будут находиться в равновесии с жидкостью, но с меньшим размером.

Совсем иначе ведет себя пузырек в случае понижения давления в жидкости. С уменьшением p_l радиус R_b увеличивается. Действующее на пузырек капиллярное давление $p_\sigma=2\sigma/R_b$ снижается пропорционально R_b^{-1} , При этом противодействующее давление газа в пузырьке p_{gb} снижается намного быстрее

($\propto R_b^{-3}$) и, как следствие, давление парогазовой среды внутри пузырька будет определяться преимущественно давлением насыщенного пара $p_{sat}(T_{l0})$. При понижении давления пузырьки могут стабильно существовать в жидкости, пока соблюдается условие равновесия (1).

Равновесие нарушается, когда давление p_l уменьшится до некоторого критического значения $p_l = p_{lcr}$, ниже которого давление парогазовой среды в пузырьке будет превышать давление со стороны жидкости, что ведет к неограниченному росту пузырька.

В акустике при анализе кавитационных явлений критическим (пороговым) давлением называют значение амплитуды акустического давления, вызывающего расширение зародыша до критического размера, после которого он начинает расти взрывообразно.

Величина критического давления p_{lcr} , существенно зависит от начального радиуса пузырька R_{b0} . У крупных зародышей ($R_{b0} > 20$ мкм) капиллярное давление $2\sigma / R_{b0}$ изначально невелико, и с увеличением радиуса член $2\sigma / R_b$ в правой части (1) становится пренебрежимо малым, но при этом давление газа в крупном пузырьке p_{gb} остается еще достаточно высоким. Условие неограниченного роста сравнительно крупных парогазовых зародышей определяется неравенством

$$p_{gb0} \left(\frac{R_{b0}}{R_{b2}} \right)^3 + p_{sat}(T_{l0}) \geq p_{lcr}. \quad (2)$$

Неравенство (2) выполняется для p_{lcr} , находящихся в интервале $p_{gb} < p_{lcr} < p_{sat}(T_{l0})$, так что неограниченный рост крупных пузырьков может происходить даже при положительных значениях p_{lcr} .

У зародышей с $R_{b0} \leq 5$ мкм капиллярное давление $2\sigma / R_{b0}$ велико, и остается достаточно высоким при дальнейшем увеличении радиуса R_b . Давление газа p_{gb} в микропузырьках в процессе расширения быстро снижается, и с увеличением R_b член p_{gb} в левой части (1) становится пренебрежимо малым. Условие неограниченного роста парогазовых пузырьков малого размера определяется неравенством

$$p_{sat}(T_{l0}) \geq p_{lcr} + \frac{2\sigma}{R_{b2}}. \quad (3)$$

Из неравенства (3) следует, что критическое давление p_{lcr} должно быть достаточно низким, чтобы компенсировать действие капиллярного давления ($p_{lcr} \leq -2\sigma / R_{b2}$). Поэтому давление должно находиться в области отрицательных значений, что обеспечивается за счет растяжения жидкости.

На рис.1 представлены рассчитанные по уравнениям (2) и (3) значения p_{lcr} , определяющие начало неограниченного роста парогазовых зародышей в воде в зависимости от их начального диаметра d_{b0} при двух значениях температуры жидкости: $T_{l0}=20^\circ\text{C}$ и $T_{l0}=40^\circ\text{C}$.

На рисунке видно, что для инициирования роста зародышей с диаметрами $d_{b0} < 15$ мкм в жидкости нужно создавать отрицательные давления ($p_l < 0$). С повышением температуры T_{l0} рост пузырьков с такими начальными размерами начинается при более высоких давлениях ($p_l > 0$) из-за относительно малого содержания в пузырьках неконденсируемых газов. Для начала роста пузырьков с $d_{b0} \approx 1$ мкм растягивающие напряжения в воде должны достигать значений $p_{lcr} < -2$ атм, а при $d_{b0} \approx 100$ нм значения $p_{lcr} \leq -20$ атм. Как показывает опыт, в обычной воде стабильно присутствуют только пузырьки микронного размера [1,2]. Крупные пузырьки ($d_{b0} > 10$ мкм) быстро всплывают за счет действия архимедовых сил.

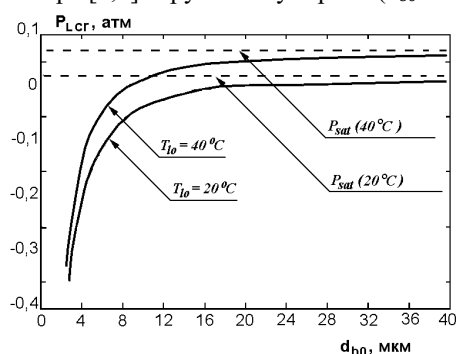


Рис. 1. Зависимость критического давления p_{lcr} от диаметра парогазовых зародышей d_{b0}

Кавитационное воздействие на обрабатываемые жидкие среды обусловлено не единичными пузырьками, а совместным действием полидисперсного ансамбля пузырьков, находящихся в жидкости. По принятой оценке концентрация микрозародышей в обычной воде составляет 10^5 - 10^6 см⁻³. В результате интенсивного роста совокупности зародышей при сбросе давления формируется т.н. кавитационный кластер. Динамические эффекты кавитации определяются условиями развития кластера, как на стадии его роста, так и на стадии коллапса – при одновременном схлопывании всех пузырьков.

Динамика единичного пузырька в качественном и в количественном отношении сильно отличается от динамики пузырька в составе кластера, что зачастую не учитывается при моделировании процессов кавитации. Для описания поведения кластера обычно используют уравнения динамики единичного пузырька без учета силового взаимодействия пузырьков, что вносит недопустимо высокую погрешность. Подробный обзор известных моделей кавитационного кластера содержится в работах [1,4].

Одной из наиболее детально разработанных математических моделей, позволяющих с хорошей точностью прогнозировать поведение кавитационных кластеров при любых режимных параметрах, является модель динамики пузырькового ансамбля (модель ДПА), представленная в монографии [5].

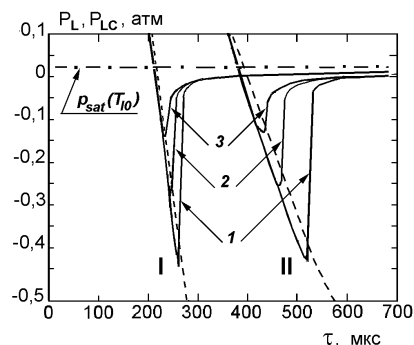
При минимальном числе допущений модель адекватно описывает поведение ансамбля пузырьков в процессе изменения давления в жидкости во всем температурном интервале существования жидкости со строгим учетом кинетики межфазного тепло- и массообмена. Рассматривается силовое взаимодействие пузырьков и рассчитываются текущие параметры нестационарных полей давлений, температур и скоростей в межпузырьковом пространстве жидкости внутри кластера. На стадии схлопывания определяются амплитуды импульсов давления, излучаемых отдельными пузырьками, и акустического импульса, излучаемого кластером, что в конечном итоге, позволяет оценить микро- и наномасштабное энергетическое воздействие кавитационных эффектов на обрабатываемое сырье.

В рамках модели ДПА проведен вычислительный эксперимент по формированию и последующему схлопыванию пузырькового кластера в воде в результате резкого сброса давления до минимального значения $p_{l\min} < p_{\text{sat}}(T_{l0})$ и последующего его повышения до конечного значения $p_{lk} > p_{\text{sat}}(T_{l0})$.

Исследование проведено с целью изучения влияния различных факторов на поведения кластера на всех этапах его развития и на интенсивность сопутствующих кавитационных эффектов. К определяющим факторам относятся такие контролируемые параметры, как температура T_{l0} , минимальное $p_{l\min}$ и конечное давление p_{lk} , длительность сброса давления – $\Delta\tau_1$ и длительность последующего его повышения – $\Delta\tau_2$. В кавитационных технологиях именно вариация этих параметров в реакторе обеспечивает эффективность и выбор оптимальных режимов обработки. Распределение зародышей по размерам $N_b = f(R_{b0})$ в исходной жидкости является неконтролируемым внутренним фактором. Данное исследование проведено при постоянных значениях $T_{l0} = 20^\circ\text{C}$, $\Delta\tau_1 = 0,65$ мс и $\Delta\tau_2 = 1,5$ мс.

Начальная стадия роста кавитационного кластера. С помощью модели ДПА проанализирована начальная стадия роста парогазовых зародышей с учетом результатов, представленных на рисунке 1

Кинетика роста отдельных пузырьков внутри расширяющегося кластера будет определяться уже не отрицательным внешним давлением $p_l(\tau) < 0$, как для единичного пузырька, а давлением жидкости в окрестности пузырька $p_{lc} \cong p_{\text{sat}}(T_{l0}) > 0$. Время достижения равновесного давления $p_{\text{sat}}(T_{l0})$ внутри кластера тем короче, чем выше концентрация N_b . С уменьшением N_b скорость роста пузырьков кластера возрастает. Изменение давления в межпузырьковом пространстве кластера $p_{lc}(\tau)$ (сплошные линии) при изменении внешнего давления $p_l(\tau)$ (пунктир) от начального значения p_{l0} до минимального $p_{l\min}$ показан на рисунке 2.



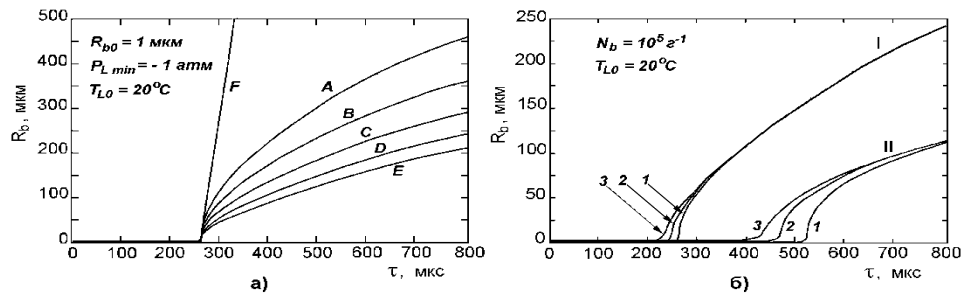
R_{b0} : 1 – 1 мкм; 2 – 1,5 мкм;
3 – 2,5 мкм; $N_b = 10^5 \text{ г}^{-1}$;
 $p_{l0} = 1 \text{ атм}$; $p_{l\min} = -0,5 \text{ атм}$ (I);
 $p_{l\min} = -3 \text{ атм}$ (II).

Рис. 2. Изменение давления в межпузырьковом пространстве.

Пусть в воде при нормальных условиях ($p_{l0} = 1 \text{ атм}$, $T_{l0} = 20^\circ$) находятся парогазовые зародыши с диаметрами $d_{b0} \leq 5 \text{ мкм}$ и с концентрацией $N_b = 10^3 \cdot 10^6 \text{ г}^{-1}$, где N_b – количество пузырьков в единице массы жидкости, которое в отсутствие коагуляции или дробления пузырьков остается постоянным на протяжении всего процесса. Результаты исследования кинетики роста пузырькового кластера с заданными значениями N_b , R_{b0} , $p_{l\min}$, p_{lk} , представленные на рис.2 и рис.3, показали следующее. При сбросе внешнего давления p_l до минимального значения $p_{l\min} < p_{lc}$ давление жидкости p_{lc} в межпузырьковом пространстве кластера p_{lc} быстро возрастает от $p_{lc} = p_{lc}$ до $p_{lc} = p_{\text{sat}}(T_{l0})$, независимо от последующего понижения внешнего давления $p_l(\tau)$ (рис.2).

При сбросе давления до заданного значения $p_{l\min}$ пузырьки, независимо от их начального радиуса R_{b0} , растут до одинакового размера (3-б). Следовательно, к началу сжатия изначально полидисперсного кластера диаметр всех пузырьков в нем будет одинаковым. Пузырьки растут тем интенсивнее, чем ниже значение $p_{l\min}$ (рис.3-б).

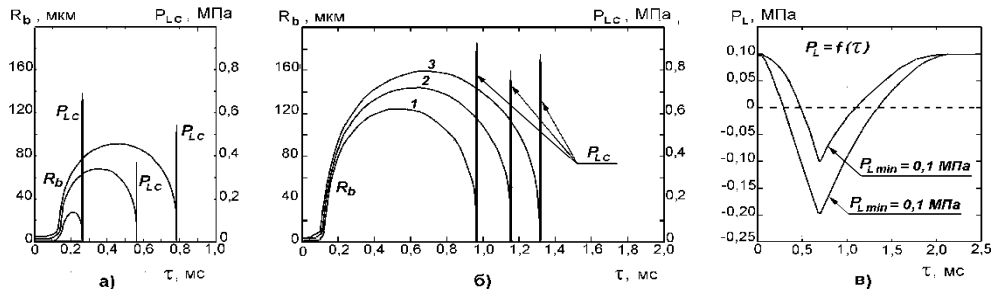
Стадия сжатия кавитационного кластера. При последующем повышении внешнего давления p_l от минимального значения $p_{l\min}$ до конечного p_{lk} расширение кластера замедляется. При достижении условия $p_{lc} > p_{\text{sat}}(T_{l0})$ происходит быстрое сжатие пузырьков кластера, как за счет увеличения давления жидкости внутри кластера ($p_{lc}(\tau) \rightarrow p_l(\tau) \rightarrow p_{lk}$), так и вследствие резкого возрастания капиллярного давления $2\sigma/R_b(\tau)$, которое на завершающей стадии сжатия играет определяющую роль. Изменение радиуса пузырьков кластера и давления жидкости в межпузырьковом пространстве кластера с момента формирования кластера и до его коллапса представлено на рисунках 3-а,б для двух режимов изменения внешнего давления $p_l(\tau)$, показанных на рис.3-в.



Начальное давление $p_{l0}=1$ атм. Минимальное давление $p_{l \min}$: I - -3 атм; II - $-0,5$ атм. Концентрация N_b : A - 10^2 з^{-1} ; B - 10^3 з^{-1} ; C - 10^3 з^{-1} ; D - 10^5 з^{-1} ; E - 10^6 з^{-1} ; F - единичный пузырек.

Рис. 3. Изменение со временем радиуса пузырьков кластера $R_b(\tau)$ при сбросе давления от p_{l0} до $p_{l \min}$ а) в зависимости от концентрации пузырьков кластере N_b ; б) в зависимости от начального размера зародышей R_{b0} и от величины минимального давления $p_{l \min}$.

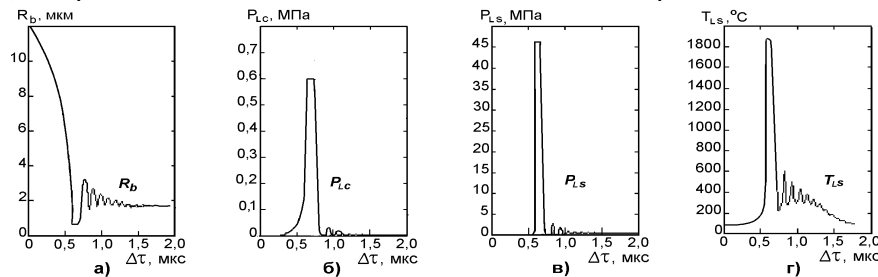
Сравнение рис.4-а и рис.4-б показывает, что амплитуда импульсов давления внутри кластера $p_{lc}(\tau)$ возрастает с понижением давления разрежения p_l от $-0,1$ МПа до $-0,2$ МПа. Это связано с тем, что во втором случае (рис.4-б) пузырьки к моменту их сжатия достигают большего размера и приобретают больший запас потенциальной энергии, которая при схлопывании трансформируется в энергию импульса.



Начальный радиус пузырьков R_{b0} : 1 - 1 мкм; 2 - $1,5$ мкм; 3 - $2,5$ мкм; $N_b=10^5 \text{ з}^{-1}$; $T_{l0}=20^\circ\text{C}$.

а) $p_{l \min} = -1$ МПа; б) $p_{l \min} = -2$ МПа; в) Изменение внешнего давления $p_l = f(\tau)$
Рис. 4. Изменение со временем радиуса пузырьков и давления внутри кавитационного кластера в процессе его роста и схлопывания при сбросе давления в жидкости от p_{l0} до $p_{l \min}$.

На рис.5 показано, как на завершающей стадии схлопывания (в интервале $\Delta\tau = 2$ мкс) меняются радиус пузырька $R_b(\tau)$, давление жидкости внутри кластера p_{lc} , давление p_{ls} и температура жидкости на границе с пузырьком. Последние два параметра соответствуют давлению p_b и температуре газа T_b внутри пузырька, которые на стадии схлопывания находятся далеко в закритической области.



$R_{b0}=2,5$ мкм; $p_{l \min} = -1$ атм; $N_b=10^5 \text{ з}^{-1}$; $T_{l0}=20^\circ\text{C}$.

Рис. 5. Характер изменения со временем радиуса пузырька (а), давления в межпузырьковом пространстве кластера (б), давления жидкости на границе с пузырьком (в) и температуры жидкости на границе с пузырьком (г) на завершающей стадии схлопывания пузырькового кластера $\Delta\tau$.

На завершающей стадии сжатия радиальная скорость жидкости на границе с пузырьком достигает высоких значений ($v_R = dR_b/d\tau \approx 800$ м/с), а величины ускорения $|dv_R/d\tau| > 10^{12}$ м/с. Возникновение кавитационных эффектов связано с инициированием сферического гидравлического удара на поверхности предельно сжатого пузырька. В течении времени $\Delta\tau \propto 50$ нс сжатый пузырек находится в состоянии

сверхкритического флюида с температурой $T_b \approx 2000$ К и давлением порядка 45 МПа, а градиент давления в слое жидкости вблизи пузырька достигает 10^9 МПа/м. Столь высокие значения динамических и термических эффектов кавитации достаточны для разрушения не только слабых межмолекулярных связей, но также и более сильных внутримолекулярных энергетических связей. Так для белковой молекулы с молекулярной массой $M = 5 \cdot 10^4$ максимальная инерционная сила, связанная с ускорением жидкости в окрестности схлопывающегося пузырька, равна примерно 650 пН (пиконьютон), тогда как для разрыва С-С связей в длинноцепочечной молекуле требуется 450 пН [6].

С помощью модели ДПА были выполнены комплексные исследования по изучению специфики протекания процессов гидродинамической кавитации в таких устройствах как роторно-пульсационные аппараты [5,7], сопла Вентури [8], центробежные насосы [9,10], пульсационные экстракторы [11], применительно к использованию этих устройств для решения конкретных практических задач, связанных с обработкой жидких сред., в том числе биологического и пищевого сырья. На основе этих исследований разработан ряд высокоэффективных инновационных технологий, в основе которых непосредственно используется возможность направленного кавитационного воздействия на супрамолекулярные структуры - мицеллы, белковые соединения, бактериальные и растительные клетки. К ним относятся технологии, связанные со стерилизацией молока, снижением его кислотности, изменением в нем фракционного состава белков [10], технологии промышленного производства суспензий наноразмерных фосфолипидных везикул, которые сегодня используются в фармакологии, медицине, в пищевой промышленности и в АПК [7,8], энергосберегающие технологии экстрагирования целевых компонентов из растительного сырья [11].

Выводы. Предлагаемая в данном исследовании методология предназначена для количественной оценки динамических, энергетических и термических характеристик кавитационного кластера, и может рассматриваться как начальный этап при разработке эффективных кавитационных устройств, применительно к созданию инновационных технологий для пищевой промышленности, для обоснования рациональной конструкции кавитационных реакторов и оптимальных режимов их работы.

Литература

1. Gogate P.R. Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing // Food Bioprocess Technol. 2011. Vol. 4, N.6. pp.996–1011.
2. Ashokkumar M., Rink R., Shestakov S. Hydrodynamic cavitation - an alternative to ultrasonic food processing // Electronic Journal «Technical Acoustics» (<http://www.ejta.org>), 2010. N.11. pp.1–10.
3. Chemat F., Zill-e-Huma, Khan M.K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction //Ultrasonics Sonochemistry. 2011. Vol.18, pp.813–835
4. Dynamics of cavitation bubbles and design of a hydrodynamic cavitation reactor: cluster approach. / Kanthale P.M. et.al. //Ultrasonics Sonochem. 2005. Vol.12, pp.441–452.
5. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. –Киев: Наук. думка. 2008. 381 с.
6. Wiita A., Ainavarapu S., Huang H., Force-dependent chemical kinetics of disulfide bond reduction observed with single-molecule techniques. // Proc. Natl. Acad. Sci. 2006. Vol.103, N19. pp.7222–7227.
7. Авдеева Л.Ю., Иваницкий Г.К. Применение гидродинамической кавитации в технологическом процессе получения фосфолипидных наноструктур. // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сб. научн. статей. Киев: «НПБК Трианон», 2011. вып. 2(7). С.59–65.
8. Ivanitsky G.K., Avdeyeva L. Y., Makarenko A. A. Using the effects of hydrodynamic cavitation for purposeful dynamical action on the supramolecular structures. // Physics of Aerodisperse systems. 2016. № 53. pp. 142–151.
9. Иваницкий Г.К., Недбайло А.Е. Аналитическое исследование кавитации в рабочем колесе центробежных насосов // Пром. теплотехника. 2011. Т 34, №2. С.40–47.
10. Иваницкий Г.К., Шуркова Ю.А., Недбайло А.Е. Использование гидродинамической кавитации для разрушения бактериальных клеток в технологии обработки молока. // Пром. теплотехника. 2012. Т.34, №3. С.31–39
11. Иваницкий Г.К. Гоженко Л.П. Аналитическое исследование условий возникновения кавитации в трубе пульсационного диспергатора ударного типа. //Пром. теплотехника. 2014. Т.36, №6. С.49–56.

References

1. Gogate P.R. (2011). Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing //Food Bioprocess Technol., 4, N.6, 996–1011.
2. Ashokkumar M., Rink R., Shestakov S. (2010). Hydrodynamic cavitation - an alternative to ultrasonic food processing // Electronic Journal "Technical Acoustics" (<http://www.ejta.org>), N.11, 1–10.
3. Chemat F., Zill-e-Huma, Khan M.K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction //Ultrasonics Sonochemistry, 18, 813–835
4. Kanthale P.M., Gogate P.R., Pandit A.B., Wilhelm A-M. (2005). Dynamics of cavitation bubbles and design of a hydrodynamic cavitation reactor: cluster approach. //Ultrasonics Sonochem., 12, 441–452.
5. Dolinskiy A.A., Ivanitskiy G.K. (2008). Teplomassoobmen i hidrodinamika v paro-zhidkostnyih dispersnyih sredah. Teplofizicheskiye osnovy diskretno-impulsnogo vvoda energii. Kiyev, Nauk. dumka, 381.

6. Wiita A., Ainavarapu S., Huang H., Fernandez J. (2006). Force-dependent chemical kinetics of disulfide bond reduction observed with single-molecule techniques. //Proc. Natl. Acad. Sci., 103, N.19, 7222–7227.
7. Avdeyeva L. Yu., Ivanitskiy G.K. (2011). Primeneniye gidrodynamichekoi kavitatsii v tehnologicheskoy protsessii polucheniya fosfolipidnykh nanostruktur. // Sovremennaya nauka: issledovaniya, rezultaty, tehnologii. Kiyev, NPVK Trianon, N.2(7), 59–65.
8. Ivanitskiy G.K., Avdeyeva L. Y., Makarenko A. A. (2016). Using the effects of hydrodynamic cavitation for purposeful dynamical action on the supramolecular structures. // Physics of Aerodisperse systems, N.53, 142–151.
9. Ivanitskiy G.K., Nedbayilo A.E (2011). Analiticheskoye issledovaniye kavitatsii v rabochem kolese tsentrobegnykh nasosov // Prom. teplotekhnika, 34, N2, 40–47.
10. Ivanitskiy G.K., Shurchkova Yu.A., Nedbayilo A.E (2012). Ispolzovaniye gidrodynamichekoi kavitatsii dlya razrusheniya bakterialnykh kletok v tehnologii obrabotki moloka. // Prom. teplotekhnika, 34, N.3, 31–39.
11. Ivanitskiy G.K., Gozhenko L.P. (2014.). Analiticheskoye issledovaniye usloviy vozniknoveniya kavitatsii v trubie pulsatsionnogo dispergatora udarnogo tipa. // Prom. teplotekhnika, 36, N.6, 49–56.

УДК 663.918.23

ИСПЫТАНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ЭКСТРАКТОРА В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА

Левтринська Ю.О., аспирант, Терзиев С.Г., д.т.н., доцент
Одесская национальная академия пищевых технологий

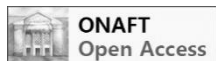
MICROWAVE EXTRACTOR TESTING IN PRODUCTION CONDITIONS

Levtrinska Yu.O., graduate student, Terziev S.G., doctor of technical sciences, associate professor
Odessa National Academy of Food Technologies

Copyright © 2017 by author and the journal “Scientific Works”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Аннотация. Микроволновый противоточный экстрактор – аппарат в котором организуется режим противоточного движения твердой фазы и экстрагента, что способствует более полному извлечению экстрактивных веществ из сырья в экстракт. Основой для выбора режимных и технологических параметров работы экстрактора, таких как расход экстрагента, мощность микроволновых генераторов, степень загрузки массообменных модулей, эквивалентный диаметр частиц сырья, стали исследования каждого из параметров на одном массообменном блоке экстрактора при неподвижном слое продукта и непрерывном движении экстрагента. На основе анализа полученных данных выбран режим работы для запуска экстрактора для производственных испытаний. Проведена апробация микроволнового противоточного экстрактора при получении концентрированного кофейного экстракта. Запуск экстрактора производился в условиях подвода микроволновой энергии, при расходе экстрагента 7 кг/ч. При проведении испытаний экстрактора использовано 3,2 кг сырья (кофе Арабика первого сорта) и получен кофейный концентрат с содержанием сухих веществ 30 % в объеме 3 л. Исследована зависимость степени загрузки экстрактора продуктом и концентрации экстракта на выходе из аппарата. Изучена степень влияния слоя продукта в массообменных модулях и количества кассет. Верность гипотезы, согласно которой на выходе из экстрактора возможно получить кофейный концентрат с содержанием сухих веществ выше 50 %, подтверждается результатами экспериментальных исследований. Проведено прогнозирование, определяющее потенциал данного экстрактора. На основе результатов испытаний возможна дальнейшая оптимизация конструктивных параметров экстрактора для последующей разработки аппарата высокой производительности для нужд производства. Планируется внедрение экстракторов подобной конструкции и производительностью 72 кг/ч в производство.

Abstract. The microwave counter-flow extractor is a device in which one the anti-precise motion of the solid phase (ground coffee grains) and the extractant (prepared water) is organized, which facilitates a more complete extraction of the extractable substances from the raw material into the extract. The basis for selecting the operating and technological parameters of the extractor operation, such as the extractor consumption, the power of the microwave generators, the degree of mass-exchange modules raw material loading, the equivalent diameter of the raw material particles, the study of each of the parameters on one mass exchanger extractor unit with the fixed product layer and continuous movement of the extractant. Based on the analysis of the obtained