

**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ЗБІРНИК ПРАЦЬ

XVII Міжнародної наукової конференції
**«УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ І
ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ ТА
ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ»**

3-8 вересня 2018 р.



**ОДЕСА
2018**

Публікуються доповіді, представлені на XVII Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв» (3 – 8 вересня 2018 р.) і присвячені актуальним проблемам підвищення енергоефективності в сфері АПК, харчових та хімічних виробництвах, розробки та впровадження ресурсо-та енергоефективних технологій та обладнання, альтернативних джерел енергії.

Редакційна колегія:

Доктор техн. наук, професор
Кандидат техн. наук

О.Г. Бурдо
Ю.О. Левтринська

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ОРГКОМІТЕТ

Єгоров <i>Богдан Вікторович</i>	– голова, Одеська національна академія харчових технологій, ректор, д.т.н., професор
Бурдо <i>Олег Григорович</i>	– вчений секретар, Одеська національна академія харчових технологій, д.т.н., професор
Атаманюк <i>Володимир Михайлович</i>	– Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., професор
Васильєв <i>Леонард Леонідович</i>	– Інститут тепло- і масообміну ім. А.В. Ликова, Республіка Білорусь, д.т.н., професор
Гавва <i>Олександр Миколайович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Гумницький <i>Ярослав Михайлович</i>	– Національний університет „Львівська політехніка”, д.т.н., професор
Долинський <i>Анатолій Андрійович</i>	– Інститут технічної теплофізики, почесний директор, д.т.н., академік НАН України
Зав’ялов <i>Владимир Леонідович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Сукманов <i>Валерій Олександрович</i>	– Полтавський університет економіки і торгівлі, д.т.н., професор
Колтун <i>Павло Семенович</i>	– Technident Pty. Ltd., Australia, Dr.
Корнієнко <i>Ярослав Микитович</i>	– Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
Малежик <i>Іван Федорович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Михайлов <i>Валерій Михайлович</i>	– Харківський державний університет харчування та торгівлі, д.т.н., професор
Паламарчук <i>Ігор Павлович</i>	– Національний університет біоресурсів та природокористування України, д.т.н., професор
Снежкін <i>Юрій Федорович</i>	– Інститут технічної теплофізики, директор, д.т.н., академік НАН України
Сорока <i>Петро Гнатович</i>	– Український державний хіміко-технологічний університет, д.т.н., почесний професор
Тасімов <i>Юрій Миколайович</i>	– Віце-президент союзу наукових та інженерних організацій України
Товажнянський <i>Леонід Леонідович</i>	– Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, д.т.н., професор, член-кореспондент НАН України
Ткаченко <i>Станіслав Йосифович</i>	– Вінницький національний технічний університет, г. Вінниця, д.т.н., професор
Черевко <i>Олександр Іванович</i>	– Харківський державний університет харчування та торгівлі, ректор, д.т.н., професор
Шит <i>Михайл Львович</i>	– Інститут енергетики Академії Наук Молдови, к.т.н., в.н.с.
Сухий <i>Константин Михайлович</i>	– ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», д. хім. н., професор

СЕКЦІЯ 2.

**МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ
ПЕРЕНОСУ.
ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ І СИСТЕМ**

9. Neau E. The Soave, Twu and Boston–Mathias alpha functions in cubic equations of state. P. II. Modeling of thermodynamic properties of pure compounds / E. Neau, O. Hernandez-Garduza // Fluid phase equilibria. – 2009. – V. 276. – P. 156–164.

УДК 532.528

УНИФИЦИРОВАННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ КАВИТАЦИОННЫХ РЕАКТОРОВ

Иваницкий Г.К., д.т.н., с.н.с., Недбайло А.Е., к.т.н., Коники А.В., к.т.н.,
Целень Б.Я. к.т.н., Гоженко Л.П., к.т.н.,
Институт технической теплофизики НАН Украины

MODELING CAVITATION REACTORS: A UNIFIED APPROACH

Ivanitsky G.K., DSc., Nedbaylo A.E., PhD., Konyk A.V., PhD,
Tcelen B.Ya., PhD., Gozhenko L.P., PhD.,
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine

Аннотация. Гидродинамическая кавитация является одним из наиболее эффективных способов интенсификации многих технологических процессов, связанных с обработкой жидких продуктов. Изучение явлений кавитации с целью их рационального использования в технологиях требует единого подхода к анализу кавитационных механизмов и прогнозированию их действия на изучаемый объект, вне зависимости от типа кавитационного реактора. Установлено, что в настоящее время отсутствует четкая теоретическая база для понимания возможностей и ограничений используемых кавитационных устройств при решении конкретных задач. В работе обсуждаются пути построения общей математической модели кавитационных реакторов, которая базируется на результатах собственных комплексных исследований по изучению кавитационных процессов, а также на анализе публикаций по изучению механизмов кавитации. Предлагается универсальная математическая модель, которая с учетом основных факторов адекватно описывает динамику парогазовых пузырьков и пузырьков кластеров в широком интервале изменения режимных параметров и без использования ограничивающих допущений. В рамках модели проанализированы такие факторы, как температура и газосодержание жидкости, которые влияют на эффективность кавитационного воздействия. Обсуждаются пути дальнейшей модификации этих моделей применительно к задаче оптимизации работы кавитационных реакторов.

Abstract. Cavitation is known to be one of the most effective method intensification of technological processes related to treatment of liquid products. Various cavitation methods with using various types of hydrodynamic cavitation techniques have presently become remarkably widespread for enhancement of hydrodynamic, chemical, biochemical processes, as well as heat and mass transfer in different production technologies. It is established that, at the present time, there is no clear theoretical basis for understanding the possibilities and limitations of the cavitation devices used in solving specific problems. It is shown that the simulation of the operation of hydrodynamic reactors is based, for the present, on empirical approaches. Obviously, the study of the phenomena of cavitation for the purpose of their rational and effective use in industrial technologies requires a unified approach to the analysis of cavitation mechanisms and the prediction of their action on the object under study, regardless of the type of cavitation reactor. The present work highlights the different aspects of hydrodynamic cavitation including the basic mechanisms, as well as bubble dynamics analysis with recommendations for optimum operating parameters and reactor designs. In this paper we consider ways of developing a general mathematical model of cavitation reactors, which is based both on the results of our own comprehensive research on cavitation methods, and on the analysis of publications on theoretical studies of cavitation mechanisms. Universal mathematical models are proposed that from common thermodynamic positions and with maximum consideration of the determining factors adequately describe the dynamics of single bubbles and bubble clusters in a wide range of regime parameters change, and without using limiting assumptions. Within the framework of the model, a number of factors are considered, such as temperature and gas content of the liquid and some physical mechanisms, which affect the effectiveness of the cavitation effect. The ways of further modification of these models are discussed with regard to the problem of optimizing cavitation reactor operation.

Ключевые слова: гидродинамическая кавитация, математическая модель, паровой пузырек, кластер.

Key words: hydrodynamic cavitation, mathematical model, gas-vapor bubble, cavitation cluster.

Формулировка проблемы. Кавитация сегодня является одним из наиболее действенных способов интенсификации технологических процессов, связанных с обработкой жидких продуктов. Кавитационные методы широко используются в различных промышленных технологиях, прежде всего, в пищевой промышленности, а также в системах водоподготовки и очистки сточных вод. [1-3].

На практике кавитационные механизмы инициируют путем акустического воздействия на жидкость с использованием различных ультразвуковых излучателей [2,3] или за счет создания оптимальных

гидродинамических условий в потоке жидкости [3,4,5]. Для реализации процессов гидродинамической кавитации при решении исследовательских и прикладных задач используются различные типы роторно-пульсационных аппаратов [1,2], сопла Вентури [3-6], пластины с одним или с несколькими отверстиями [3-5], пульсационные диспергаторы [7], центробежные насосы [8]. В ряде практических приложений используются электроразрядная и паровая кавитация [9]. Подробный анализ существующих способов кавитации с целью их возможной классификации выполнен в работе [10].

Выбор способа кавитационного воздействия и типа реактора зависит от поставленной технологической задачи при соблюдении условия минимизации удельных энергозатрат. Очевидно, изучение явлений кавитации с целью их рационального и эффективного использования в промышленных технологиях требует единого подхода к анализу кавитационных механизмов и прогнозирования их действия на изучаемый объект, вне зависимости от типа кавитационного реактора.

В данной работе на основе результатов комплексных исследований по изучению и практическому применению кавитационных методов, проводимых в ИТТФ НАНУ, а также анализа опубликованных работ других авторов по теоретическим исследованиям механизмов кавитации, рассматриваются пути построения общей математической модели кавитационных реакторов.

Принцип работы кавитационных реакторов. Кавитационные устройства предназначены для создания условий, которые обеспечивают формирования в жидкости совокупности паровых пузырьков (т.н. кавитационного кластера), их последующий рост, сжатие и завершающее схлопывание. В момент коллапса пузырьки излучают импульсы давления, которые преобразуются в результирующий мощный энергетический импульс кавитационного кластера. В зоне схлопывания пузырька образуется т.н. “термик” – область жидкости микронного размера с $T_l > 1000^\circ\text{C}$. Эти кратковременные динамические и термические эффекты определяют эффективность кавитационного воздействия на микрообъекты, находящиеся в жидкости внутри и в окрестности кластера.

По принятому определению [1-5], кавитация возникает, если давление в жидкости p_l становится меньше давления насыщенного пара ($p_l < p_{sat}(T_l)$), что приводит к образованию и росту пузырьков, а затем возрастает до значения $p_l > p_{sat}(T_l)$, что ведет к сжатию и последующему коллапсу пузырьков. Это определение в равной мере относится к акустической и к гидродинамической кавитации, где падение и возрастание давления обусловлено периодическим высокочастотным растяжением и сжатием объема жидкости, либо растяжением скоростного потока при прохождении через узкое сечение канала. Однако такое определение неправомерно при описании электроразрядной, конденсационной и других подобных разновидностей паровой кавитации, где эволюция пузырьков осуществляется в изобарических условиях. Моделирование такого типа кавитационных устройств принципиально отличается от моделирования работы гидродинамических и акустических реакторов [9].

В литературе рассматриваются преимущественно модели гидродинамических кавитационных реакторов в связи с их широким использованием в различных технологиях.

Анализ работы гидродинамических кавитационных устройств базируется на двух самостоятельных моделях. Одна из них - модель кавитации – описывает эволюцию пузырьков с момента их образования и до завершающего коллапса, вне зависимости от типа кавитационного реактора. Другая модель, которую можно назвать моделью гидродинамики потока, учитывает конструктивные особенности реактора.

Модель кавитации описывает динамику парового пузырька или совокупности пузырьков в жидкости с температурой $T_\infty = \text{const}$ при заданных начальных значениях радиуса пузырьков R_{b0} , их концентрации N_b и паросодержания β_0 . Изменения радиуса пузырька $R_b(\tau)$ при изменении внешнего давления $p_\infty(\tau)$ обычно определяется с использованием известного уравнения Рейля-Плессета

$$\frac{d^2 R_b}{d\tau^2} = \frac{p_b(\tau) - p_\infty(\tau) - 1,5\rho_l \cdot (dR_b/d\tau)^2 - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu_l \cdot (dR_b/d\tau)}{R}}{\rho_l \cdot R_b} \quad (1)$$

Уравнение (1) решается совместно с уравнениями, описывающими изменение температуры $T_b(\tau)$ и давления пара $p_b(\tau)$ в пузырьке, теплообмен пузырька с жидкостью, кинетику фазовых переходов с учетом изменения температуры жидкости на границе с пузырьком $T_{lR}(\tau)$ и температурные зависимости плотности $\rho_l(T_{lR})$, вязкости жидкости $\rho_l(T_{lR})$ и поверхностного натяжения $\rho_l(T_{lR})$. Уравнение (1) используется также в системе уравнений динамики кавитационного кластера. Кроме указанных выше уравнений эта система должна включать также уравнения, описывающие силовое и термическое взаимодействие пузырьков, что позволяет рассчитывать нестационарные поля скоростей, температур и давлений в жидкости между пузырьками кластера, где присутствуют обрабатываемые микрообъекты.

Для адекватного описания кавитационных механизмов необходим строгий учет всех указанных выше факторов. Однако даже в наиболее разработанных моделях реакторов описание процессов кавитации

проводится с большим количеством упрощающих допущений: постоянство параметров ρ_l , μ_l и σ , адиабатичность процесса, постоянство давления пара в пузырьке ($p_b = p_{sat}(T_{l\infty})$) [3,4,7]. В ряде случаев расчеты проводятся для единичного пузырька, а при анализе поведения кластера взаимодействие пузырьков не учитывается [1,4,5]. В большинстве моделей используется неоправданно большое число эмпирических или подгоночных параметров. По мнению авторов работы [5], до сих пор не разработаны теоретические основы, позволяющие идентифицировать ключевые параметры кавитации, а проблема исследования механизмов кавитации фактически сводится к тестированию поведения «черного ящика».

Анализ публикаций по теме позволяет утверждать об отсутствии в настоящее время обоснованной достоверной модели кавитации.

Модель гидродинамики канала описывает изменение во времени давления $p_l = f(\tau)$ в фиксированном элементарном объеме жидкости при ее течении через канал реактора. Рассчитанные в данной модели значения $p_l(\tau)$, входят в уравнение (1), что обеспечивает возможность решения этого уравнения. Таким образом, зависимость $p_l = f(\tau)$, рассчитанная для канала с заданной геометрией, позволяет определить поведение кавитационного кластера в конкретном реакторе. Очевидно, при описании акустической кавитации при заданных значениях частоты и интенсивности ультразвукового поля зависимость $p_l = f(\tau)$ описывается синусоидальной функцией. Для кавитационных реакторов типа сопла Вентури или пластинки с отверстиями зависимость $p_l = f(\tau)$ рассчитывается с использованием уравнения Бернулли [1,5] или усредненного по сечению уравнения Навье-Стокса [3,4]. При необходимости, эти уравнения дополняются уравнениями модели турбулентности [4]. Для решения задач оптимизации конструктивно-режимных параметров кавитационных реакторов этого типа используются готовые программные продукты типа ANSYS. Особую трудность вызывают теоретическое описание нестационарных гидродинамических процессов в роторно-пульсационных аппаратах, которые используются в различных технологиях в качестве эффективных кавитационных реакторов. Это связано со сложностью конструкции таких устройств и необходимостью учета многообразных факторов воздействия на обрабатываемую среду [1,2].

Анализ кавитационных механизмов. В Институте технической теплофизики НАНУ разработаны универсальные математические модели динамики единичного парогазового пузырька и динамики ансамбля пузырьков [9]. Рассмотрены принципы построения таких моделей, приведены полные системы уравнений и представлены результаты апробации моделей на экспериментальных данных различных авторов. Модели в рамках одной системы уравнений без введения дополнительных допущений описывают поведение пузырьков в процессах кипения, а также в процессах гидродинамической, паровой и акустической кавитации во всем температурном интервале существования жидкой фазы вплоть до критической точки. Особенностью моделей является описание межфазного тепло- и массообмена в рамках молекулярно-кинетической теории, а также представление в аналитическом виде зависимостей от температуры основных теплофизических характеристик обеих фаз.

Модель динамики ансамбля пузырьков, учитывающая силовое и термическое взаимодействие пузырьков, позволяет представить в микромасштабе текущую картину полей температуры, давлений и скоростей в межпузырьковом пространстве кластера и рассчитать изменение усредненных по объему давления и температуры жидкости внутри кластера. Эти модели успешно использовались для расчета кавитационных реакторов различного типа при решении конкретных технологических задач [6-8]. С помощью модели можно проанализировать влияние различных факторов на процесс кавитации.

Как было отмечено выше, для создания кавитации необходимо, чтобы давление в жидкости $p_l(\tau)$ резко снизилось до величины p_{min} , много меньшей давления насыщенного пара ($p_{min} \ll p_{sat}(T_l)$), а затем быстро возросло до давления $p_k > p_{sat}(T_l)$. Эти условия, схематически представленные на рис.1, в равной мере относятся и к акустической и к гидродинамической кавитации.

Принципиально важным является, что для начала формирования кавитационных пузырьков значение p_{min} должно находиться в области отрицательных давлений ($p_{min} < 0$), когда жидкость пребывает в состоянии растяжения. В теории акустической кавитации это является очевидным, но при анализе процессов гидродинамической кавитации практически во всех известных работах по кавитации априори принимается, что $0 < p_{min} < p_{sat}(T_l)$ [1,3,5]. Такой подход исключает возможность описания работы реактора, поскольку из рассмотрения выпадает вопрос о направленном контроле концентрации и начальных размером пузырьков кавитационного кластера. Необходимость выполнения условия $p_{min} \ll 0$ детально рассмотрена в работе [11.]. Представленные на рис.2 расчетные данные свидетельствуют что условие $p_{min} \ll 0$ выполняется для любых типов кавитационных реакторов [4-9].

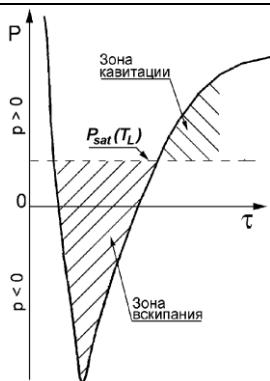
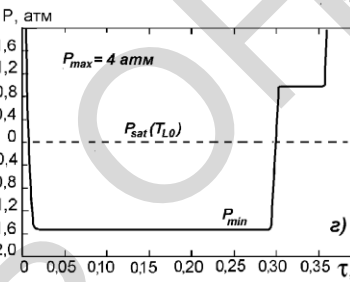
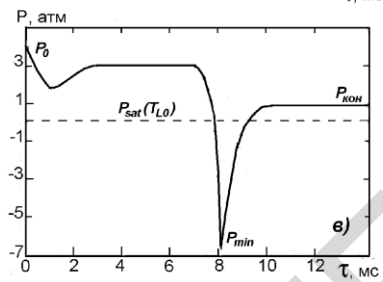
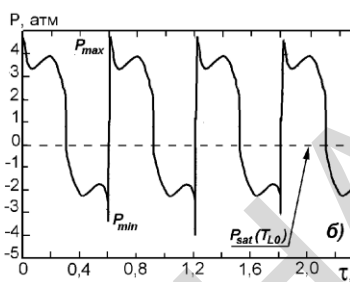
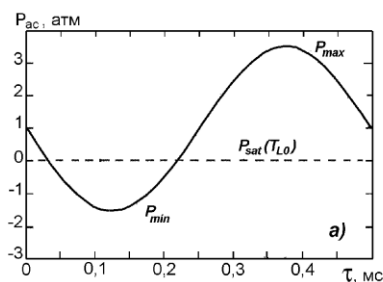


Рис.1 Схема изменения давления в жидкости для реализации кавитации.

Практика показывает [3-5,7,8], что уровень кавитационного воздействия в сильной степени зависит от газосодержания жидкости, или относительной доли нейтрального газа в исходных микророзрышках. Это хорошо согласуется с результатами расчета по модели [9], представленными на рис.3. Даже небольшое содержание газа в пузырьке резко снижает степень динамического воздействия. Это объясняется тем, что наличие газа препятствует сжатию пузырька до минимальных размеров R_{min} , а это вообще исключает возможность его схлопывания с последующим излучением высокоамплитудного импульса давления [15].

Для эффективной работы реактора необходимо обеспечить предельно высокую скорость понижения давления жидкости до отрицательных значений P_{min} , и таким образом инициировать рост микро- и наноразмерных паровых зародышей с относительно малым содержанием нейтральных газов. В акустической кавитации это достигается за счет повышения частоты и интенсивности звукового поля.

Еще одним важным фактором, определяющим, уровень динамического и термического воздействия на объект в результате коллапса кавитационного кластера, является температура жидкости $T_{l\infty}$.



а) ультразвуковой реактор; б) роторно-пульсационный аппарат;
в) сопло Вентури; г) пульсационный диспергатор

Рис.2. Характер изменения со временем давления в объеме обрабатываемой жидкости в кавитационных реакторах различного типа. Расчет по модели [9]

акустического давления P_{ac} (интенсивности поля). На обеих кривых наблюдаются ярко выраженный максимум при температуре $T_{l\infty} \approx 55^\circ\text{C}$. На рисунке пунктиром представлены данные эксперимента [2] по эрозионной потере массы алюминиевого образца за определенный промежуток времени при кавитационном ультразвуковом воздействии в зависимости от температуры жидкости. Видно, что максимальное эрозионное воздействие регистрируется при той же температуре. Причина появления максимума на кривых зависимости интенсивности кавитационных воздействий от температуры именно в области температур $T_{l\infty} = 45 \div 55^\circ\text{C}$ пока является предметом дискуссий. Тем не менее, такой характер зависимости степени кавитационного воздействия от температуры жидкости следует принимать во внимание при использовании кавитации, например, в технологических операциях экстрагирования или стерилизации, где величина температуры жидкости является важным фактором интенсивности процесса.

При коллапсе единичного пузырька амплитуда импульса давления быстро и монотонно снижается по мере повышения температуры $T_{l\infty}$ [9]. Однако, как показывают эксперименты [2, 7], при схлопывании кавитационного кластера, на зависимостях амплитуды импульса давления от температуры регистрируется максимум в области температур $T_{l\infty} = 45 \div 55^\circ\text{C}$. Это характерно и для гидродинамической, и для акустической кавитации.

На рис.4 показаны рассчитанные по модели [9] температурные зависимости амплитуды импульсов давления $P_{imp} = f(T_{l\infty})$ при схлопывании кавитационного кластера в акустическом поле с частотой $f_{ac} = 20$ кГц при двух значениях

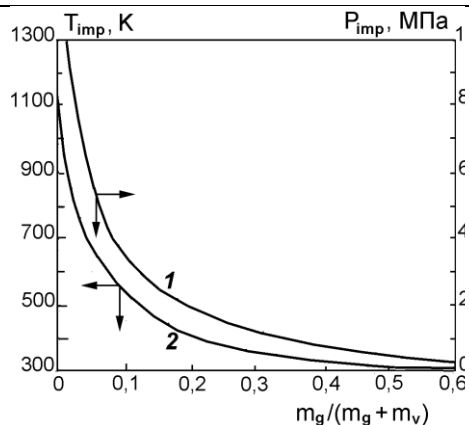
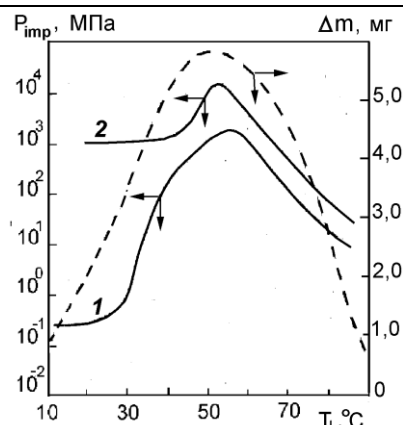


Рис.3. Зависимость температуры (1) и давления (2) в предельно сжатом кавитационном пузырьке от массового содержания газа.



1. $P_{ac} = 100$ кПа; 2. $P_{ac} = 120$ кПа; частота поля $f_{ac} = 20$ кГц; $N_b = 10^5$ z^{-1}

Рис.4. Влияние температуры T_L на амплитуду давления P_{imp} при коллапсе кластера в акустическом поле при двух значениях давления P_{ac} (сплошные линии) и на потерю массы алюминиевого образца Δm при воздействии акустического поля [2] (пунктир)

С помощью модели можно получить большой объем полезной информации, в том числе касающейся специфики процессов, протекающих на наиболее интересной и важной стадии коллапса пузырька. Именно на этой чрезвычайно короткой стадии происходят интенсивные энергетические преобразования.

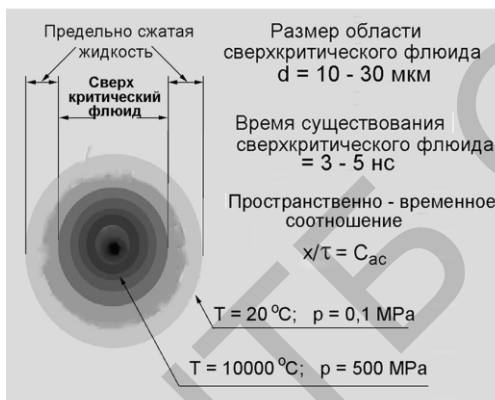
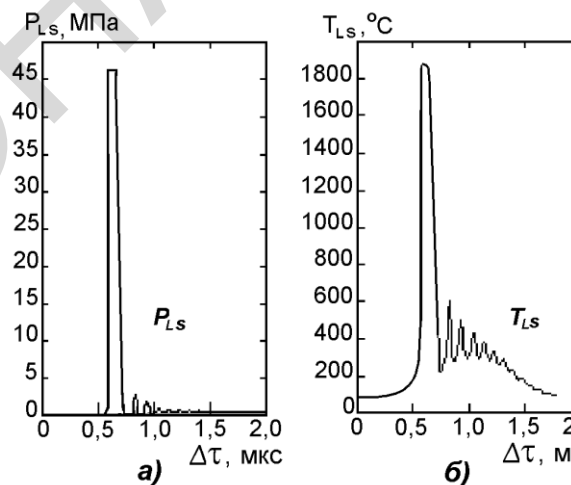


Рис.5. Схематическое представление предельно сжатого кавитационного пузырька в состоянии сверхкритического флюида.



$R_{bo} = 2,5$ мкм; $T_{l0} = 20^\circ\text{C}$

Рис.6. Характер изменения со временем давления P_{Ls} и температуры T_{Ls} в жидкости на границе с пузырьком на завершающей стадии схлопывания

Вследствие адиабатичности процесса завершающей стадии сжатия, температура внутри предельно сжатого пузырька существенно превышает критическую температуру, благодаря чему пузырек и его ближайшее окружение переходят в состояние сверхкритического флюида (СКФ), где не существует различия между твердой и жидкой фазой. СКФ способен, подобно газам, просачиваться сквозь твердые материалы и растворять вещества, подобно жидкостям. Известно, например, что вода в состоянии СКФ может успешно использоваться как заменитель органических растворителей во многих промышленных и лабораторных процессах. Наиболее показательные характеристики СКФ показаны на рис.5.

На рис.6 представлено рассчитанное по модели изменение давления (а) и температуры жидкости (б) на границе с пузырьком, за наносекундный промежуток времени пребывания его в состоянии СКФ.

Выводы. Изучение явлений кавитации с целью их рационального и эффективного использования в промышленных технологиях, требует единого подхода к описанию кавитационных механизмов вне

зависимости от типа кавитационного устройства. В рамках этой концепции проводится разработка и совершенствование математической модели, которая с учетом определяющих факторов и адекватным представлением теплофизических системных параметров обеспечит возможность оценивать и контролировать уровень воздействия на жидкие дисперсные системы, в зависимости от конструктивных и режимных параметров кавитационных реакторов. Данная работа рассматривается как начальный этап в направлении обоснования рациональных конструкций и оптимальных режимов работы кавитирующих устройств при решении различных технологических задач.

Литература

1. Ashokkumar M., Krasulya O., Rink R. A New Look at Cavitation and the Applications of Its Liquid-Phase Effects in the Processing of Food and Fuel // Appl. Phys. Research.–2012. –Vol.4, No.1.–pp.19–29.
2. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико- технологических процессах.- М.: Химия, 1983.–191 с.
3. Parag R. Gogate P.R. Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing //Food Bioprocess Technol.–2011. –Vol.4, No.6, pp 996–1011.
4. Rooze, J. Cavitation in gas-saturated liquids. –Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven –2012.–120 pp. DOI:10.6100/IR732583
5. Arrojo S., Benito Y.A theoretical study of hydrodynamic cavitation. Ultrasonics Sonochemistry, 2008. –Vol.15, No3. –pp.203–211.
6. 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.
7. Іваницький Г.К., Чайка О.І., Гоженко Л.П. Застосування кавітаційного реактора пульсаційного типу для екстрагування з рослинної сировини // Наук.і праці ОНАХТ.2015. –вип..47, Т.2. С.138–142.
8. Іваницький Г.К., Недбайло А.Е. Аналитическое исследование кавитации в рабочем колесе центробежных насосов. //Пром. теплотехника. –2011. –Т.34, №2. –С.40-47.
9. Долинский А.А., Іваницький Г.К. Теплообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. –Киев: Наук. думка, 2008. –381 с.
10. Анисимов В.В. Ермаков П. П. Классификация способов создания кавитации // Наукові праці ОНАХТ.– 2012.вип. 41, Т.1. –С.30–35.
11. Іваницький Г.К. Численное исследование поведения пузырькового кластера в процессах гидродинамической кавитации. // Наукові праці ОНАХТ.–2017.–Т.81, вип.1, С.114–120.

УДК 66.061

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У АПАРАТІ З ПНЕВМАТИЧНИМ ПЕРЕМІШУВАННЯМ

О. М. Данилюк¹, В. М. Атаманюк, Я. М. Гумницький
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

MODELING OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN PNEUMATIC MIXING APPARATUS

O. M. Danyliuk¹, V. M. Atamanuk, J. M. Gumnitsky
National University "Lvivska Politekhnik", Lviv

Анотація. Проведено огляд і аналіз літературних джерел, які відображають основні результати та напрямки досліджень процесу розчинення під час пневматичного перемішування. Вони показують, які проблемні напрями науки потребують детальніших досліджень. Обґрунтовано вибір методу розчинення під час пневматичного перемішування розчину. Розглянуто переваги даного методу.

Експериментально досліджено процес руху бульбашки стисненого повітря у водному розчині бензойної кислоти в апараті для розчинення під час пневматичного перемішування. Описано процес утворення бульбашок в умовах квазістатичного режиму диспергування стисненим повітрям розчину. Визначено відривний розмір бульбашок повітря з отворів барботеру. Розраховані швидкість спливання бульбашок повітря в апараті та частота їх утворення з отворів барботеру. Розраховано фіктивні швидкості руху бульбашок стисненого повітря в апараті за різних витрат повітря. Наведено результати розрахунків дисипації енергії в апараті для розчинення бензойної кислоти. Визначені параметри руху бульбашки стисненого повітря

МОДЕЛЮВАННЯ РЕАКТОРА НАСИЧЕННЯ У ВИРОБНИЦТВІ ЦУКАТІВ	
Гузьова І.О., Атаманюк В.М.	78
УНИФИЦІРОВАННИЙ ПОДХОД К МОДЕЛІРОВАНИЮ КАВИТАЦІОННИХ РЕАКТОРОВ	
Иваницкий Г.К., Недбайло А.Е., Коник А.В., Целень Б.Я., Гоженко Л.П.	84
МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У АПАРАТІ З ПНЕВМАТИЧНИМ ПЕРЕМІШУВАННЯМ	
Данилюк О. М., Атаманюк В.М., Гумницький Я.М.	89
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ УВАРЮВАННЯ СОКУ ТА ЙОГО ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	
Маяк О.А., Сардаров А.М., Костенко С.М., Гриценко О.Ю., Шершньов Г.Г.	94
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКИ И ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ БИОМАССЫ	
Сороковая Н.Н., Коринчук Д.Н.	99

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ. РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТА ЕКОЛОГІЧНО-БЕЗПЕЧНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ АДСОРБЦІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ ГЕЛПОУСТАНОВОК	
Беляновська О.А., Пустовой Г. М., Суха І.В., Губинський М.В., Литовченко Р.Д., Сухий К.М.	106
ЗАСТОСУВАННЯ НВЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ ВИЛУЧЕННІ БІЛКІВ ЗІ СТІЧНИХ ВОД ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ	
Сабадаш В.В., Гумницький Я.М.	111
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУШІННЯ НАСІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР ІЗ ТЕПЛОВИМИ НАСОСАМИ	
Пазюк В.М.	116
ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА СОЛНЕЧНОЙ УСТАНОВКИ	
Селихов Ю.А., Коцаренко В.А.	120
ВИКОРИСТАННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБАВОК У ПРОЦЕСАХ КОМПОСТУВАННЯ ХАРЧОВОЇ СКЛАДОВОЇ ТВЕРДИХ МУНІЦИПАЛЬНИХ ВІДХОДІВ	
Крусір Г.В., Сагдєєва О.А., Чернишова О.О., Мадані М.М., Гаркович О.Л.	125
ПРО ЗБЕРЕЖЕННЯ ХАРЧОВОЇ ЦІННОСТІ ТА ЗАОЩАДЖЕННЯ РЕСУРСІВ ПРИ ПЕРЕРОБЦІ ТОМАТІВ	
Гаврилов О.В.	131
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РЕЖИМИ РОБОТИ БАРАБАННОЇ СУШАРКИ КОМПЛЕКСУ ВИРОБНИЦТВА КОМПОЗИЦІЙНОГО БІОПАЛИВА	
Коринчук Д. М., Снєжкін Ю.Ф., Бунецький В. О.	134
ТЕХНОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ УТИЛІЗАЦІЇ-МОДИФІКАЦІЇ ПОЛІМЕРНОЇ ТАРИ ТА ПАКУВАННЯ	
Бухкало С.І.	140
ЗАСТОСУВАННЯ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ РІЗНОГО ТИПУ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННИХ КОМПЛЕКСІВ	
Ощипок І.М.	143

ІННОВАЦІЙНЕ ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ, ФАРМАЦЕВТИЧНИХ, ХІМІЧНИХ ТА ПАРФУМЕРНИХ ВИРОБНИЦТВ

АНАЛІЗ СИРОВИНИ, ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ХАРЧОВИХ ПОРОШКІВ	
Потапов В.О., Євлаш В.В., Педорич І.П.	149
ІНФРАЧЕРВОНЕ СУШІННЯ ЗЕРНОВОЇ ПРОДУКЦІЇ З ВІБРОХВИЛЬОВИМ КОНВЕСРОМ. ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ	
Паламарчук І.П., Кюрчев С.В., Верхованцева В.О.	153
РАЦІОНАЛЬНЕ КОМПОНУВАННЯ ФАЗНИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ З МОДУЛЬНИМИ СЕПАРАЦІЙНИМИ ПРИСТРОЯМИ	