

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЗБІРНИК ПРАЦЬ

*VII Міжнародної науково-практичної
конференції*

**«ІННОВАЦІЙНІ
ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ»**

9-13 вересня 2019 р.



ОДЕСА
2019

Публікуються доповіді, представлені на XVIII Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв» (9 – 13 вересня 2019 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
Я.О. Масельська

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 |
| Сухий <i>Константин Михайлович</i> | – ДВНЗ "Український державний хіміко-технологічний університет", д.хім.н., 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, 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 |

СЕКЦІЯ 1.
ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ
ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

9. Khomenko, V.H. (2012). Patent Ukrainy na korysnu model' № 69475 «Ekolohichno chysti pelety tverdogo palyva». Kyiv: Derzhavne patentne vidomstvo Ukrainy.
10. Kolisnichenko, O.M., Klymenko, O. H. (2005). Deklaratsiynyy patent Ukrainy na korysnu model' № 5426 «Sposib otrymannya tverdogo orhanichnogo palyva z luz-hy sonyashnyka». Kyiv: Derzhavne patentne vidomstvo Ukrainy.
11. Tumanov, Yu.. (2005). Podvodnyye kamni bioenergetiki. Lesprominform, (3), 54–56.
12. Zotova, Ye. V., Safonov, A. O., & Platonov, A. D. (2014). Analiticheskoye issledovaniye parametrov, opredelyayushchikh tekhnologiyu proizvodstva drevesnykh pellet. Lesotekhnicheskyy zhurnal, 4(1 (13)). 127 – 132.
13. Galyavetdinov, N. R., & Nasybullina, A. F. (2014). Pazrabotka tekhnologii polucheniya drevesnykh toplivnykh granul s povyshennoy energeticheskoy effektivnost'yu. Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika, 2 (3–4), 27 – 31.
14. Myasoedova, V. (2007). Kompozitsii dlya pellet i briketov. The Bioenergy International. Russia, (3), 6 – 7.
15. Gomonay, M. V. (2006). Proizvodstvo toplivnykh briketov. Drevesnoye syr'ye, oborudovaniye, tekhnologii, rezhimy raboty: monografiya. M.: GOU VPO MGUL.
16. Tarasov, D., Shahi, Ch., Leitch, M. (2013) Effect of additives on wood pellet physical and thermal characteristics: Reviw // ISRN Forestry. 2013.
17. Lu, D., Tabil, L. G., Wang, D., Wang, G., & Emami, S. (2014). Experimental trials to make wheat straw pellets with wood residue and binders. Biomass and Bioenergy, 69, 287–296.
18. Chou, C. S., Lin, S. H., & Lu, W. C. (2009). Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran. Fuel processing technology, 90 (7–8), 980–987.
19. Mustelier, N. L., Almeida, M. F., Cavalheiro, J., & Castro, F. (2012). Evaluation of pellets produced with undergrowth to be used as biofuel. Waste and Biomass Valorization, 3 (3), 285–294.
20. Tabakaev, R.B., Zavorin, A.S., Kazakov, A.V., Plakhova, T.M. (2013) Pat. Rosciyskoy Federatsii № 2484125 «Sposob izgotovleniya toplivnykh briketov iz biomassy».
21. Philip H. Steel, Venkata K. Penmetsa (2013) Pat. US 20130031830 «Method for producing binders and combustible composite materials and composition produced therefrom».
22. Borisov, Yu. (2004). Yevropeyskoye kachestvo. Lesprominform (9), 86 – 87

УДК 532.528

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГАЗАЦИИ ЖИДКОСТИ В КАВИТАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЯХ. ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

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

STUDY OF LIQUID DEGASSING IN CAVITATING FLOWS. PROBLEMS OF MODELING

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

Аннотация. Гидродинамическая кавитация используется в технологиях дегазации как эффективный метод удаления растворенных газов и/или свободного газа в виде пузырьков из различных жидкостей. Математические модели кавитационной дегазации недостаточно представлены в литературе. Поэтому создание достоверной модели, описывающих дегазацию в кавитационных течениях является важной фундаментальной и прикладной задачей. В статье рассматриваются основные проблемы, которые затрудняют создание надежной математической модели. С целью разработки такой модели нами был выполнен вычислительный эксперимент по деаэрации воды с использованием сопла Вентури в качестве гидродинамического кавитатора. Цель исследования заключается в установлении корреляции между характеристиками потока и кинетикой кавитационного вскипания жидкости при сужении потока из-за присутствия в ней пузырьков свободного газа. Установлено влияние геометрии сопла и режимных параметров на эволюцию кавитационного кластера и на уровень динамических эффектов в потоке жидкости в сопле. Описана методика удаления растворенных или свободных газов из жидкости, которая под действием высокого давления течет через сопло со скоростью достаточной для активации газовых зародышей и начала кавитационного вскипания. Кавитатор на выходе соединен через короткую трубу с вакуумируемой емкостью. Показана необходимость при исследовании дегазации определенной жидкости провести предварительный анализ содержания в ней свободного газа. Рассмотрено влияние начального размера зародышей газа и их концентрации в жидкости на интенсивность процесса кавитационной дегазации.

Результаты этого исследования могут быть полезны при выборе и обосновании рациональной конструкции кавитационного дегазатора и оптимальных режимов его работы.

Abstract. Hydrodynamic cavitation is used in degassing technologies as an effective method for removing dissolved gases and/or free gas in the form of bubbles from various liquids, Mathematical models of the degassing in cavitating flows are not yet developed and presented in the literature quite insufficiently. Therefore, development of a reliable model for simultaneous cavitation and liquid degassing is an important fundamental and applied task. Key issues that make it difficult to create a reliable mathematical model for the degassing of liquids are considered. In order to develop the mathematical model of liquid degassing, computational experiments on water deaeration were performed using the profiled Venturi nozzle as a hydrodynamic cavitator. The aim of the present investigation is to find a correlation between global hydrodynamic flow characteristics and cavitation induced undissolved gas fractions generated behind generic flow constrictions such as an orifice or Venturi tube. Evolution of the cavitation cluster and the level of the dynamic cavitation effects in liquid flow within a Venturi nozzle, depending on the design features and the mode of operation of this type cavitator, are considered. . A system is described for rapidly remove dissolved gasses or volatile contaminants from a liquid, which is forced at a sufficient pressure and velocity through a Venturi nozzle, designed and operated in a fashion to produce vapor- gas micro-bubbles. The outlet of the cavitator is connected through a short pipe with a vacuum tank, in which a constant pressure is maintained close to the saturated vapor pressure of the processed liquid at a given temperature. It was shown, that in any cavitation degassing study the liquid must be monitored by measuring the number of nuclei present in the liquid. The influence of the initial size of gas nuclei and the concentration in the liquid on the intensity of the cavitation degassing process is considered.

The results of this study may be useful in selecting and justifying the rational design of the cavitation degasser and the optimal modes of its operation.

Ключевые слова: кавитационная дегазация, деаэрация, кавитационный кластер, газовые зародыши, сопло Вентури.

Key words: cavitation degassing, deaeration, cavitation cluster, gaseous nuclei, Venturi nozzle.

Введение. Технология кавитационной дегазации (КДГ) жидкостей применяются в различных производствах – в пищевой, химической отраслях промышленности, в энергетике, металлургии, в системах водоподготовки

Методы КДГ используются при необходимости удаления их жидкости свободного газа, всегда присутствующего в жидкости в виде микропузырьков, а также для деаэрации воды. Содержащиеся в жидкости свободные газы, такие как O_2, CO_2, H_2S , химически более агрессивны, чем те же газы в растворенном состоянии [1,2]. Присутствуя в обычной воде, они выступают в качестве катализаторов коррозионных процессов. Метод особенно эффективен при дегазации пересыщенных жидкостей, когда количество свободного газа в пузырьковой форме существенно превышает его равновесную концентрация. Так, конденсат на выходе из котлоагрегата содержит 70 мг/л CO_2 , хотя его растворимость в воде при 20°C составляет только 0,47 мг/л. Кавитационные методы отличаются высокой производительностью и низкими энергозатратами по сравнению с другими методами дегазации.

Основные принципы кавитационной дегазации. Для реализации явлений кавитации необходимо быстро сбросить давление в жидкости до значений ниже давления насыщенного пара при данной температуре, ($p_1 < p_{sat}(T_1)$), что приводит к вскипанию жидкости – формированию и быстрому росту ансамбля парогазовых пузырьков, т.н. кавитационного кластера. Последующее повышение давления до значений $p_1 > p_{sat}(T_1)$ приводит к быстрому сжатию пузырьков и их коллапсу (схлопыванию) с выделением высокоамплитудного импульса давления ($p_{imp, \infty} 100 \div 500$ МПа). [1-5]

Способность создавать сильные дискретно-импульсные динамические воздействия делают кавитацию одним из наиболее действенных способов достижения высоких энергетических показателей в технологиях, связанных с обработкой жидких дисперсных сред. Кавитационные механизмы успешно используются сегодня в биотехнологиях, благодаря возможности оказывать направленное действие на микро- и нано уровне на супрамолекулярные структуры, клетки микроорганизмов, управлять кинетикой протекания химических и биохимических реакций в растворах [5].

Известно, что эффективность кавитационного воздействия в этих операциях тем выше, чем меньше начальное газосодержание жидкости [2,4]. Поэтому во многих кавитационных технологиях предварительная деаэрация жидкости является важной стадией проведения операции [1,6].

Явления гидродинамической кавитации возникают в гидравлических системах, где поток жидкости претерпевает местное сужение с последующим расширением, например, в запорных и регулирующих органах, диафрагмах и др. В лабораторных исследованиях обычно используются сопла Вентури и диафрагмы с одним или несколькими отверстиями, схемы которых приведены на рис.1. Эти же устройства применяются и для изучения механизма дегазации жидкостей в кавитационных течениях]. В зоне сужения потока, где выполняется условие $p_1 < p_{sat}(T_1)$, происходит интенсивный рост парогазовых пузырьков, которые необходимо затем удалить из жидкости, исключив при этом возможность коллапса пузырьков на второй стадии процесса ($p_1 > p_{sat}(T_1)$).

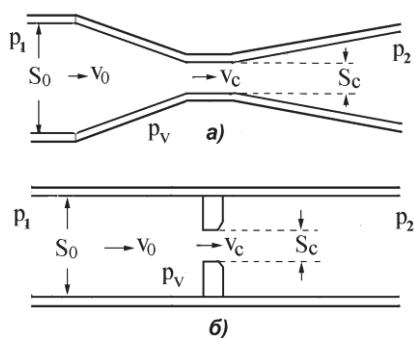


Рис. 1. Схема сопла Вентури (а) и пластинки с отверстием (б).

В данной статье кратко рассмотрены основные проблемы и задачи, связанные с моделированием процессов КДГ, и обсуждаются возможные пути их решения.

Анализ проблемы и последних публикаций. Моделирование процессов КДГ, базируется на анализе результатов экспериментов по деаэрации жидкости (воды), проводимых с использованием в качестве кавитатора сопла Вентури [5,8,9-11] или пластинки с отверстием [5,7]. Обработываемая жидкость (обычно вода) изначально находится в емкости, где с помощью воздушного компрессора поддерживается давление в диапазоне $p_1 \approx 1 \div 10$ бар, и где вода под действием давления насыщается воздухом. Через кавитатор жидкость подается в емкость с пониженным давлением $p_2 > p_1$, которое контролируется манометром. С помощью ротаметра измеряется расход жидкости G_v , что позволяет рассчитать скорость потока на входе в кавитатор $v_l = G_v/S_l$ и его скорость в узком сечении $v_s = G_v/S_c$, где S_l и S_c - соответственно, площадь входного и узкого сечений кавитатора. (см.рис.1). При заданном $p_2 = p_{vac}$ расход меняется за счет изменения давление на входе p_1 .

Проблема 1. Эффективность процессов КДГ зависит от исходного газосодержания исследуемой жидкости, концентрации в ней свободного газа, а также от начального распределения микророзышей по размеру. Эти параметры, в качестве начальных условий, должны содержаться в модели, предназначенной для адекватного описание этих процессов. Существующие сегодня акустические и оптические методы регистрации микророзышей в жидкости дают только косвенную информацию относительно этих параметров. [1,2,6,8]. Известно, что основное количество свободного газа в воде содержится в наноразмерных пузырьках с концентрацией $N_{b0} \approx 10^{15} \text{ м}^{-3}$ [1,6]. Опубликованы данные относительно распределению по размеру микропузырьков воздуха в воде в интервале $R_0 = 3 \div 300$ мкм [6]. Проблема заключается в том, что даже при наличии такого рода данных их нельзя включить в модель. Стандартные математические модели способны описывать поведение только монодисперсного ансамбля пузырьков с заданной концентрацией и заданным начальным размером. Использование усредненных значений R_0 и N_{b0} приводит к большим погрешностям. Необходимо искать возможности рационального использования существующих модели для получения полезной информации.

Проблема 2. Модели, описывающие процессы КДГ, базируются на динамике единичного пузырька с использованием известного уравнения Релея Плессета [1,2,5,7,9]. Для описания эволюции совокупности пузырьков рассматривается изначально существующий сферический кластер с радиусом r_0 , состоящий из N микропузырьков одинакового размера. Рост кластера при сбросе давления обусловлен ростом единичного пузырька без какого либо учета силового и термического взаимодействия, которые собственно и определяют интенсивность парообразования. Такие модели содержат большое число ограничений и подгоночных параметров, что облегчает достижение согласия с экспериментом. Такие упрощенные модели исключают возможность адекватного описания реальных процессов.

Проблема 3. Современные методики исследования процессов КДГ предусматривают возможность оптических измерений в пузырьковом потоке. С помощью видеосъемки под микроскопом или снятия и последующего анализа голограмм можно зафиксировать появление первых пузырьков для точной регистрации начала кавитации, определить размер и концентрацию пузырьков, структуру потока и т.п. Для этого в эксперименте исследуют каналы прямоугольного поперечного сечения с плоскими стеклянными стенками [7-9]. В частности, в качестве сопла Вентури используют два широких прямоугольных канала, соединенных узкой прямоугольной "горловиной" [7,9]. Такие конструкции обеспечивают высокое качество оптических измерений, но существенно искажают топологию, характер течения и общую картину кавитационных процессов. Вместе с тем, результаты эксперимента, проведенного на таких устройствах анализируются с помощью стандартных моделей, описывающих течения в цилиндрических каналах. При этом сами авторы указывают на недостатки такого подхода [1,8].

Проблема 4. В моделях процессов КДГ рассматривается преимущественно условие формирования паргазовой фазы в потоке на участке от входа в кавитатор до его узкого сечения. Существующие модели пока еще не могут адекватно описывать структуру и характеристики двухфазного потока на пути от кавитатора до вакуумной емкости. Видеосъемка указывает на зависимость структуры потока от размеров и формы кавитатора, а также от величины давления на входе и начальной загазованности жидкости. Наблюдается

появление пристеночных суперкаверн, коалесценция пузырьков, в некоторых случаях - инверсия потока и другие явления, Трудности моделирования двухфазных потоков пузырьковой и капельной структуры и кавитационных течений обсуждаются в работе [1,9].

Ниже представлены результаты вычислительного эксперимента по кавитационной деаэрации воды, выполненной на основе унифицированной модели кавитационных процессов.

Методика исследования. С целью разработки математической модели КГД проведены вычислительные эксперименты по деаэрации воды с использованием в качестве кавитатора сопла Вентури, что позволяет генерировать больше пузырьков и увеличивать их время жизни, по сравнению с пластинкой с отверстиями [1,5,6], а также обеспечивает возможность проведения более точный теоретический анализ [1].

В данном исследовании использовалось сопло Вентури следующей геометрии: угол раскрытия конфузора $\alpha_{\text{con}}=60^\circ$, угол раскрытия диффузора α_{dif} , диаметр канала перед конфузуром и на выходе из диффузора $D_0=5$ см, длина горловины сопла $L_{\text{thr}}=0,2D_0$. Исследовались сопла с четырьмя диаметрами горловины D_{thr} - 1 см, 2 см, 3 см и 4 см. Длина канала от кавитатора до входа в вакуумную емкость $L_{\text{thr}}=2D_0=\text{const}$. Давление в вакуумной камере $p_{\text{vac}}=0,2$ атм = const. Результаты исследования, представленные в данной статье, получены при давлении на входе в кавитатор $p_{\text{vc}} = 4$ атм.

Анализ процесса формирования, роста и последующей эволюции парогазовых пузырьков выполнен на основе созданной в ИТТФ НАНУ математической модели динамики пузырькового ансамбля [3]. В [3,4,12] приведены примеры использования модели для описания кавитационных явлений.

В отличие от известных моделей данная модель учитывает силовое взаимодействие пузырьков в ансамбле, что позволяет рассчитывать давление внутри кластера ($p_{cl} = f(\tau)$) и определить момент начала кавитации. В модели использованы общепринятые допущения о монодисперсности пузырьков и об отсутствии их дробления и коагуляции. В число начальных условий входит радиус газовых зародышей R_0 и их массовая концентрация $N_b(\text{г}^{-1})$ которая считается постоянной на протяжении всего процесса. Изменение давления в жидкости на участке от входа в конфузур и до выходы из горловины ($p_l f(\tau)$) определялось по уравнению Бернулли, которое входит в число базовых уравнений модели

В данном исследовании проведен многофакторный вычислительный эксперимент по переменным R_0 , N_b и d_{thr} . Исследования проведены при температуре воды $T_f=20^\circ\text{C}$.

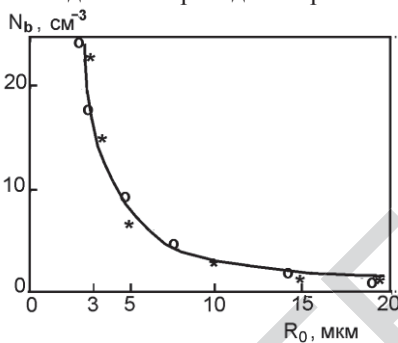


Рис.2. Распределение микропузырьков воздуха в воде по размерам. Расчет по экспериментальным данным [6].

Была проведена предварительная оценка распределения по размеру газовых микропузырьков в воде. На основании обобщения совокупности экспериментальных данных по содержанию свободного воздуха в обычной воде, приведенных в работе [6], нами получена эмпирическая формула для оценки числа микропузырьков воздуха в единице объема воды в зависимости от их радиуса. Эта формула в виде $N_{b0} = AR_0^{-1,4}$ (R_0 - в мкм, N_{b0} - см⁻³) с хорошей точностью аппроксимирует экспериментальные данные в интервале $R_0 = 0,5 \div 20$ мкм.

Полученная зависимость, представленная в графическом виде на рис.2, позволяет при задании начального размера пузырьков в монодисперсном ансамбле R_0 определить их

концентрацию N_{b0} и более точно прогнозировать развитие ситуации при сбросе давления.

Обсуждение результатов исследования. В задачи исследования входило определение скорости изменения давления в жидкости внутри кластера ($p_{cl} = f(\tau)$) в зависимости от изменения внешнего давления $p_l = f(\tau)$ в конфузурной части сопла, которое рассчитывается по уравнению Бернулли.

В воде находится большое число равновесных газовых зародышей в интервале $R_0 = 0,1 \div 100$ мкм, которые при сбросе внешнего давления могут активироваться и стать центрами кавитации. Критическое давление p_{lcr} начала необратимого роста пузырька с радиусом R_0 определяется из условия: $p_{lcr} \leq 2\sigma/R_0 - p_{\text{sat}}(T_{l0})$, где σ - поверхностное натяжение [1-4]. Из условия следует, что при $T_l=20^\circ\text{C}$ для активации пузырьков с $R_0 \leq 15$ мкм давление должно перейти в область отрицательных значения (стать "растягивающим"). Применительно к данному эксперименту расчеты показывают, что в отсутствие в воде микропузырьков с радиусом $R_0 > 0,1$ мкм критическое давление в горловине с $D_{\text{thr}}=4$ см должно было бы снизиться до значения $p_{lcr} \approx -8$ атм, а в горловине с диаметром $D_{\text{thr}}=1$ см - до -20 атм.

На рис.3-а,б видно, что из-за быстрого расширения активированных пузырьков давление p_{lcr} успевает снизить до существенно меньших отрицательных значений ($p_{lcr} \propto -0,2 \div -0,5$ атм). За короткое время $\Delta t \propto 30-40$ мкс давление возрастает до значения $p_{cl} = p_{\text{sat}}(T_{l0})$ - тем быстрее, чем крупнее пузырьки (рис.3-

б). Это препятствует активации пузырьков меньшего размера [3,4]. В течении этого периода происходит резкое увеличение и плавное снижение скорости роста пузырьков (рис.3-в). Конкуренция между скоростью сброса внешнего давления ($p_{cl} = f(\tau)$) и скоростью нарастания давления ($p_{cl} = f(\tau)$) определяет число активированных пузырьков и эффективность дегазации. Очевидно, что по мере стабильной рециркуляции жидкости через кавитатор будут удаляться газовые пузырьки все меньшего размера, но с высокой концентрацией.

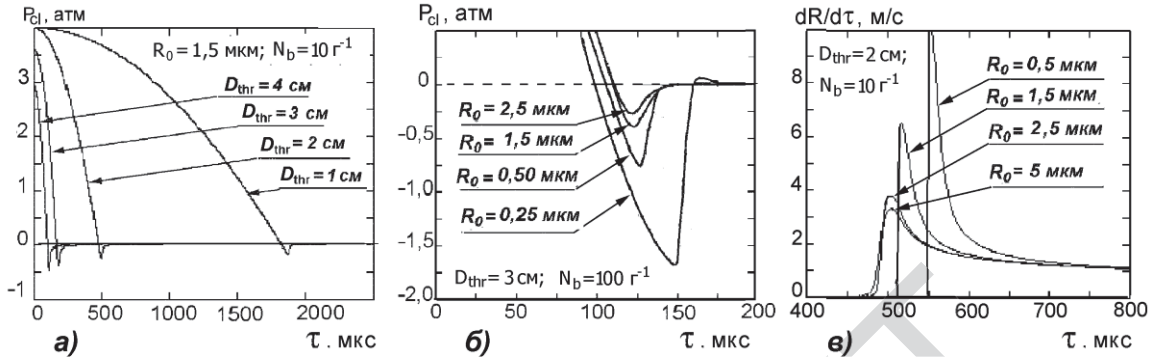


Рис.3. Характер изменение давления в жидкости внутри кластера $p_{cl} = f(\tau)$ (а, б) и скорости увеличения радиуса пузырьков $dR/d\tau = f(\tau)$ (в) на начальном этапе развития ансамбля пузырьков зависимости от режимных параметров: D_{thr} , R_0 и N_b .

Представленные на рис.3 результаты доказывают существенное влияние начального размера пузырьков на скорость стабилизации давления в кластера до значения $p_{sat}(T_{10})$ в стадии активации.

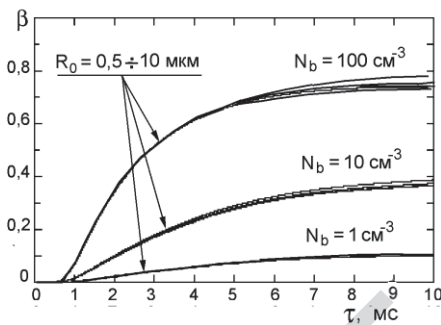


Рис. 4. Зависимость текущего паросодержания β от начального размера R_0 и концентрации N_b газовых зародышей

Однако после стабилизации давления значения R_0 не оказывают влияния на развитие кавитационного кластера. Вне зависимости от начального радиуса пузырьки быстро растут до одинакового размера, что согласуется с данными видеорегистрации [8]. Больше влияние на эволюцию кластера оказывает концентрация N_{b0} , что это подтверждают результаты эксперимента, следует из данных, представленные на рис.4. При значительном влиянии величины N_{b0} на кинетику парообразования, влияние R_0 почти не заметно. Из рисунка следует, что при высоких концентрациях зародышей (независимо от их размера) паросодержание может превысить пороговое значение $\beta > 0,6$, что приведет к инверсии потока.

Выводы. Интенсивность процесса кавитационной дегазации жидкостью в значительной степени определяется совокупностью сложных конкурирующих процессов, протекающих на стадии активации газовых микрзародышей и начала кавитационного вскипания. Эти процессы обусловлены силовым взаимодействием растущих активированных пузырьков. Использование в данном исследовании математической модели, которая в отличие от других известных моделей учитывает силовое и термическое взаимодействие пузырьков, позволяет описать протекающие на короткой стадии активации микрзародышей и прогнозировать дальнейшее протекание процесса. 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 для эффективной дегазации жидкостей.

Литература

1. Ефремова К.Д., Пильгунов В.Н. Кавитационные свойства жидкостей. //Наука и образование. МГТУ им Н.Э Баумана. Электрон. журн. 2016. №03. С.12-36.. DOI: 10.7463/0316.0835344.
2. Franc J.-P. Physics and Control of Cavitation - In Design and Analysis of High Speed Pumps (pp. 2-1 – 2-36). Educational Notes RTO-EN-AVT-143, Paper 2, 2006.-pp.1-36
3. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Теплообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. –Киев: Наук. думка, 2008. –381 с.
4. Иваницкий Г.К. Численное исследование поведения пузырькового кластера в процессах гидродинамической кавитации. // Наукові праці ОНАХТ.–2017.–Т.81, вип..1, С.114–120.

5. Carpenter J., Badve M., Rajoriya S., George S., Saharanand V.K., Pandit A.B. Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry //Reviews in Chem. Engng.–January, 2016.–pp.1-36. DOI: 10.1515/revce-2016-0032
6. Brennen Ch. E. Cavitation and Bubble Dynamics.–N.-Y., Oxford University Press, 1995.–294 p
7. Iben U, Makhnov A., Schmidt A. Numerical Investigation of Cavitating Flows with Liquid Degassing // Journal of Physics: Conf. Series 1038 (2018) 012128. DOI :10.1088/1742-6596/1038/1/012128
8. Kowalski K., Pollak St., Hussong J. Experimental investigation of cavitation induced air release //EPJ Web of Conferences 143, 02054 (2017) –pp.1–5. . DOI: 10.1051/epjconf/201714302054
9. Rooze J., Andre M., van der Gulik G.-J.S., Fernandez-Rivas D., Gardeniers J.G.E., Rebrov E.V., Schouten J.C., Keurentjes J.T.F. Hydrodynamic cavitation in micro- channels with channel sizes of 100 and 750 micrometers. Microfluidics Nanofluidics.– 2011.–Vol.12(1–4).–pp.499–508
10. Washio S., Takahashi S., Kamiyama K., Banjyoya K., Kikui Sh. On-line deaeration of liquid utilizing a maximum developed stationary cavity in cavitation //Transactions of the Jap. Soc.of Mech.Engineers, Part B.–2006.–Vol.72, N11.–pp.2710.–2716
11. Antonio Montalvao, William Williams, Henrique Pareja Cavitation method and apparatus for deaeration.– U.S. Pat. No. 4,743,405. Jun. 19, 2003.
12. Іваницький Г.К., Недбайло А.Е., Коник А.В., Целень Б.Я., Гоженко Л.П. Уніфіцирований підхід к моделюванню кавітаційних реакторів. Зб. наук. праць XVII міжнар. наук. конф. «Удосконалення процесів і обладнання харчових і хімічних виробництв» (вересень 2018). Одеса, ОНАХТ.– С.84–89.

References

1. Yefremova K.D., Pilgunov V.N.(2016). Cavitation properties of liquids. Science and Education of Bauman MSTU (electron. journ.). N.03. pp.12–36. DOI: 10.7463/0316.0835344.
2. Franc J.-P. (2006). Physics and Control of Cavitation - In Design and Analysis of High Speed Pumps (pp. 2-1 – 2-36). Educational Notes RTO-EN-AVT-143, Paper 2, pp.1–36.
3. Dolinskiy A.A., Ivanitskiy G.K. (2008). Heat and mass transfer and hydrodynamics in vapor-liquid dispersed media. Kiev: Naukova dumka, 381.
4. Ivanitsky G.K. (2017). Numerical study of bubble cluster behavior in hydrodynamic cavitation processes. Scientific Works, Odessa Nation.Academ. Food Technol., 81(1), pp.114–120.
5. Carpenter J., Badve M., Rajoriya S., George S., Saharanand V.K., Pandit A.B. (2016). Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry //Rev. in Chem. Engng.–January, pp.1–36. DOI: 10.1515/revce-2016-0032.
6. Brennen Ch. E. (1995). Cavitation and Bubble Dynamics.–N.-Y., Oxford University Press, 294
7. Iben U, Makhnov A., Schmidt A. (2018) Numerical Investigation of Cavitating Flows with Liquid Degassing // Journal of Physics: Conf. Series 1038 012128. DOI:10.1088/1742-6596/1038/1/012128.
8. Kowalski K., Pollak St., Hussong J. (2017). Experimental investigation of cavitation induced air release //EPJ Web of Conferences 143, 02054 –pp.1–5. DOI: 10.1051/epjconf/201714302054.
9. Rooze J., Andre M., van der Gulik G.-J. S., Fernandez-Rivas D., Gardeniers J.G.E., Rebrov E.V., Schouten J C., Keurentjes J.T.F.(2011). Hydrodynamic cavitation in micro- channels with channel sizes of 100 and 750 micrometers, Microfluidics Nanofluidics. Vol.12(1–4), pp.499–508
10. Washio S., Takahashi S., Kamiyama K., Banjyoya K., Kikui Sh. (2006).On-line deaeration of liquid utilizing a maximum developed stationary cavity in cavitation. Transactions of the Jap. Soc.of Mech. Engineers, Part B, Vol.72. 1. pp.2710–2716.
11. Antonio Montalvao, William Williams, Henrique Pareja Cavitation method and apparatus for deaeration.– U.S. Pat. No. 4,743,405. Jun. 19, 2003.
12. Ivanitsky G., Nedbaylo A., Konyk A., Tcelen B.Ya., Gozhenko L. (2018) Modeling cavitation reactors: a unified approach. Proc. XVII Int. Conf. on Improving processes and equipment of food and chemical industries. ICPA. Sept. 3-8. Odessa. ONAHT. pp.84–89.

ЗМІСТ

ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

| | |
|--|----|
| ВИРІШЕННЯ ЕНЕРГО-ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ КРУП'ЯНОГО ВИРОБНИЦТВА | |
| Хоренжий Н.В., Лапінська А.П. | 5 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГАЗАЦИИ ЖИДКОСТИ В КАВИТАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЯХ. ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ | |
| Иваницкий Г.К., Целень Б.Я., Недбайло А.Е., Коник А.В. | 11 |
| ІННОВАЦІЙНІ СПОСОБИ ЕНЕРГОПІДВОДУ У ПРОЦЕСАХ СУШІННЯ ТЕРМОЛАБІЛЬНОЇ СИРОВИНИ | |
| Яровий І.І., Кашкано М.А., Маренченко О. І., Пилипенко Є.О. | 17 |
| МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ШВИДКОСТЕЙ ТЕПЛОНОСІВ У ВЕРТИКАЛЬНОМУ КАНАЛІ КОНТАКТНОГО АПАРАТУ | |
| Кузьменко І.М. | 24 |
| МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ ПРИ КОНВЕКТИВНОМУ СУШІННІ М'ЯСНИХ ВИРОБІВ | |
| Ощипок І. М. | 29 |
| ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ШВИДКІСНОГО ТРАМВАЮ М. КРИВИЙ РІГ | |
| Кухта О.О. | 33 |
| МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ В ПРОЦЕСІ ЖАРІННЯ ОЛІЙНОЇ СИРОВИНИ | |
| Сорокова Н.М., Дідур В.В. | 37 |
| ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЛАЗМЕННЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕД | |
| Холявченко Л.Т., Опарин С.А., Давыдов С.Л. | 42 |
| ПРОБЛЕМИ ІНВЕСТИЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ УКРАЇНИ | |
| Бундюк А.М., Подпалова Ю.В., Коваленко А.К. | 46 |
| ENERGY POLICY OPPORTUNITIES. HOW TO FACE CHALLENGES | |
| Bezhan V., Zhytarenko V., Ostapenko O., Yakovleva O. | 48 |

ІННОВАЦІЙНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ХІМІЧНИХ І ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ВИРОБНИЦТВ

| | |
|---|----|
| ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СУППОЗИТОРИЕВ | |
| Шмагток А.И., Степанова О.Е., Сильнягина Н.Б. | 54 |
| ТЕРМІЧНЕ РОЗКЛАДАННЯ ГРАНУЛЬОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ В УМОВАХ ЗМІННОЇ ГАЗОВОЇ АТМОСФЕРИ | |
| Корінчевська Т.В., Михайлик В.А., Корінчук Д.М. | 59 |
| АКТИВАТОРИ ПРОЦЕСУ ПОГЛИНАННЯ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ ХЛОРОФІЛСИНТЕЗУЮЧИМИ МІКРОВОДОРОСТЯМИ | |
| Дячок В.В., Мандрик С.Т., Гуглич С.І. | 64 |
| РОЗРОБКА ІННОВАЦІЙНОГО ТЕПЛОМАСООБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ | |
| Грабова Т. Л., Шмагток О.І., Сильнягіна Н.Б. | 70 |
| ДОСЛІДЖЕННЯ КАВІТАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ В НАСОСАХ РІЗНИХ ТИПІВ | |
| Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А., Жукотський Е.К. | 77 |
| ВИНИКНЕННЯ КАВІТАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ ПІД ЧАС РОБОТИ НАСОСІВ РІЗНОГО ТИПУ | |
| Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А., Жукотський Е.К. | 80 |
| ГІДРОДИНАМІКА ГАЗОРІДНИХ ПОТОКІВ НА КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ СТРУКТУРАХ | |
| Туз В.О., Лебедь Н.Л., Трокоз Я.Є. | 85 |
| ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКСТРАКЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ПРОДУКТОВ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИМЕТИЛСУЛЬФОКСИДА | |
| Челтонов М.М., Опарин С.А., Матросов А.С., Кириченко А.Л. | 91 |
| МОДУЛЬНИЙ ПРИНЦИП ОРГАНІЗАЦІЇ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЛЛЕТ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ | |
| Бунецкий В.А., Бурдо О.Г., Зыков А.В., Войтенко А.К., Безбах И.В., Кашкарев А.А. | 94 |
| ARTIFICIAL MICRO RNA (AMIRNA): A POTENT TOOL FOR GENE SILENCING IN PLANT | |