Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 9. С. 428–435
Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 9, pp. 428–435

Научная статья
УДК 532.528.5
URL: https://tptmai.ru/publications.php?ID=183977
EDN: https://www.elibrary.ru/HXIYUA

Нестационарные коллективные эффекты в кавитирующей струе

Д.А. Бирюков[1], Д.Н. Герасимов[2], В.В. Перетятько[3]✉

[1,3]*Объединённый институт высоких температур РАН, г. Москва, Российская Федерация (ОИВТ РАН)*
[2]*Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Российская Федерация (НИУ МЭИ)*
[3]*peretyatkovika2001@gmail.com*✉

Аннотация. В работе рассматривается определение скорости и частоты кавитирующего потока путем статистической обработки ряда полученных фотоснимков. Обнаружена волна давления в потоке глицерина и определена ее скорость. Кавитирующий поток возникает при протекании жидкости через сужающее устройство, изготовленное из органического стекла. Наименьший элемент сужающего устройства – канал диаметром 1 мм и длиной 1 мм. При течении диэлектрика через подобные сужающие устройства возникает свечение в 1 мм канале. Исследование гидродинамических процессов, происходящих при протекании жидкости через сужающее устройство, является частью исследования, направленного на интерпретацию явления гидролюминесценции.

Ключевые слова: кавитация, высокоскоростная съемка, корреляционный анализ, гидролюминесценция, гидравлический удар, кавитирующие струи, коллективные процессы

Для цитирования. Бирюков Д.А., Герасимов Д.Н., Перетятько В.В. Нестационарные коллективные эффекты в кавитирующей струе // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 9. С. 428–435. URL: https://tptmai.ru/publications.php?ID=183977

Original article

Non-stationary collective effects in a caviting jet

D.A. Biryukov[1], D.N. Gerasimov[2], V.V. Peretiatko[3]✉

[1,3]*Joint institute of high temperatures RAS, Moscow, Russian Federation*
[2]*National research university "Moscow power energy institute", Moscow, Russian Federation*
[3]*peretyatkovika2001@gmail.com*✉

Abstract. The paper discusses the determination of the speed and frequency of a cavitating flow by statistical processing of a number of photographs obtained. A pressure wave in a glycerin flow was detected and its speed was determined.
Cavitating flow occurs when liquid flows through a constricting device made of organic glass. The smallest element of a constricting device is a channel with a diameter of 1 mm and a length of 1 mm. When a dielectric flows through such constricting devices, a glow occurs in a 1 mm channel. The study

© Бирюков Д.А., Герасимов Д.Н., Перетятько В.В., 2024

of hydrodynamic processes occurring when liquid flows through a constricting device is a part of a study aimed at interpreting the phenomenon of hydroluminescence.
The non-stationary dynamics of vapor cavities leads to non-linear effects: the growth and collapse of bubbles in one region of the channel lead to a change in pressure in the liquid, which, in turn, affects the dynamics of bubbles in another part of the channel. This work is devoted to the study of these collective effects.
Usually, contact research methods are used to measure velocities, but in fast processes their use is complicated by the introduction of disturbances into the flow, so it becomes necessary to involve other methods. In fact, bubbles are convenient natural tracers for diagnostics by the PIV method, but in this case, there is a number of features.
When studying the cavitating flow, high-speed shooting of the narrowing device was performed. The device was located between the camera and the light source, so the cavitating bubbles in the resulting frames were darker than the flowing liquid, which made the analysis possible. Water at 20 °C was used as the liquid under study. The inlet pressure was set equal to 40 atm. The shooting was performed at a frequency of 77,000 fps. In the resulting frames, pixels were selected on the same section of the frame and their brightness values were recorded.
The study examined the flow of glycerin. During the study, pressure waves arising in the experimental section were detected. The pressure wave is identified by a short-term increase in brightness along the channel. Such a change in brightness was visually detected in the glycerin flow starting from an input pressure of 70 atm, the outlet pressure was assumed to be constant and equal to atmospheric. Using the previously described technique, it was found that the speed of the pressure wave was 300 m/s.
The study of the dependencies of brightness changes over time made it possible to determine a number of important effects. Collective processes in a two-phase cavitating flow have a pronounced periodic nature, and the frequency of these processes is very high and cannot be correlated with any external parameters, in particular, with the frequency of the pump. A pattern of bubble appearance in a 1 mm channel and the appearance of a shock wave in the channel has been revealed. The results obtained seem to be very promising for the clarifying the physical mechanisms operating in a medium with a non-stationary gas phase and studying hydroluminescence.

Keywords: cavitation, high-speed photography, correlation analysis, hydroluminescence, hydraulic shock, cavitating jets, collective processes

For citation. Biryukov D.A., Gerasimov D.N., Peretiatko V.V. Non-stationary collective effects in a caviting jet. *Thermal processes in engineering*. 2024, vol. 16, no. 9, pp. 428–435. (In Russ.). URL: https://tptmai.ru/publications.php?ID=183977

Введение

Гидродинамическая кавитация – комплекс нестационарных явлений, связанных с динамикой паровой полости при понижении давления в жидкости [1]. В целом, кавитация носит разрушающий и потому нежелательный характер, однако существуют и полезные практические применения этого явления. Например, в [2] кавитацию использовали для очистки воды, так как кавитация способствует разложению радикалов. В [3] для очистки воды применялась ультразвуковая кавитация, т.к. влияние ультразвука ускоряет процессы, происходящие в пищевой промышленности. Также ультразвуковое воздействие кавитации может применяться при пастеризации молока, т.к. ультразвук инактивирует ферменты, отвечающие за его порчу [4]. В [5] разрушающая способность кавитации исследовалась более детально и проводилось численное моделирование взаимодействия одиночного микропузырька и липосомы. Явление кавитации непрерывно изучается в медицинских приложениях [6] для визуализации пузырьков и создания более точного медицинского оборудования. Применение кавитационных технологий для обработки гомогенных и гете-

рогенных смесей в теплоэнергетике также привело к необходимости изучения свойств кавитирующего потока и создания новых математических моделей, учитывающих двухфазность потока [7].

Кавитация может быть инициирована различными способами, в том числе – в канале переменного сечения: с уменьшением и последующим увеличением сечения канала. В узком сечении за счет понижения давления растут парогазовые пузырьки, которые выносятся потоком в область более высокого давления. Нестационарная динамика паровых полостей приводит к нелинейным эффектам: рост и схлопывание пузырьков в одной области канала приводят к изменению давления в жидкости, которое, в свою очередь, влияет на динамику пузырьков в другой части канала. Настоящая работа посвящена исследованию данных коллективных эффектов.

Обычно для измерения скоростей применяются контактные методы исследования, однако в быстропротекающих процессах их использование осложняется внесением в поток возмущений, так что становится необходимым привлечение иных способов. По сути, пузырьки являются удобными естественными трассерами для диагностики методом PIV, однако в данном случае имеется ряд особенностей: пузырьки перемещаются очень быстро, поэтому требуется доработка метода. В [8] были разработаны алгоритмы, улучшающие и облегчающие процесс отслеживания пузырьков при измерении параметров кавитации методами цифровой трассерной визуализации (PIV (Particle Image Velocimetry), PTV (Particle Tracking Velocimetry)).

В [9] проводилось исследование кавитирующего потока методом высокоскоростной съёмки. Автором было отмечено нестационарное поведение струи – выпадение скопления пузырьков из основного потока с некоторой периодичностью. Периодичность может быть связана с распространяющейся волной давления. Волны давления, появляющиеся из-за схлопывания пузырьков из-за воздействия ультразвука, более детально анализировались в [10] посредством анализа акустического поля.

Целью же данной работы являлось определение скорости и частоты появления волны давления при кавитации в сужающем устройстве с использованием составленного программного кода.

Материалы и методы

Для исследования кавитирующей струи использовалась установка, представляющая собой замкнутый контур, показанная на рис. 1.

Исследуемая жидкость прокачивалась плунжерным насосом (2) из бака (1) через опытный участок (5). Опытный участок – сопло круглой формы из прозрачного оргстекла с диаметром и длиной наименьшего отверстия 1 мм. Участок просвечивался лампой (6) при видеосъемке исходящие струи с кавитирующими пузырьками образовывали тень и отображались темными пятнами, удобными для последующей обработки. Давление на входе регулировалось преобразователем частоты Е3 – 9100 (3). Давление на выходе устанавливалось 1 атм. Эксперимент снимался на высокоскоростную камеру VEO-E 310L (4) с частотой съемки 77000 к/с. При помощи ПО Phantom PCC (7) осуществлялась настройка съёмки и управление камерой.

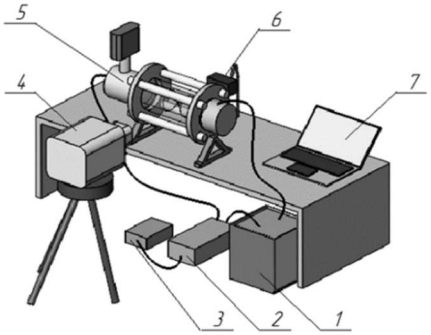

Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – бак исследуемой жидкостью, 2 – плунжерный насос, 3 – частотный преобразователь Е3-9100, 4 – VEO-E 310L, 5 – опытный участок, 6 – лампа, 7 – ПО Phantom PCC

В качестве исследуемой жидкости использовалась вода при температуре 20 °С. Давление на входе устанавливалось равным 40 атм. Съемка производилась с частотой 77000 к/с. На полученных кадрах, представленных на рис. 2, явно видно отрывающееся от основного потока струи скопление кавитирующих пузырьков, контур которого выделен белой штриховой линией. Для анализа использовались 32000 последовательных кадров, что соответствует временному интервалу t = 400 мс.

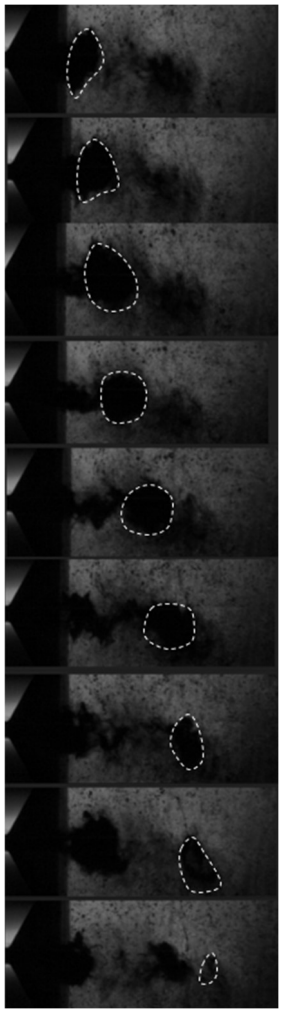

Рис.2. Отрыв скопления пузырьков от потока

Параметры кавитирующей струи рассчитывались с помощью программного кода, написанного на языке Python. Исходными данными для работы кода являются значения яркости пикселей в различных точках изображения. Яркости снимались посредством сертифицированной программы для обработки изображений «Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2024617767». Пример работы кода рассматривается на двух точках, показанных на рис. 3 и расположенных друг от друга на расстоянии 1 мм.

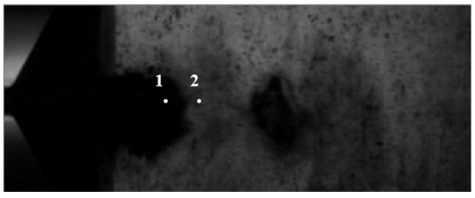

Рис. 3. Обрабатываемые точки

Полученное распределение яркости для двух выбранных точек показано на рис. 4.

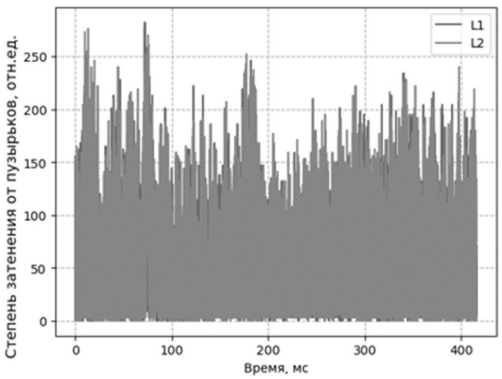

Рис. 4. Распределение яркости в т.1 (L1) и т.2 (L2)

Для упрощения работы и понимания процесса преобразуем распределение так, чтобы пики графика соответствовали тёмной области (скоплению пузырей). Преобразование представлено на рис. 5. Для удобства визуального восприятия приводим зависимость для интервала времени, равного 3 мс.

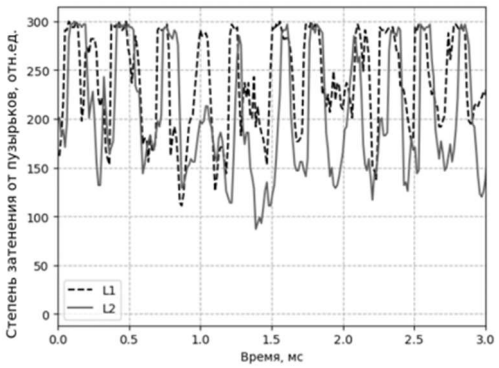

Рис. 5. Распределение яркости в т.1 (L1) и т.2 (L2), где пики соответствуют скоплению пузырьков

Согласно рис. 5 моменту протекания скопления пузырьков через точку соответствует случай скачкообразного повышения яркости. В процессе движения яркость в течении некоторого промежутка времени остается на постоянном уровне, а затем резко снижается, что свидетельствует об окончании течения скопления пузырьков через рассматриваемую точку. Как следует из рис. 5, подобный процесс является почти периодическим.

Определяя количество появления максимумов графика, можно отметить времена начала и окончания прохождения скопления через анализируемые точки. Эти моменты отмечены символами и представлены на рис. 6.

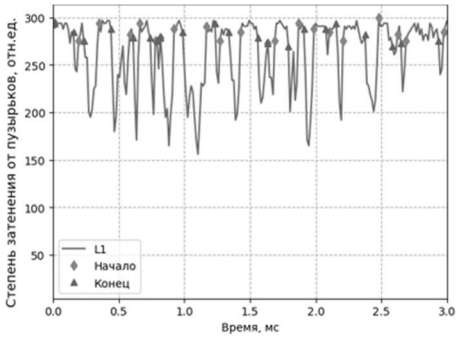

Рис. 6. Интервалы времени, за которые скопление пузырьков проходит т.1

Также можно определить количество выделенных областей. Для скопления 2 их количество получилось равным $N = 1898$, следовательно, частота появления f, определяемая по формуле (1), равна:

$$f = {}^{N}\!/_{t} = 4700 \text{ Гц}. \qquad (1)$$

Для определения скорости течения скопления пузырьков необходимо определить время, в течении которого возмущение движется между точками.

Время течения скопления пузырьков от т. 1 к т. 2 определялось из условия наилучшей корреляции: находился промежуток времени, на который требуется сместить сигнал 2, чтобы корреляция с сигналом 1 была максимальной. Для оценки схожести сигналов рассчитывался коэффициент корреляции по формуле (2):

$$\text{cor}_{12} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n\sigma_x\sigma_y}, \qquad (2)$$

где $\bar{x}$, $\bar{y}$ – средние значения сигналов для выборки из n элементов, σ_x, σ_y – их среднеквадратичные отклонения.

Зависимость коэффициента корреляции от величины смещения представлена на рис. 7.

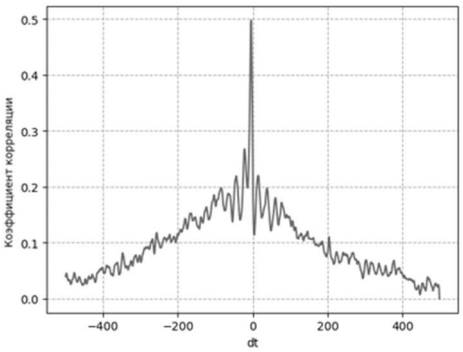

Рис. 7. Зависимость коэффициента корреляции от величины смещения сигнала 2 относительно сигнала 1

Из графика следует, что корреляция сигналов максимальна при смещении на dt = 5.2e-5 с. На рис. 8 показан результат наложения двух сигналов после смещения сигнала 2 относительно сигнала один на время dt.

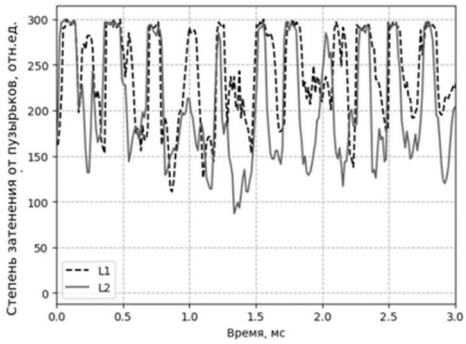

Рис. 8. Сигнал 2, смещенный относительно сигнала 1 на время dt

Зная время dt, за которое скопление пузырьков проходит расстояние r, можно определить его скорость его течения по формуле (3).

$$u = {}^{r}\!/_{dt} = 20 \text{ м/с}. \qquad (3)$$

Результаты

Для более детального анализа кавитирующей струи было выбрано 20 точек, показанных на рис. 9 и обработанных при помощи кода, описанного ранее.

Скорости определялись для каждой последовательной пары точек, располагающихся по горизонтали (1–2; 2–3 и т.д.). Рассчитанные значения скоростей отмечены на рис. 9 синим цветом. Координаты точек представлены в пикселях справа и сверху от рисунка. Видно, что по мере движения скопление пузырьков имеет свойство замедляться. Погрешность определения скорости рассчитывалась по формулам для косвенных измерений. Максимальное значение погрешности составило 0,3 м/с.

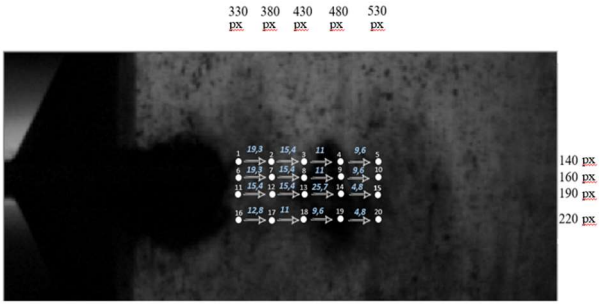

Рис. 9. Значения скоростей по результатам корреляционного анализа

Для определения частоты значение коэффициента корреляции определялось также для каждой пары точек и результат приведен на рис. 10.

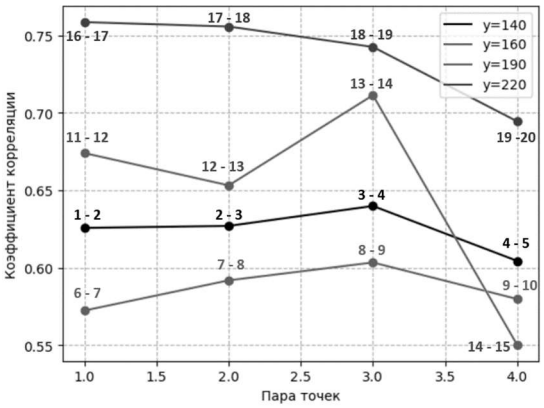

Рис. 10. Коэффициенты корреляции между парами точек, расположенных на одной горизонтали

Из рис. 10 видно, во всех случаях коэффициент корреляции выше 0,5, т.е. взаимосвязь сигналов сильная. Также можно заметить, что максимальные значения корреляции соответствуют случаю, когда y = 220 пикс. Это происходит т.к. скопление пузырьков имеет свойство отклоняться вниз по ходу своего течения и, следовательно, точно фиксироваться в т. 16–20 (что также можно увидеть на рис. 2). Из графика видно, что у последних пар точек (4–5, 9–10, 14–15, 19–20) корреляция ниже, чем у предыдущих точек. Это, вероятно, связано с рассеиванием скопления.

Для определения частоты были рассмотрены точки 16 и 20, т.к. значения коэффициентов корреляции при y = 220 пикс. максимальны. Для определения случаев, когда скопление пузырьков проходит именно через выбранные точки, необходимо было провести децимацию сигналов и отсеять лишние пики. Для этого сигналы 16 и 20 в момент наилучшей корреляции умножались друг на друга, а затем делились на константу для масштаба (Vort). Таким образом, пикам нового графика соответствует случай, когда пики сигналов накладываются друг на друга. Если накладываются пик и впадина – на новом сигнале также будет впадина (не такой выраженный пик) и принимать его за скопление пузырьков мы не будем. Результат показан на рис. 11.

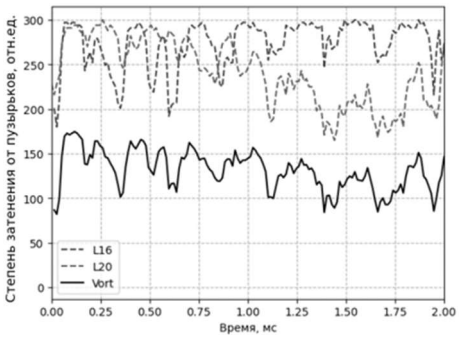

Рис. 11. Для определения частоты выпадения облаков пузырьков

Таким образом принимая за пики области, яркость которых выше, чем 150 отн. ед., количество выбросов составляет 255, а частота появления скопления пузырьков 600 Гц.

Также проводился визуальный анализ видеозаписи с целью обнаружения волны давления. Волна давления идентифицируется по краткосрочному повышению яркости по длине канала. Такое изменение в яркости визуально было обнаружено в потоке глицерина начиная с входного давления 70 атм, давление на выходе при этом принималось постоянным и равным атмосферному. Используя описанную ранее методику, было найдено, что скорость движения волны давления составила 300 м/с.

Также была обнаружена следующая интересная закономерность: перед появлением волны давления образовывалось скопление пузырьков на выходе из сужения, показанное на рис. 12.

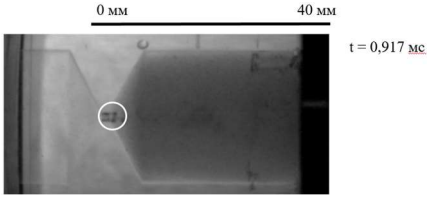

Рис. 12. Скопление пузырьков перед появлением волны в потоке глицерина

Закономерность может быть обоснована следующим образом: при освобождении пузырьками наименьшего сечения происходит гидроудар жидкости, приводящий к возникновению волны давления.

Наблюдаемая закономерность была использована для определения частоты появления волны. Для этого измерялись значения яркости в трех точках, показанных на рис. 13, а полученные значения перемножались. Это делается для фиксации случая, когда скопление пузырьков максимально.

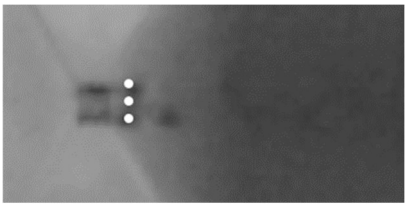

Рис. 13. Анализируемые точки

Таким образом, количество раз появления скопления пузырьков получилось равным $N = 673$, а средняя частота появления волны $f = 1700$ Гц.

Для доказательства закономерности необходимо было сопоставить полученные распределения яркости у сужения, распределения яркости в канале и видеоряд. На рис. 14 показана зависимость яркости от номера кадра. По увеличенному участку видно, что скоплению пузырьков соответствует 61 кадр. Необходимый кадр был найден при разбиении видеоряда на пронумерованные изображения посредством ПО Phantom PCC. На рис. 15 показан 61 кадр, взятый из видеоряда. Белой стрелкой отмечено зафиксированное программой скопление пузырьков.

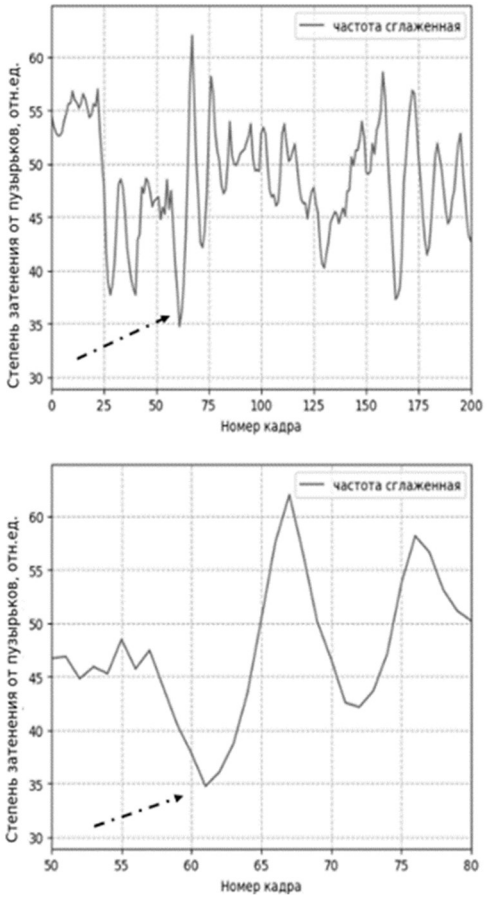

Рис. 14. Результат перемножения значений яркости в трех точках

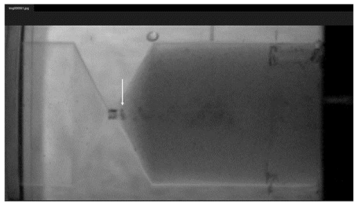

Рис. 15. Зафиксированное скопление пузырьков

На графике в точках с координатами (380;90) и (500;90) волна идентифицируется повышением яркости. Эту зависимость можно заметить на рис. 16, на котором область с волной приближена.

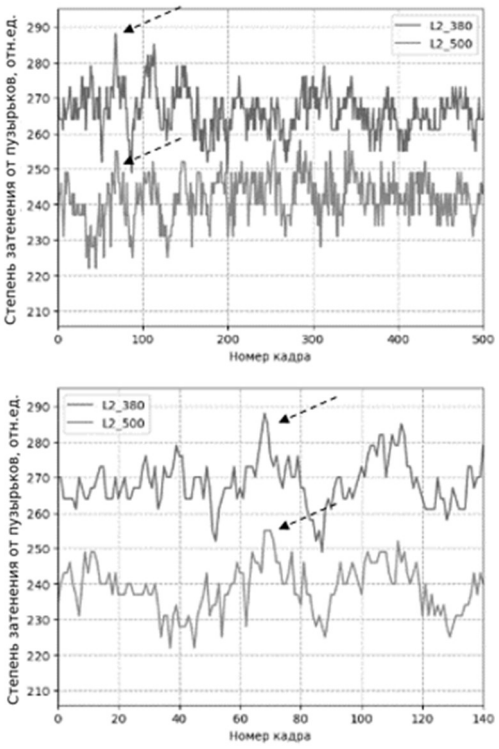

Рис. 16. Зафиксированная волна давления

Проанализировав графики и видеоряд можно сделать вывод о том, что корреляционный анализ и идентификация волны произведены корректно.

Обсуждение

В работе использованы методы корреляционного анализа для исследования кавитирующего потока. Полученные результаты определяют скорость движения скопления пузырьков и частоту их отрыва от кавитирующей струи воды при входном давлении 40 атм, а также скорость движения и частоту появления волны давления в глицерине при входном давлении 70 атм.

Заключение

Из полученных результатов следует, что коллективные процессы в двухфазном кавитирующем потоке имеют ярко выраженный периодический характер, причем частота этих процессов весьма велика и не может быть соотнесена с какими-либо внешними параметрами, в частности – с частотой работы насоса. Таким образом, действительно, процесс кавитации сопровождается возникновением автоколебаний, влияющих на общую гидродинамическую картину. Исследование динамических характеристик этих процессов представляется весьма перспективным с точки зрения выяснения физических механизмов, действующих в среде с нестационарной газовой фазой: например, насколько коррелируют наблюдаемые частоты со спектром турбулентных пульсаций; последний вопрос важен, в том числе, для определения гидродинамического сопротивления таких систем.

Список источников

1. Biryukov D.A., Gerasimov D.N., Yurin E.I. Cavitation and associated phenomena. CRC Press, 2022, 392 p.
2. Bandala E.R., Rodriguez-Narvaez O.M. On the Nature of Hydrodynamic Cavitation Process and Its Application for the Removal of Water Pollutants // Air, Soil and Water Research, 2019. Vol. 12. DOI: 10.1177/1178622119880488
3. Демченко В.А., Гуляева Ю.Н. Влияние сонохимических технологий на увеличение срока хранения воды, используемой в полевых условиях // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооружённых Сил Российской Федерации. 2022. Т. 23. № 1. С. 81–87.
4. Уласевич С.А., Яковченко Н.В., Орлова О.Ю. и др. Сонохимические методы в пищевой промышленности. СПб.: ИТМО, 2020. 65 с.
5. Zevnik J., Dular M. Liposome destruction by a collapsing cavitation microbubble: A numerical study // Ultrasonics sonochemistry. 2021. Vol. 78. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105706
6. Izadifar Z., Babyn P., Chapman D. Journal of Medical and Biological Engineering, 2019, 39.
7. Кулагина Л.В., Штым К.А. Механизм кавитационного сопротивления при обтекании тел суперкавитационным потоком // Енисейская теплофизика, 2023. С. 334–336.
8. Карчевский М.Н., Полетаев И.Е., Сухоруков Г.С. Алгоритмы распознавания и слежения за пузырями для измерения параметров кавитации на гидрокрыле, Вестник Новосибирского государственного университета, 2016, Т. 14, № 1, С. 23–28.
9. Hitoshi S. Luminescence intensity of vortex cavitation in a Venturi tube changing with cavitation number // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. Vol. 71. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105389
10. Khavari M., Priyadarshi A., Morton J. et al. Cavitation-induced shock wave behaviour in different liquids // Ultrasonics Sonochemistry. 2023. Vol. 94. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106328

References

1. Biryukov DA, Gerasimov DN, Yurin EI. *Cavitation and associated phenomena*. CRC Press, 2022, 392 p.
2. Bandala ER, Rodriguez-Narvaez OM. On the Nature of Hydrodynamic Cavitation Process and Its Application for the Removal of Water Pollutants. *Air, Soil and Water Research*. 2019;12. DOI: 10.1177/1178622119880488
3. Demchenko VA, Gulyaeva YuN. The impact of sonochemical technologies on increasing the shelf life of water used in the field. *Nauchnye problemy material'no-tekhnicheskogo obespecheniya Vooruzhennykh Sil Rossiiskoi Federatsii.* 2022;23(1):81–87. (In Russ.).
4. Ulasevich SA, Yakovchenko NV, Orlova OYu et al. *Sonochemical methods in the food industry*. Saint Petersburg: ITMO; 2020. 65 p. (In Russ.).
5. Zevnik J, Dular M. Liposome destruction by a collapsing cavitation microbubble: A numerical study. *Ultrasonics sonochemistry*. 2021;78. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105706
6. Izadifar Z, Babyn P, Chapman D. *Journal of Medical and Biological Engineering*. 2019. 39.
7. Kulagina LV, Shtym KA. The mechanism of cavitation resistance when bodies flow around a supercavitation flow. *Eniseiskaya teplofizika*. 2023:334–336. (In Russ.).
8. Karchevskii MN, Poletaev IE, Sukhorukov GS. Bubble recognition and tracking algorithms for measuring cavitation parameters on a hydrofoil. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016;14(1): 23–28.
9. Hitoshi S. Luminescence intensity of vortex cavitation in a Venturi tube changing with cavitation number. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;71. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105389
10. Khavari M, Priyadarshi A, Morton J et al. Cavitation-induced shock wave behaviour in different liquids. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2023;94. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106328