



Научная статья
УДК 621.923:621.922
EDN: WOSBCK
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-3-518-526

Обработка экспериментальных результатов суперкавитационного обтекания конуса методом локальной полиномиальной регрессии (LOESS)

Д.А. Гришаев^{1✉}, А.Ю. Радзюк², Е.Б. Истягина³

¹⁻³Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель – получение зависимостей, описывающих параметры потока при суперкавитационном обтекании препятствия, часто встречающемся в различных элементах теплоэнергетических систем и установок, а также предложение доступного и достоверного метода для анализа массивов экспериментальных данных течений в таких системах. Натурное моделирование кавитационных процессов выполнялось на циркуляционном гидродинамическом стенде. Был исследован процесс суперкавитационного обтекания конусов с диаметрами основания 15,45 мм и 21,75 мм с углами раскрытия 154° и 127°, соответственно, в рабочем участке диаметром 30 мм. Полученные экспериментальные данные представляли собой четырехмерный массив, который описывал зависимость длины каверны, возникающей за препятствием, и давление в ней от скорости потока и температуры. Из-за сложности обработки и визуального представления данный массив экспериментальных данных был разбит на два трехмерных массива. Аппроксимация полученных данных выполнялась методом сглаживания локально оцененной диаграммы рассеивания. Выполненная аппроксимация с использованием метода локальной полиномиальной регрессии показала, что момент перехода от парогазовой к паровой кавитации не зависит от геометрических размеров препятствия. Также в результате обработки экспериментальных данных была получена зависимость, соответствующая процессу перехода к паровой кавитации. Предложено эмпирическое уравнение, описывающее такой переход. Таким образом, метод сглаживания локально оцененной диаграммы рассеивания (локальной полиномиальной регрессии) наглядно показал взаимосвязь между обрабатываемыми данными. Предложенное эмпирическое уравнение позволяет определить критическую длину каверны, соответствующую переходу от парогазовой кавитации к паровой, и может быть использовано при проектировании и эксплуатации теплоэнергетического оборудования.

Ключевые слова: кавитационное обтекание, суперкаверна, парогазовая кавитация, регрессионный анализ, локальная полиномиальная регрессия (LOESS)

Для цитирования: Гришаев Д.А., Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б. Обработка экспериментальных результатов суперкавитационного обтекания конуса методом локальной полиномиальной регрессии (LOESS) // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 518–526. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-518-526>. EDN: WOSBCK.

POWER ENGINEERING

Original article

Processing of experimental results for super-cavitating flow past cone by local polynomial regression (LOESS)

Denis A. Grishaev^{1✉}, Aleksandr Yu. Radzyuk², Elena B. Istyagina³

¹⁻³Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The aim of the study is to define the correlations describing the flow parameters during super-cavitating flow past an obstacle, often found in various elements of thermal power systems and units, as well as to offer a simple and reliable method for analysing experimental datasets for the flows in such systems. Full-scale modelling of cavitation processes was carried out using a circulating hydrodynamic set-up. The process of super-cavitation flow past cones with base diameters of 15.45 and 21.75 mm and opening angles of 154° and 127°, respectively, in a working section having a diameter of 30 mm, was investigated. The obtained experimental data comprises a four-dimensional array that describes the dependence of the cavity length arising behind the obstacle and the pressure inside the cavity on the flow rate and temperature. Due to the complexity of processing and visual representation, this array was divided into two three-dimensional arrays. The approximation of the obtained data was carried out by locally estimated scatterplot smoothing (LOESS). The results demonstrated that the transition from vapour–gas to vapour cavitation is independent of the geometric dimensions of the obstacle. In addition, the dependence corresponding to the transition process to vapour cavitation was obtained by processing the experimental data.

© Гришаев Д.А., Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б., 2023

An empirical equation describing such a transition is proposed. Therefore, the method of smoothing a locally estimated scatter plot (local polynomial regression) illustrates the correlation between the processed data. The proposed empirical equation allows the critical length of the cavity to be determined that corresponds to the transition from vapour–gas to vapour cavitation and can be used for the design and operation of thermal power equipment.

Keywords: cavitation flow, supercavern, steam-gas cavitation, regression analysis, local polynomial regression

For citation: Grishaev D.A., Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B. Processing of experimental results of supercavitational flow around a nozzle by the method of local polynomial regression (LOESS). *iPolytech Journal*. 2023;27(3):518-526. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-518-526>. EDN: WOSBCK.

ВВЕДЕНИЕ

Кавитационные явления могут возникать при движении жидкости с большими скоростями в различных технологических элементах энергетического оборудования (насосах, запорной и регулирующей аппаратуре). Разрушающее воздействие кавитации традиционно объясняется воздействием кумулятивной струйки, возникающей при коллапсе парового пузырька, однако в реальных потоках, помимо паровой кавитации, может формироваться парогазовая кавитация, проявление которой будет существенно отличаться от паровой кавитации. В этой связи важным является определение параметров перехода от парогазовой к паровой кавитации.

Получение информации о тех или иных физических процессах и явлениях зачастую опирается на их экспериментальное изучение, в результате которого исследователь имеет ряд значений физических величин. Результаты любых измерений подвержены некоторым погрешностям. Анализ полученных результатов и погрешностей измерений является существенной частью любого научного эксперимента, поэтому владение методами обработки экспериментальных данных является неотъемлемой работой исследователя-экспериментатора.

Методы обработки экспериментальной информации зависят от того, какова модель, для уточнения которой проводится эксперимент. Фактически обработка экспериментальных данных – это преобразование информации к виду, удобному для использования и анализа, построение законов распределения случайных величин, установление зависимости между полученными величинами.

При рассмотрении результатов отдельных экспериментов бывает трудно обнаружить какие-либо закономерности. Однако если рассмотреть последовательность большого числа экспериментов, можно обнаружить определенные закономерности в устойчиво-

сти средних результатов.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы является экспериментальное определение параметров перехода от парогазовой к паровой кавитации при суперкавитационном обтекании препятствия и вычисление эмпирических коэффициентов уравнения, определяющего такой переход.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При исследовании обтекания конических тел с различным углом раскрытия были получены данные, объединяющие скорость, температуру потока, давление в кавитационной каверне и ее длину.

Полученные в результате исследования экспериментальные данные являются созависимыми и фактически образуют четырехмерный массив. Из-за сложности графического представления данный массив был разбит на две составляющие. Построены следующие зависимости:

1) давление в кавитационной каверне от скорости потока и температуры;

2) длина каверны от тех же параметров.

Но и при таком представлении большое количество полученных экспериментальных значений затрудняет анализ происходящих процессов. В связи с этим возникает необходимость их предварительной обработки.

Для наглядного представления взаимосвязей в экспериментальных данных желательно подобрать такую аппроксимирующую поверхность, которая окажется наиболее близка к имеющимся точкам в заданном диапазоне.

Существует много способов обработки данных и сглаживания их поверхностей. Например, в работе [1] описан автоматический метод построения гладких поверхностей, определяемых как сеть криволинейных треугольных участков (треугольников Безье). В работе [2] показано, что экспериментальные данные с разбросом можно сгладить при помощи радиальной базисной функции. Применяется также изогеометрический ана-

лиз [3] и многие другие методы. Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки, применяется в различных областях исследования.

Для обработки полученных экспериментальных данных был использован метод LOESS (от англ. Local Estimated Scatterplot Smoothing – сглаживание локально оцененной диаграммы рассеивания) [4–6]. Данный алгоритм является обобщением известных способов обработки данных – метода наименьших квадратов (МНК), инструментом которого является регрессионный анализ. Идея метода заключается в том, чтобы сгладить ряд данных не во всем диапазоне, а в конкретном месте, который задает исследователь. Для этого выбирается произвольная точка в массиве данных, определяется расстояние от выбранной точки до соседних точек, попавших в интервал. Формируется окно для работы с массивом, его размер зависит от параметра сглаживания, который входит в формулу (1).

$$r = \|\beta \cdot N\|, \quad (1)$$

где r – натуральное число, определяющее интервал для сглаживания; $\|\|$ обозначает округление числа до целого по правилам математики; N – число точек в выборке, шт.; β – безразмерный коэффициент сглаживания, $\beta \in (0; 1]$ и задается исследователем.

Соответственно, размер окна сильно зависит от коэффициента сглаживания. Чем больше точек попадает в окно, тем лучше будет происходить сглаживание ряда данных. Далее для точек, попавших в окно, необходимо задать веса по принципу: чем ближе точка к центральной, тем больше ее вес и тем сильнее она будет учитываться при сглаживании. Центральная точка, от которой начинается окно, веса не имеет. Для оценки веса точки и сглаживания полученных экспериментальных данных использовалась трикубическая функция [4]:

$$W_{\text{трикуб}}(z) = \begin{cases} (1 - |z|^3)^3, & |z| < 1 \\ 0, & |z| \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

где $w(z)$ – функция веса; z – это переменная расстояния, характеризующая удаленность наблюдений от центральной точки. В самой центральной точке $z = 0$.

Метод LOESS становится популярным для сглаживания данных [7]. Он хорошо описан в монографиях [8, 9]. Обычно метод применяют для сглаживания двумерных данных, например в социально-экономическом прогнозировании. По мнению автора работы [10], данный метод можно применить к многомерным данным. Полученные экспериментальные данные как раз являются такими.

Достоинства использования LOESS⁴:

- 1) достаточно указать два параметра: степень полинома и параметр сглаживания;
- 2) гибкость, из-за чего можно моделировать сложные процессы, для которых не существует теоретических моделей.

Недостатки метода LOESS⁴:

- 1) для создания качественных моделей требуется большое количество данных с хорошей выборкой;
- 2) нет регрессионной функции;
- 3) требует значительных вычислительных ресурсов. В таком случае необходимо разработать программу для ЭВМ [11]. Исследователями предпринимаются попытки снизить затраты на вычисления, например, в работе [12].

Существуют и другие методы сглаживания поверхностей. Например, метод смежного усреднения (adjacent-averaging), медианного усреднения (adjacent-Median), отрицательной экспоненты (negative exponential), биквадратичного взвешивания (Bisquare weighting) и закона обратных квадратов (inverse-square law)^{5,6}. Однако экспериментальные данные были обработаны именно методом LOESS с трикубической весовой функцией в качестве ядра, так как, по мнению авторов данной статьи, достоинства этого метода позволяют получить наиболее качественные аппроксимирующие поверхности. К тому же метод применен для результатов физического эксперимента, что не встречается в имеющейся литературе.

⁴4.1.4.4. LOESS (aka LOWESS). National institute of standards and technology [Электронный ресурс]. URL: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmd/section1/pmd144.htm> (18.07.2022).

⁵3D Smoother – File Exchange – OriginLab. OriginLab – Origin and OriginPro – Data Analysis and Graphing Software [Электронный ресурс]. URL: <https://www.originlab.com/fileExchange/details.aspx?fid=415> (18.07.2022).

⁶Help Online – Origin help – Algorithms (Smooth). OriginLab – Origin and OriginPro – Data Analysis and Graphing Software. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.originlab.com/doc/Origin-Help/Smooth-Algorithm> (23.07.2022).

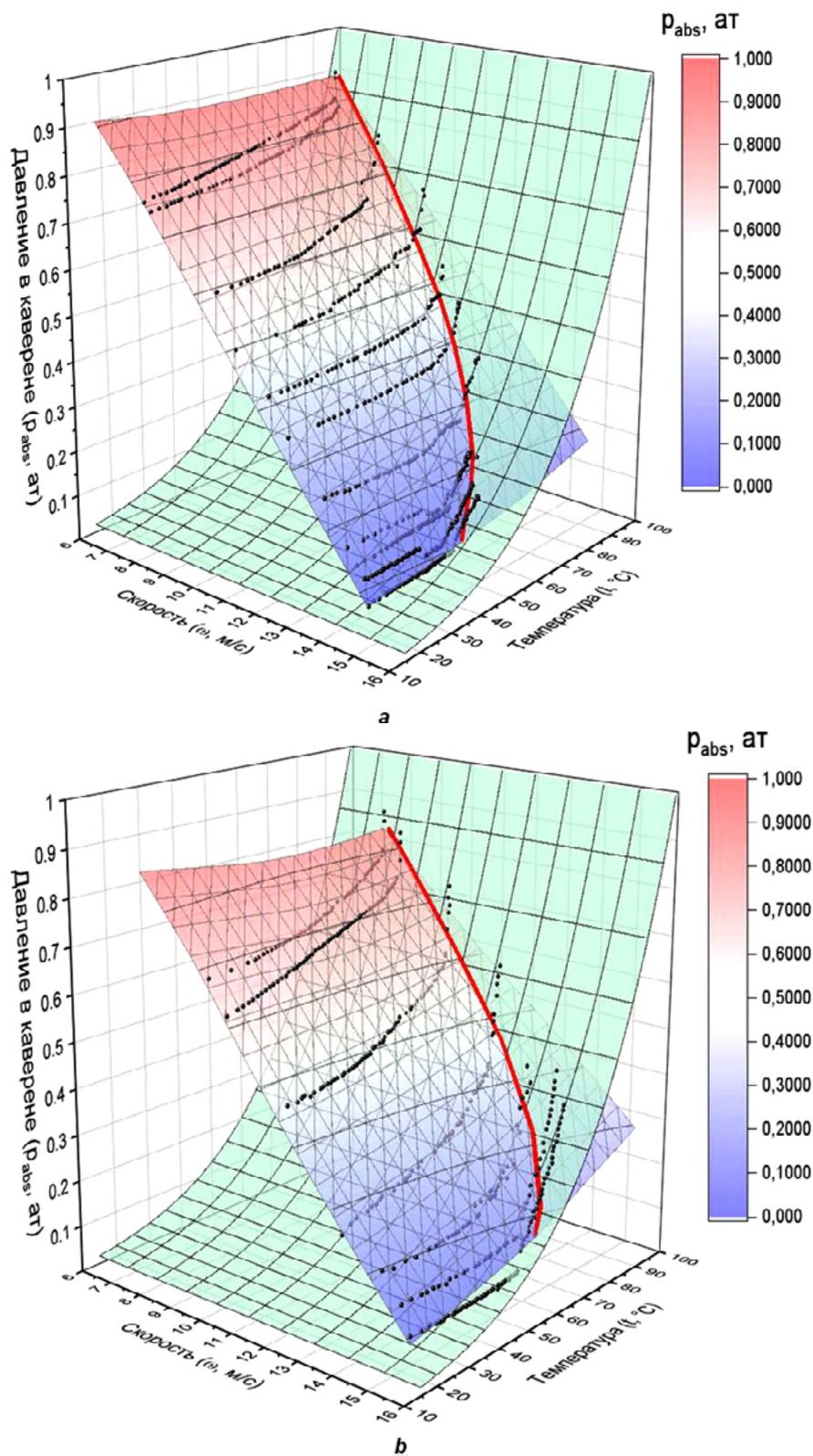


Рис. 1. Зависимость давления в каверне от температуры и скорости:
а – конус 15,45 мм; б – конус 21,75 мм
Fig. 1. Cavern pressure vs temperature and flow velocity:
а – 15.45 mm nozzle; б – 21.75 mm nozzle

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

Для возникновения кавитации необходимо падение давления ниже определенной критической величины, также называемой кавитационной прочностью жидкости. Этот эффект можно создать, поместив на пути потока жидкости препятствие, например, в виде конуса с различным углом раскрытия. Очевидно, что максимальное значение этого критического давления будет равно давлению насыщенных паров жидкости при температуре потока, однако такое утверждение будет справедливо только для полностью дегазированной жидкости и лишенной ядер кавитации. В реальных процессах такой случай почти не встречается, в этой связи актуальным является определение параметров возникновения кавитации в жидкости, содержащей примеси, растворенные газы и свободные пузырьки газа в потоке. Также необходимость разделения параметров паровой и парогазовой кавитации возникает в случае применения кавитации в парогенераторах и конденсаторах пара, в суперкавитационных испарителях.

При обтекании конуса были получены следующие ключевые параметры: температура, давление в кавитационной каверне, длина каверны и скорость потока. Данные были сняты при проведении экспериментов на гидродинамическом стенде, представляющим из себя замкнутый циркуляционный контур.

Описание конструкции представлено в работах [13–15]. Стенд является в некотором роде моделью промышленного объекта, на котором можно экспериментально установить, как скорость потока в трубопроводе влияет на интенсивность возникновения кавитации.

Результаты обработки полученных экспериментальных данных методом LOESS представлены на рис. 1, 2.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Помимо обработки данных по методу LOESS, были определены параметры перехода от парогазовой кавитации к паровой.

На рис. 1 нанесена кривая насыщения водяного пара в виде плоскости. Пересечение аппроксимирующей поверхности с плоскостью кривой насыщения показывает парциальное давление водяного пара, при котором из экспериментального стенда полностью удаляется воздух, а кавитация становится исключительно паровой. Место пересечения обозначено красной линией, которая соответ-

ствует экспериментальным точкам. Область левее красной линии означает, что кавитация еще является парогазовой и в ней давление водяного пара превышает давление насыщения на величину парциального давления воздуха. Область правее красной линии показывает, что кавитация уже полностью паровая. Часть аппроксимирующей поверхности, находящейся за кривой насыщения, как раз относится к такой.

Можно заметить следующую особенность: чем выше скорость потока, тем при более низкой температуре начинается переход от газовой кавитации к паровой.

Данные, приведенные на рис. 1, позволяют определить скорость и температуру, при которых давление становится равным давлению насыщенного пара при той или иной температуре. По определенным таким методом температуре и скорости выбраны соответствующие им длины каверны и представлены в виде красной линии на рис. 2, которая фактически представляет собой линию перехода на рис. 1 в другой проекции.

Результаты наших экспериментов сопоставимы с предыдущими работами [13–16] и результатами численного моделирования кавитации при истечении жидкости из конуса при различных скоростях потока [17]. Сравнивая полученные результаты с работой [18], в которой авторы проводили трехмерное численное исследование нестационарных турбулентных кавитационных течений вокруг круглого диска и конусного кавитатора, и работами [19, 20], в которых авторы экспериментально исследовали гидродинамическую кавитацию в микроканалах, можно сделать вывод, что результаты определения длины каверны при тех же диаметрах препятствия являются сопоставимыми.

По полученным кривым для двух конусов разных размеров можно вывести уравнение плоскости, проходящей через эти точки. Коэффициенты, входящие в уравнение, оказываются достаточно близкими, поэтому переход от газовой к паровой кавитации можно описать одним эмпирическим уравнением. В результате вычислений получено уравнение следующего вида:

$$L_{кр} = 0,037\omega + 0,0033t - 0,49, \quad (5)$$

где $L_{кр}$ – критическая длина каверны, соответствующая переходу от парогазовой к паровой кавитации, м; ω – скорость потока в основании суперкаверны, м/с; t – температура потока, °С.

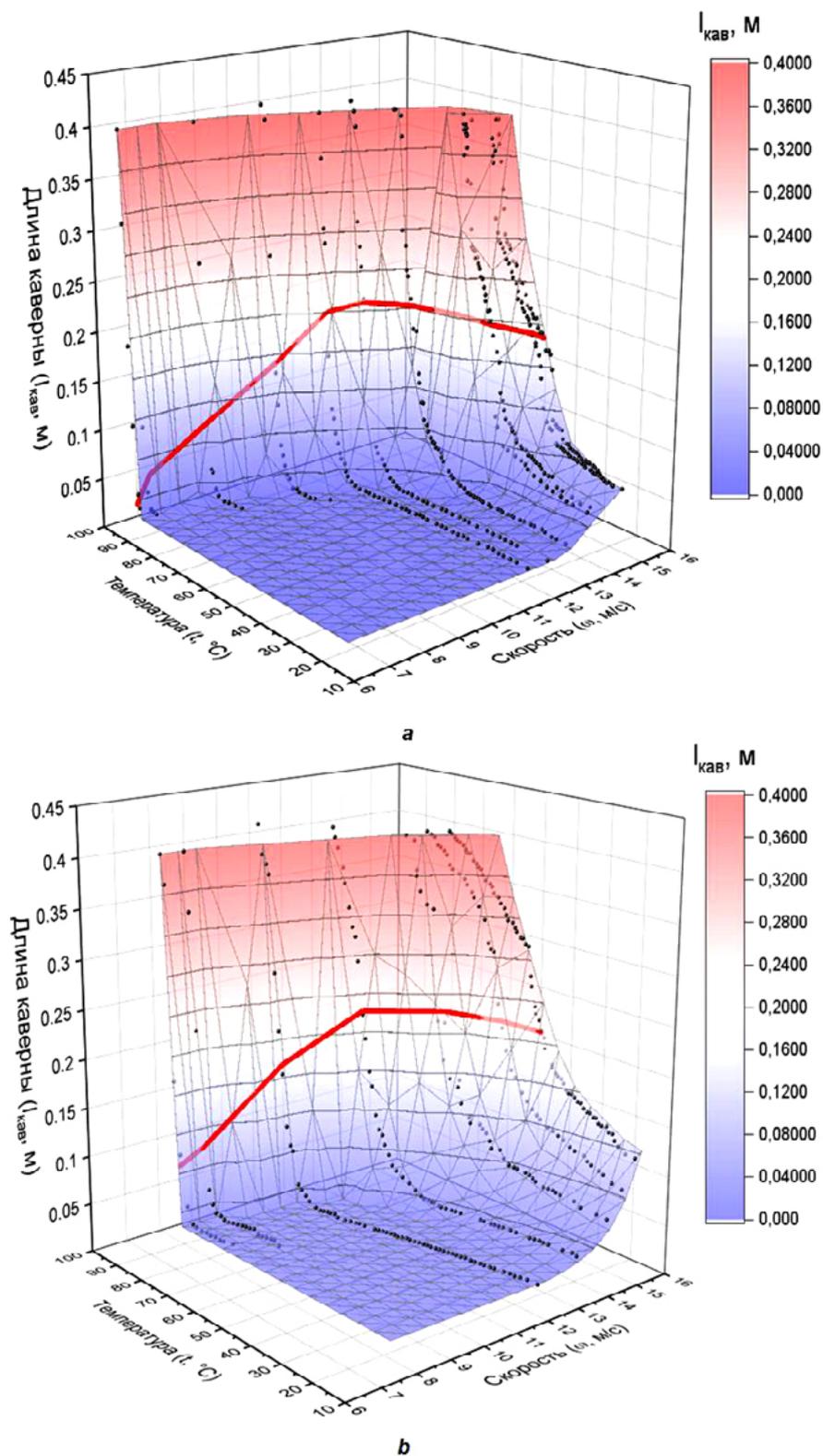


Рис. 2. Зависимость длины каверны от температуры и скорости.
 Красная линия – параметры перехода от парогазовой (внизу) к паровой (вверху) кавитации: а – конус 15,45 мм; б – конус 21,75 мм
Fig. 2. Cavern length vs temperature and flow velocity.
 The red line stands for the parameters of the conversion from steam-gas (area below the red line) to steam (area above the red line) cavitation: а – 15.45 mm nozzle; б – 21.75 mm nozzle

Параметры, входящие в уравнение (5), являются координатами точек в пространстве: скорость ω соответствует координате x , температура t – координате y и критическая длина каверны $L_{кр}$ – координате z .

Предлагаемое уравнение хорошо аппроксимирует экспериментальные данные в заданном диапазоне, рассчитанная по нему критическая длина каверны попадает на кривую перехода от парогазовой к паровой кавитации. За пределами диапазона экспериментальных данных экстраполяция значений не проводилась, необходимо проводить дальнейшие эксперименты в области перехода от парогазовой кавитации к паровой для уточнения эмпирических коэффициентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование для сглаживания массива экспериментальных данных локальной регрессии LOESS позволяет установить взаи-

мосвязь между четырьмя зависимыми между собой параметрами: скоростью потока, температурой, давлением в кавитационной каверне и ее длиной, что позволяет количественно и качественно анализировать изучаемое явление, опираясь на установленные эмпирические зависимости между варьирующимися характеристиками.

На основе сопоставления измеренного в каверне давления с давлением насыщенных паров воды при той же температуре определены параметры парогазовой и паровой кавитации; сделан вывод о том, что момент перехода от парогазовой кавитации к паровой не зависит от геометрии обтекаемого препятствия; на основе анализа экспериментальных данных получено эмпирическое уравнение, позволяющее определить критическую длину каверны, соответствующую переходу от парогазовой к паровой кавитации.

Список источников

1. Kaick O.M., Silva M.V.G., Schwartz W.R., Pedrini H. Fitting smooth surfaces to scattered 3D data using piecewise quadratic approximation // Proceedings. International Conference on Image Processing. 2002. Vol. 1. P. 493–496. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2002.1038068>.
2. Carr J.C., Beatson R.K., McCalum B.C., Fright W.R., McLennan T.J., Mitchel T.J. Smooth surface reconstruction from noisy range data // Proceedings of the 1st international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia. 2003. P. 119–127. <https://doi.org/10.1145/604471.604495>.
3. Cottrell J.A., Hughes T.J.R., Bazilevs Y. Isogeometric analysis: toward Integration of CAD and FEA. John Wiley & Sons; 2009. 335 p.
4. Cleveland W.S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots // Journal of the American Statistical Association. 1979. Vol. 74. Iss. 368. P. 829–836. <https://doi.org/10.1080/01621459.1979.10481038>.
5. Irizarry R.A. Local regression with meaningful parameters // The American Statistician. 2001. Vol. 55. Iss. 1. P. 72–79. <https://doi.org/10.1198/000313001300339969>.
6. Cleveland W.S, Grosse E. Computational methods for local regression // Stat Comput. 1991. Vol. 1. P. 47–62. <https://doi.org/10.1007/BF01890836>.
7. Jacoby W.G. Loess: a nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables. Electoral Studies. 2000;19(4):577-613. [https://doi.org/10.1016/S0261-3794\(99\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0261-3794(99)00028-1).
8. Loader C.R. Local regression and likelihood. New York: Springer, 1999. 290 p.
9. Chambers J.M., Hastie T.J. Statistical Models in S. New York, 1992. 624 p.
10. Jacoby W.G. Loess: a nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables. Electoral Studies. 2000;19(4):577-613. [https://doi.org/10.1016/S0261-3794\(99\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0261-3794(99)00028-1).
11. Cleveland W.S. lowess: a program for smoothing scatterplots by robust locally weighted regression // The American Statistician. 1981. Vol. 35. Iss. 1. P. 54–55. <https://doi.org/10.2307/2683591>.
12. Talgorn B., Audet C., Digabel S., Kokkolaras M. Locally weighted regression models for surrogate-assisted design optimization // Optimization and Engineering. 2018. Vol. 19. Iss. 1. P. 213–238. <https://doi.org/10.1007/s11081-017-9370-5>.
13. Kulagin V.A., Radzyuk A.U., Istyagina E.B., Pjanykh T.A. Experimental stand for the study of cavitation flow regimes // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2018. Vol. 450. Iss. 3. P. 032023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/450/3/032023>.
14. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pjanykh T.A., Grishina I.I. The determination of the dependence of the cavern length on the flow velocity on an experimental hydrodynamic workbench // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399. Iss. 2. P. 022050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/2/022050>.
15. Радзюк А.Ю., Кулагин В.А., Истягина Е.Б., Пьяных Т.А. Модернизация кавитационного стенда для исследования двухфазных режимов течения // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 12. № 4. С. 468–475. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0155>.
16. Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B., Kulagina L.V., Li Feng-Chen, Pjanykh T.A., Grishaev D.A, et al. Determining properties of a flow-through supercavitation desalination plant // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2023.

Vol. 16. Iss. 1. P. 6–21. EDN GSDAGT.

17. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pjanykh T.A., Kolosov M.V. Numerical simulation of supercavitation in the constrained flow // *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2019. Vol. 315. Iss. 3. P. 032027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/3/032027>.
18. Fard M.B., Nikseresht A.H. Numerical simulation of unsteady 3D cavitating flows over axisymmetric cavitators // *Scientia Iranica*. 2012. Vol. 19. Iss. 5. P. 1258–1264. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.07.013>.
19. Lobasov A.S., Skripkin S.G., Tsoi M.A., Kravtsova A.Y. Investigation of the cavitation processes behind a cylinder located in a microchannel in a wide range of Reynolds numbers // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022. Vol. 38. P. 102306. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102306>.
20. Ghorbani M., Sadaghiani A.K., Yidiz M., Koşar A. Experimental and numerical investigations on spray structure under the effect of cavitation phenomenon in a microchannel // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017. Vol. 31. Iss. 1. P. 235–247. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-1226-y>.

References

1. Kaick O.M., Silva M.V.G., Schwartz W.R., Pedrini H. Fitting smooth surfaces to scattered 3D data using piecewise quadratic approximation. In: *Proceedings. International Conference on Image Processing*. 2002;1:493-496. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2002.1038068>.
2. Carr J.C., Beatson R.K., McCalum B.C., Fright W.R., McLennan T.J., Mitchel T.J. Smooth surface reconstruction from noisy range data. In: *Proceedings of the 1st international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia*. 2003;119-127. <https://doi.org/10.1145/604471.604495>.
3. Cottrell J.A., Hughes T.J.R., Bazilevs Y. *Isogeometric analysis: toward Integration of CAD and FEA*. John Wiley & Sons; 2009. 335 p.
4. Cleveland W.S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*. 1979;74(368):829-836. <https://doi.org/10.1080/01621459.1979.10481038>.
5. Irizarry R.A. Local regression with meaningful parameters. *The American Statistician*. 2001;55(1):72-79. <https://doi.org/10.1198/000313001300339969>.
6. Cleveland W.S., Grosse E. Computational methods for local regression. *Stat Comput*. 1991;1:47-62. <https://doi.org/10.1007/BF01890836>.
7. Jacoby W.G. Loess: a nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables. *Electoral Studies*. 2000;19(4):577-613. [https://doi.org/10.1016/S0261-3794\(99\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0261-3794(99)00028-1).
8. Loader C.R. *Local regression and likelihood*. New York: Springer; 1999, 290 p.
9. Chambers J.M., Hastie T.J. *Statistical models in S*. New York; 1992, 624 p.
10. Jacoby W.G. Loess: a nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables. *Electoral Studies*. 2000;19(4):577-613. [https://doi.org/10.1016/S0261-3794\(99\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0261-3794(99)00028-1).
11. Cleveland W.S. lowess: a program for smoothing scatterplots by robust locally weighted regression. *The American Statistician*. 1981;35(1):54-55. <https://doi.org/10.2307/2683591>.
12. Talgorn B., Audet C., Digabel S., Kokkolaras M. Locally weighted regression models for surrogate-assisted design optimization. *Optimization and Engineering*. 2018;19(1):213-238. <https://doi.org/10.1007/s11081-017-9370-5>.
13. Kulagin V.A., Radzyuk A.U., Istyagina E.B., Pjanykh T.A. Experimental stand for the study of cavitation flow regimes. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018;450(3):032023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/450/3/032023>.
14. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pjanykh T.A., Grishina I.I. The determination of the dependence of the cavern length on the flow velocity on an experimental hydrodynamic workbench. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1399(2):022050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/2/022050>.
15. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pjanykh T.A. Modernization of the cavitation stand for the investigation of two-phase flow regimes. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2019;12(4):468-475. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0155>.
16. Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B., Kulagina L.V., Li Feng-Chen, Pjanykh T.A., Grishaev D.A., et al. Determining properties of a flow-through supercavitation desalination plant. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2023;16(1):6-21. EDN GSDAGT.
17. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pjanykh T.A., Kolosov M.V. Numerical simulation of supercavitation in the constrained flow. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2019;315(3):032027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/3/032027>.
18. Fard M.B., Nikseresht A.H. Numerical simulation of unsteady 3D cavitating flows over axisymmetric cavitators. *Scientia Iranica*. 2012;19(5):1258-1264. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.07.013>.
19. Lobasov A.S., Skripkin S.G., Tsoi M.A., Kravtsova A.Y. Investigation of the cavitation processes behind a cylinder located in a microchannel in a wide range of Reynolds numbers. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022;38:102306. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102306>.
20. Ghorbani M., Sadaghiani A.K., Yidiz M., Koşar A. Experimental and numerical investigations on spray structure under the effect of cavitation phenomenon in a microchannel. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017;31(1):235-247. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-1226-y>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гришаев Денис Андреевич,
аспирант,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр-т. Свободный, 79, Россия
✉ frank_benyton@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-7116-2380>

Радзюк Александр Юрьевич,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры теплотехники и гидрогазодинамики
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
пр-т. Свободный, 79, Россия
aradzyuk@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8387-1957>

Истягина Елена Борисовна,
к.ф.-м.н., доцент,
доцент кафедры теплотехники и гидрогазодинамики,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр-т. Свободный, 79, Россия
tim.484@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 15.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 22.06.2023 г.; принята к публикации 13.07.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis A. Grishaev,
Postgraduate student,
Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia
✉ frank_benyton@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-7116-2380>

Aleksandr Yu. Radzyuk,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Heat Technology and Fluid Dynamics,
Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia
aradzyuk@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8387-1957>

Elena B. Istyagina,
Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Heat Technology and Fluid Dynamics,
Siberian Federal University, 79, Svobodny pr., Krasnoyarsk
660041, Russia
tim.484@mail.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests. The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 15.05.2023; approved after reviewing 22.06.2023; accepted for publication 13.07.2023.