

УДК 532.528

Modernization of the Cavitation Stand for the Investigation of Two-Phase Flow Regimes

**Alexander Yu. Radzyuk, Vladimir A. Kulagin,
Elena B. Istyagina and Tatyana A. Pinykh***
*Siberian Federal University
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia*

Received 26.01.2019, received in revised form 18.03.2019, accepted 15.05.2019

Experimental methods are the most obvious and reliable in cavitation studies. The number of bubbles of insoluble oxygen in a flow influences cavitation processes. In order to reduce the amount of dissolved gases in the experimental setup, it is proposed to use a resorber. The flow regimes of fluid flow around a solid with the formation of a cavitation zone in the flow are investigated. The type of cavitation flow is determined. A comparison is made of the experimental results of the formation of cavitation conditions before and after the installation of the resorber. The experiments were carried out with technical tap water, the reliability of the results is confirmed by comparing them with the literature data.

Keywords: experimental installation, cavitation, cavitation regimes, resorber, experimental base, hydro- and thermodynamic modeling.

Citation: Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pinykh T.A. Modernization of the cavitation stand for the investigation of two-phase flow regimes, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2019, 12(4), 468-475. DOI: 10.17516/1999-494X-0155.

Модернизация кавитационного стенда для исследования двухфазных режимов течения

**А.Ю. Радзюк, В.А. Кулагин,
Е.Б. Истягина, Т.А. Пьяных**
*Сибирский федеральный университет
Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

Экспериментальные методы являются самыми очевидными и достоверными при исследовании кавитации. Количество пузырьков нерастворенного кислорода в потоке существенно влияет на протекание кавитационных процессов. Для уменьшения количества растворенных газов в экспериментальной установке предлагается использовать ресорбер.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: v.a.kulagin@mail.ru

Исследованы режимы течения при обтекании жидкостью твердого тела с формированием в потоке зоны кавитации. Определен тип наблюдаемой кавитации. Проведено сравнение полученных экспериментальных результатов формирования кавитационных режимов до и после установки ресорбера. Опыты проводились с технической водопроводной водой, достоверность результатов подтверждается их сравнением с литературными данными.

Ключевые слова: экспериментальная установка, кавитация, кавитационные режимы, ресорбер, экспериментальная база, гидро- и термодинамическое моделирование.

Введение

Развитие высоких технологий, в частности, в области гидродинамики больших скоростей представляется стратегически важной проблемой обеспечения национальной безопасности, стабильного и долгосрочного роста российской экономики за счет освоения Арктики, поддержания политического и научно-технического авторитета Российской Федерации на мировой арене.

При движении тела в капельной жидкости с большой скоростью (порядка 30 м/с и более), как правило, возникает кавитация. По классификации, предложенной Блейком и принятой на симпозиуме в Лондоне в 1955 г. [1], механизм возникновения кавитации трактуется или как инерционное развитие пузырьков (паровая кавитация), или как диффузия растворенного газа в ядре кавитации (газовая кавитация) из текущей жидкости или из трещин, имеющих на поверхности тела (гипотеза Корнфельда-Суворова [2, 3]).

В настоящее время вопросы кавитации в современном техническом мире занимают одну из ключевых позиций. Известно, что при движении тел с большими скоростями в реальной жидкости имеет место их взаимодействие с многофазными средами, которое, в свою очередь, имеет ряд принципиальных отличий от взаимодействия с однофазными потоками. Например, траектории движения частиц не совпадают с линиями тока основного компонента, отличительные особенности имеет распространение в многофазной среде ударных волн. Но главное отличие связано с динамикой процессов, происходящих на поверхности тела [4–6].

Несмотря на определенные успехи численных исследований в области гидродинамики больших скоростей, вследствие чрезвычайной сложности физических процессов, происходящих при кавитации, механизм действия последней трудно поддается теоретическому изучению. Один из способов повышения эффективности процессов, связанных с кавитационными течениями, разработка и развитие экспериментальной техники проведения модельных и натурных исследований с учетом масштабного эффекта. Опыт создания этой техники зависит от задач, стоящих перед исследователями, он всегда уникален и должен быть непременно восстребован и использован. Для прогнозирования эксплуатационных характеристик оборудования, далеких от идеальности, необходимо знать не только стандартные термодинамические характеристики, например, суперкавитационных обтеканий, но и избыточные функции фаз интересующих систем. Сведения о термодинамических свойствах и фазовых равновесиях в многокомпонентных системах, как правило, ограничены [7, 8].

Места нарушения сплошности жидкости принято связывать с наличием в жидкости так называемых кавитационных зародышей – каких-либо неоднородностей в жидкости. Такими неоднородностями могут быть как твердые включения, так и газы, находящиеся в жидкости.

Общее газосодержание жидкости определяется количеством растворенного и свободного газа, именно наличие свободного газа нарушает однородность структуры жидкости, способствуя уменьшению сопротивления растягивающим напряжениям, т. е. разрыву потока.

Свободный газ, заключенный в мельчайших пустотах внутри жидкости – микропузырьках, образует своеобразный стабильно существующий пузырьковый ансамбль. Принято считать, что общее количество такого газа пренебрежимо мало и поэтому не может играть заметную роль даже в таких жидкостных процессах, где фактор нарушения сплошности среды, казалось бы, должен быть на первом месте. Согласно существующим оценкам доля свободного газа в отстоявшейся воде составляет менее 10^{-10} [9]. Вместе с тем доказано, что в действительности относительное свободное газосодержание воды намного выше [10–12]. Даже в длительно отстоявшейся дистиллированной воде при равновесных условиях оно может превышать 10^{-6} , а для отстоявшейся водопроводной воды при тех же условиях может быть на порядок выше, т.е. более 10^{-5} . Концентрация растворенных газов, в частности воздуха, может изменяться вследствие перемещения отдельных объемов жидкости относительно друг друга или за счет диффузионных процессов переноса вещества из одних микрообъемов жидкости в другой [13]. Обеспечение абсолютного отсутствия воздуха в экспериментальных установках является сложной задачей, поэтому большинство исследователей опираются на методы, предполагающие его наличие [14]. Растворение мелких зародышевых пузырьков обеспечивается ресорберами, которыми оснащаются кавитационные трубы [15], однако отдельные исследования [16] отмечают отрицательную роль ресорберов, связанную с сохранением пузырьков крупного размера, нежелательных с точки зрения ложной кавитации.

Следует отметить, например, что все более серьезный дефицит пресной воды стимулирует быстрое развитие технологии опреснения из-за большой перспективы опреснения морской воды. Настоящие три крупномасштабные промышленные технологии опреснения включают многоступенчатую вспышку (MSF), многократный эффект дистилляции (MED) и обратного осмоса (RO). Первые две технологии относятся к тепловым методам, в которых тепло- и массопередача, вызванная изменением фазы, используется для сбора пресной воды, в то время как последний относится к мембранному методу, в котором диффузия молекул воды через полупроницаемую мембрану, вызывая массоперенос, доминирует в процессе опреснения. Тем не менее существование твердых стенок в MSF и MED приводит к образованию накипи и загрязнений и, как следствие, уменьшению коэффициента теплопередачи, в то время как тщательная предварительная обработка необходима в RO-методе для снижения образования нагара на мембране [17]. Для преодоления недостатков вышеупомянутых основных методов опреснения предлагаются новые устройства, построенные на базе кавитационной технологии [3].

Целью описываемых экспериментов было изучение режимов течения при обтекании жидкостью твердого тела с формированием в потоке зоны кавитации. В задачи работы входило определение типа наблюдаемой кавитации – паровая или газовая – и режима течения – докавитационное, переходный режим, развитая кавитация.

Экспериментальная установка

Анализ современных зарубежных и отечественных публикаций показывает актуальность решения перечисленных выше задач, в основе большинства которых лежат прецизионные фи-

зические эксперименты. Наиболее распространенным инструментом для изучения кавитации являются кавитационные трубы – лабораторные установки, имеющие в своем составе замкнутый или разомкнутый трубопровод, в рабочем участке которого создается поток воды с регулируемой скоростью и давлением. Гидродинамические, в том числе кавитационные, трубы необходимы не только в научно-исследовательских, но и в проектных организациях, работающих в области создания корабельных движителей и гидравлических механизмов, а также в вузах, имеющих кафедры соответствующего профиля [6].

Экспериментальная установка представляет собой замкнутый гидродинамический контур (рис. 1). Движение жидкости осуществляется центробежным насосом, поток выравнивается, проходя через хойнекомб длиной 300 мм, представляющий собой набор трубок меньшего диаметра, поступает в ресорбер, где поток освобождается от свободного воздуха, рабочий участок и далее снова в насос.

Рабочий участок состоит из конфузора и прозрачной цилиндрической трубы ($d_{\text{внутр.}} = 30$ мм, $l = 200$ мм) с установленным в ней сопротивлением в виде усеченного конуса. В основании конуса имеется отверстие для измерения давления в каверне. Расчетный профиль скоростей и число Рейнольдса Re по длине рабочего участка, рассчитанные для максимального расхода, приведены на рис. 2.

Эксперимент и полученные результаты

Система гидродинамической трубы заполняется водопроводной водой, часть растворенного воздуха удаляется сразу, через воздушные клапаны [18]. Эксперименты проводились при различных расходах жидкости. Внешний вид каверны представлен на рис. 3. Были проведены две серии экспериментов: без ресорбера и с ресорбером. На рис. 4 приведена зависимость давления в каверне и давления насыщенных паров воды в зависимости от температуры.



Рис. 1. Экспериментальная установка

Fig. 1. Experimental setup

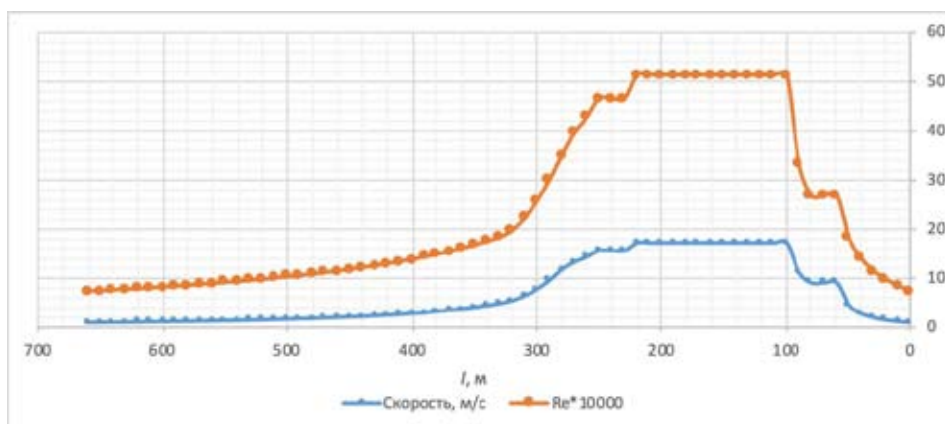


Рис. 2. Профиль скорости потока в рабочем участке и число Re

Fig. 2. The flow velocity profile in the working area and the number Re

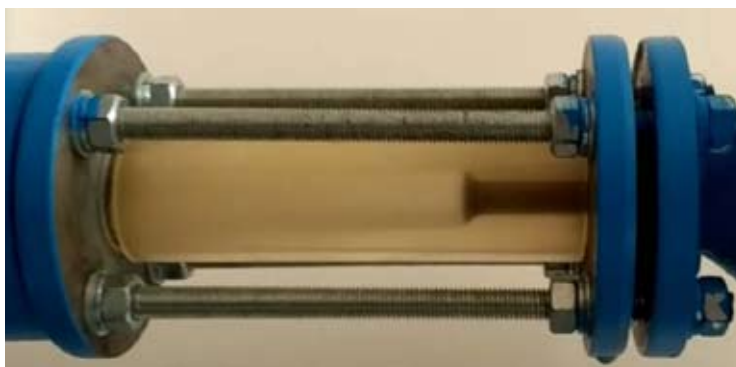


Рис. 3. Внешний вид каверны

Fig. 3. Appearance of a cavern

Обсуждение результатов

Вне зависимости от расхода и размера конуса каверны имели выраженные границы раздела с потоком, длины каверны значительно превышали их ширину, что соответствует режиму развитой кавитации.

Проведенные эксперименты показали, что установка ресорбера в проточную часть стенда привела к росту абсолютного давления в каверне. Это можно связать с большим гидравлическим сопротивлением используемого ресорбера, внутренняя часть которого заполнена выполненными из установленных поперечно потоку листов сетки из нержавеющей проволоки с размером ячейки около 5 мм.

Во всем диапазоне изменения температуры потока наблюдаемое давление в каверне выше давления насыщенных паров воды. Связано это с наличием в каверне не только пара, но и воздуха. На начальном этапе, когда активно идет дегазация воды, парциальное давление воздуха в каверне велико, с ростом температуры и удалением воздуха расхождение кривых минимизируется, количество воздуха и, соответственно, его парциальное давление падает.

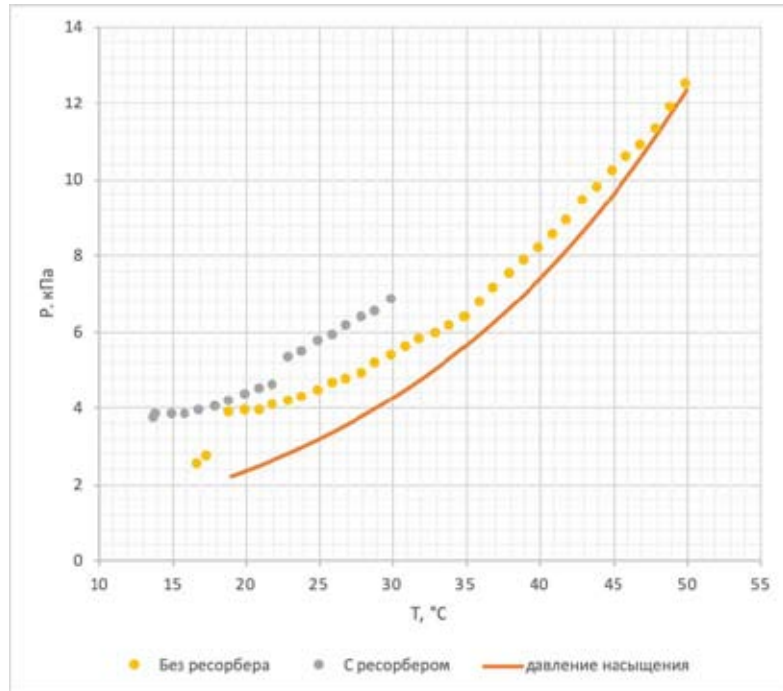


Рис. 4. Сравнение измеренных давлений в камере с давлением насыщения паров воды

Fig. 4. Comparison of measured pressures in the cavity with the saturation pressure of water vapor

Приведенные данные показывают, что по ходу проведения эксперимента температура растет, соответственно, растет давление насыщения, а парциальное давление воздуха в камере снижается, уменьшается его количество – происходит процесс деаэрации.

Заключение

Представленный в работе модернизированный гидродинамический стенд позволяет проводить изучение кавитационных режимов обтекания твердых тел. Полученные результаты позволили определить тип наблюдаемой кавитации – газовая и режим течения – развитая кавитация.

Полученные данные позволяют сделать вывод о возможности использования установки для исследований кавитационных процессов, в частности для апробации реальных технологических установок, например для кавитационной обработки жидкостей, термо-механической обработки многокомпонентных сред, исследований процессов кавитационной деаэрации и опреснения.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края в рамках научных проектов № 18-48-242001, 18-41-242004 и 18-41-242008.

Список литературы

- [1] Эйзенберг П.О. О механизме возникновения кавитации, *Изв. АН СССР. Механика*, 1958, 5(51), 24–32 [Eizenberg P.O. On the mechanism of cavitation, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Mekh.* 1958, 5, 24–32 (in Russian)].
- [2] Корнфельд М. *Упругость и прочность жидкостей*. М., Л.: ГИТТЛ, 1951. 107 с. [Kornfeld M. *Elasticity and Strength of Fluids*. Moscow, GITTL, 1951 (in Russian)].
- [3] Ивченко В.М., Кулагин В.А., Немчин А.Ф. *Кавитационная технология*; ред. акад. АН УССР Г.В. Логвинович. Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. 200 с. [Ivchenko V.M., Kulagin V.A. and Nemchin V.A. *Cavitation Technology*, Ed. by G. V. Logvinovich, Izd. KGU, Krasnoyarsk, 1990, 200 p. (in Russian)].
- [4] Демиденко Н.Д., Кулагин В.А., Шокин Ю.И. *Моделирование и вычислительные технологии распределенных систем*. Новосибирск: Наука, 2012. 424 с. [Demidenko N.D., Kulagin V.A. and Shokin Yu.I. *Modeling and Calculating the Technology of Distributed Systems*, Nauka, Novosibirsk, 2012, 424 p. (in Russian)].
- [5] Демиденко Н.Д., Кулагин В.А., Шокин Ю.И., Ли Ф.-Ч. *Тепломассообмен и суперкавитация*. Новосибирск: Наука, 2015. 436 с. [Demidenko N.D., Kulagin V.A., Shokin Yu.I. and Li F.Ch. *Heat–Mass Exchange and Supercavitation*. Novosibirsk, Nauka, 2015, 436 p. (in Russian)].
- [6] Kulagin V.A., Moskvichev V.V., Makhutov N.A., Markovich D.M., Shokin Yu.I. Physical and Mathematical Modeling in the Field of High-Velocity Hydrodynamics in the Experimental Base of the Krasnoyarsk Hydroelectric Plant. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2016, 86(6), 454–465; DOI: 10.1134/S1019331616060034.
- [7] Ивченко В.М. Кавитация и некоторые задачи гидродинамики, *Исследование по прикладной гидродинамике*. Киев: Наукова думка, 1965. 70–78 [Ivchenko V.M. Cavitation and some problems of hydrodynamics. *Applied Hydrodynamics Studies*, Kiev, Naukova Dumka, 1965, 70–78 (in Russian)].
- [8] Ивченко В.М. Основы гидродинамики суперкавитирующих движителей, *Задачи и методы гидродинамики подводных крыльев и винтов*; ред. В.М. Ивченко, А.Н. Панченков. Киев: Наукова думка, 1966. 107–157 [Ivchenko V.M. Basics of hydrodynamics of supercavitational movers. *Problems and Methods of Hydrodynamics of Hydrofoils and Propellers*, Ed. by V.M. Ivchenko and A.N. Panchenkov. Kiev, Naukova Dumka, 1966, 107–157 (in Russian)].
- [9] Гаврилов Л.Д. Содержание свободного газа в жидкостях и методы его измерения, *Физика и техника мощного ультразвука*; ред. Л.Д. Розенберг М.: Наука, 1970. Т. 3. 395–426 [Gavrilov L.D. Content of free gas in liquids and methods of its measurement, *Physics and technology of high-power ultrasound*; ed. L.D. Rosenberg M.: Nauka, 1970. Т. 3. 395–426 (in Russian)].
- [10] Макаров В.К. Повышенное свободное воздуходержание и пороги акустической кавитации, *Тез. докл. II Всесоюз. симпозиума по оптоакустике*. Ташкент, 1982. 27 с. [Makarov V. Increased free air content and acoustic cavitation thresholds, *Tez. report II All-Union. Optoacoustics Symposium*. Tashkent, 1982. 27 p. (in Russian)].
- [11] Климова Л.В., Макаров В.К., Чулкова Н.В. и др. Свободный воздух и проблема кавитационных зародышей, *Сб. тр. XI междунар. симпозиума по нелинейной акустике*. Новосибирск, 1987. 41–43 [Klimova L.V., Makarov V.K., Chulkova N.V. et al. Free air and the problem of cavitation germs, *Sat. tr. XI int. Symposium on nonlinear acoustics*. Novosibirsk, 1987. 41–43 (in Russian)].

[12] Макаров В.К., Супрун С.Г., Чулкова Н.В. Влияние гидродинамических возмущений на кавитационную прочность воды, *Акуст. журн.* 1988, 1, 179–181 [Makarov V.K., Suprun S.G., Chulkova N.V. Influence of hydrodynamic perturbations on the cavitation strength of water, *Akust. Journals*, 1988, 1, 179–181 (in Russian)].

[13] Арзуманов Э.С. *Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях*. М.: Энергия, 1978. 304 с. [Arzumanov E.S. *Cavitation in local hydraulic resistances*. М.: Energiya, 1978. 304 p. (in Russian)].

[14] Добросельский К.Г. Методика исследования поперечного обтекания цилиндра в гидродинамической трубе, *Вестник НГУ, Серия: Физика*, 2013, 8(4), 110–117 [Dobroselsky K.G. Methods for studying the transverse flow past a cylinder in a hydrodynamic tube, *Vestnik NSU, Series: Physics*, 2013, 8(4), 110–117 (in Russian)].

[15] Мачинский А.С. *Гидродинамические и теплообменные характеристики суперкавитационных испарительных аппаратов для обессоливания жидкостей*. [Электронный ресурс]. Дис. ... канд. технические науки: 05.17.08. М.: РГБ, 2007. (Из фондов Российской государственной библиотеки) [Machinsky A.S. *Hydrodynamic and heat exchange characteristics of supercavitational evaporators for desalting liquids* [Electronic Resource]. Dis. ... Cand. technical sciences: 05.17.08. М.: RSL, 2007. (From the funds of the Russian State Library) (in Russian)].

[16] Горшков А.С., Русецкий А.А. *Кавитационные трубы*. Л.: Судостроение, 1974 [Gorshkov A.S. and Rusetskii A.A. *Cavitation Tunnels*, Leningrad, Sudostroenie, 1974 (in Russian)].

[17] Zhi-Ying Zheng, Qian Li, Lu Wang, Li-Ming Yao, Wei-Hua Cai, Vladimir A. Kulagin, Hui Li, Feng-Chen Li Numerical study on the effect of steam extraction on hydrodynamic characteristics of rotational supercavitating evaporator for desalination, *Desalination* 455 (2019) 1–18, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.12.012>

[18] Kulagin V.A., Radzyuk A.U., Istyagina E.B. and Pinykh T.A. Experimental stand for the study of cavitation flow regimes. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 450 (2018) 032023, Doi:10.1088/1757-899X/450/3/032023.