

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

О.К. Безюков

*Государственный университет морского и речного флота,
г. Санкт-Петербург, Россия*

В.А. Жуков

*Государственный университет морского и речного флота,
г. Санкт-Петербург, Россия*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4045-4504>

А.А. Пуляев

*Государственный университет морского и речного флота,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Статья посвящена описанию конструкции экспериментальной установки, обеспечивающей получение новых данных о кавитационно-эрозионных разрушениях в высокотемпературных системах охлаждения. На основании анализа отечественных и зарубежных источников научно-технической информации касающихся исследований кавитационных процессов установлены технические объекты, в которых имеют место кавитационные процессы, факторы, влияющие на интенсивность кавитационно-коррозионных разрушений, определены методы, которые используются для исследования кавитации. Предложена модернизированная конструкция лабораторной установки, основным элементом которой является высокочастотный магнотриксционный вибратор. Благодаря герметичной экспериментальной полости установка позволяет определять интенсивность кавитационно-эрозионных разрушений при высоких температурах жидкости и давлениях выше атмосферного, характерных для высокотемпературного охлаждения судовых дизелей. Использование установки позволит получить корректные сведения о ресурсе элементов систем высокотемпературного охлаждения судовых дизелей.

Ключевые слова: кавитация, кавитационно-эрозионные разрушения, методы исследования кавитации, судовые дизели, высокотемпературное охлаждение, лабораторная установка

Введение

Кавитационные процессы являются объектом научных исследований уже более ста лет. Согласно сведениям, приведенным в работе [1], термин «кавитация» в науку был введен в 1894 году английским инженером-исследователем Р. Фрудом, сыном выдающегося ученого У. Фруда [2]. Явление кавитации (зарождение и схлопывание газовой или паровой полости или каверны в жидкости), условия и механизм возникновения каверн, динамика их роста и схлопывания в различных условиях достаточно подробно рассмотрены в работах [3–9].

Процесс кавитации носит локальный характер, зависит от большого количества факторов, протекает за очень короткий временной период. Все это осложняет процесс изучения и исследования кавитационных процессов. Одними из первых работ, посвященных исследованиям процессов кавитации, имеющих место в судостроении и судовой энергетике, являются работы [10–13].

Обзор научно-технической литературы свидетельствует, что проблема защиты элементов судовых энергетических установок от кавитационно-эрозионных и кавитационно-коррозионных разрушений продолжает оставаться актуальной.

Сохранение актуальности обусловлено, прежде всего, тем, что кавитационные процессы, имея одинаковую природу, продолжают приводить к разрушениям гребных винтов и подводных крыльев судов [14–19], элементов гидропривода, рабочих колес циркуляционных насосов и пластинчатых машин гидравлических систем [20–23], цилиндрических втулок поршневых двигателей [24, 25], элементов топливной аппаратуры двигателей [26–28].

Кавитационно-эрозионные разрушения деталей энергетических установок, двигателей, машин и механизмов различного назначения существенно сокращают их ресурс и снижают эффективность их работы [29–32].

Основными способами защиты поверхностей деталей машин и механизмов от кавитационно-эрозионных разрушений являются разработка сплавов титана [33] и меди [34, 35], обладающих высокой износостойкостью, и защитных покрытий на основе никеля и кобальта [36, 37], а также покрытий из композитных материалов [38].

Определение влияния различных факторов на интенсивность коррозионно-эрозионных разрушений и оценка эффективности защиты поверхностей деталей от таких разрушений сохраняет важное научное и прикладное значение.

Методы и материалы

Основными факторами, определяющими характер кавитационных процессов и интенсивность вызываемых ими разрушений, и в связи с этим представляющими интерес для исследователей, являются: химический состав жидкости [39–43], параметры и структура потока [44, 45], температура жидкости [46–50].

Сложность кавитационных процессов и многообразие факторов, влияющих на них, обуславливают необходимость использования различных методов научных исследований. Анализ литературных источников показал, что для исследования природы кавитационно-эрозионных разрушений, динамики зарождения и схлопывания парогазовых полостей, способностей материалов и покрытий противостоять кавитационно-эрозионным разрушениям применяются следующие основные методы: визуального наблюдения и видеосъемки [51–53], численного моделирования с использованием специализированного программного обеспечения [54–58], контроля шероховатости поверхности, подвергавшейся кавитационно-эрозионному воздействию [59–61], вибрационного воздействия на экспериментальные образцы [62–65] с последующим определением потери массы образцов.

Проведенный обзор научно-технической литературы показывает, что к деталям, подверженным кавитационно-эрозионным разрушениям, относятся элементы систем охлаждения судовых дизелей (цилиндрические втулки, рабочие колеса циркуляционных насосов, запорная арматура). Анализируя условия работы деталей систем охлаждения судовых дизелей, необходимо учитывать тенденцию расширения использования высокотемпературного охлаждения (ВТО), достоинства которого описаны в работах [66–68]. Необходимо отметить, что в работах, посвященных высокотемпературным системам охлаждения судовых дизелей, не уделено внимание исследованию влияния особенностей ВТО (температуры охлаждающей жидкости, давления в системе охлаждения) на протекание кавитационных процессов. С целью исследования влияния указанных факторов на интенсивность кавитационно-эрозионных разрушений в условиях высокотемпературных систем охлаждения судовых дизелей был разработан и создан экспериментальный стенд.

В качестве исходной информации при разработке стенда использовались источники [69, 70], а также конструкция стенда, описанного в работе [34] (рис. 1). Основными элементами установки являются высокочастотный магнитоэстрикционный вибратор, сосуд, заполненный жидкостью, которая охлаждается в процессе испытаний и образец исследуемого материала, износ которого определяется последующим взвешиванием или оценкой характеристик поверхности.

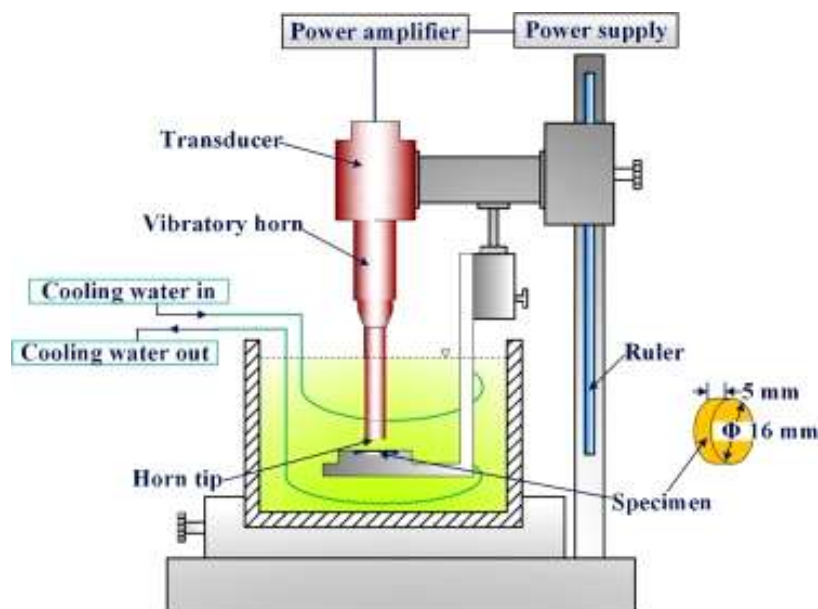


Рис. 1. Вибрационная установка для исследования кавитационной стойкости материалов

Недостатками рассмотренных аналогов является ограниченность области исследований из-за отсутствия возможности изменять температуру и давление рабочей жидкости, состава газа над ее свободной поверхностью из-за негерметичности рабочей камеры.

Из-за использования негерметичной рабочей камеры в данном устройстве невозможно:

1. Проведение исследований кавитационного разрушения материалов при различных давлениях и температурах жидкости.

2. Проведение исследований эрозионных разрушений при температурах образцов материалов, отличных от температуры кавитирующей жидкости.

3. Исследовать влияние состава и свойств газов над поверхностью кавитирующей рабочей жидкости на интенсивность эрозионных разрушений.

4. Обеспечить контроль и регулирование температуры и исследуемого образца, с целью определения их влияния на интенсивность кавитационных разрушений.

Выявленные недостатки прототипа являются причиной невозможности получения достоверных результатов исследования эрозионных процессов в условиях повышенных температур и давлений, характерных для высокотемпературного охлаждения судовых дизелей, при различном физико-химическом составе газа над свободной поверхностью кавитирующей жидкости, что снижает точность оценки предельного срока эксплуатации элементов оборудования, машин и механизмов (двигателей внутреннего сгорания, насосов, теплообменных аппаратов и т.д.).

Результаты

Результатом разработки является устранение указанных недостатков путем создания устройства, способного обеспечить проведение исследования процессов кавитационного изнашивания в условиях температур и давлений, отличных от атмосферных, при различном составе газа над поверхностью рабочей жидкости, при температуре образцов отличной от температуры кавитирующей жидкости и выявления влияния этих факторов на эрозионную стойкость различных конструкционных материалов.

Сопоставление предлагаемого устройства для исследования кавитационной прочности материалов с аналогичными устройствами показало, что поставленная задача – обеспечение проведения исследования процессов изнашивания оборудования в широком диапазоне температур и давлений кавитирующей рабочей жидкости различного физико-химического состава, а также различного состава газов над ее свободной поверхностью, температуры исследуемых образцов и выявления их влияния на эрозионную стойкость конструкционных материалов, решается в результате модернизации конструкции установки. Конструкция и принцип действия разработанной установки представлены на рис. 2.

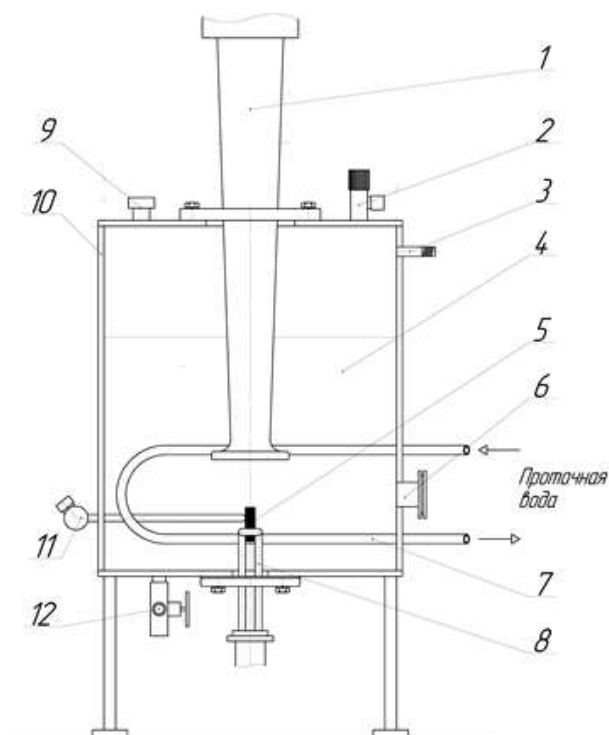


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – магнитоstrictionный вибратор; 2 – предохранительный клапан; 3 – невозвратный клапан; 4 – исследуемая жидкость в экспериментальной камере; 5 – образец испытуемого материала; 6 – смотровое окно; 7 – проточный охладитель (змеевик); 8 – нагреватель испытуемого образца; 9 – заливная горловина; 10 – экспериментальная емкость (камера); 11 – терморегулятор; 12 – сливной кран

Установка состоит из магнитоstrictionного вибратора 1, создающего эффект ультразвуковых колебаний в жидкости 4, герметичной емкости 10, способной выдержать повышенное давление или вакуум и оснащенная заливной горловиной 9 и сливным клапаном 12, служащими для наполнения емкости 10 и замены жидкости 4, предохранительным клапаном 2, обеспечивающим постоянство давления при

проведении испытаний и безопасность установки; невозвратного клапана 3, служащего для подключения компрессора с целью изменения давления в рабочей емкости 10, испытуемого образца 5, смотрового окна 6, служащего для наблюдения за процессами, протекающими в емкости 10, и замеров температур жидкости 4, и испытываемого образца 5 с помощью пирометра или тепловизора, змеевика 7, помещенного в емкость 10 и выполняющего функцию охладителя жидкости, обеспечивающего постоянство заданной температуры жидкости 4 за счет циркулирующей проточной воды, термоэлектрического нагревателя 8, служащего для нагревания испытуемых образцов и жидкости, терморегулятора 11, обеспечивающего автоматическое поддержание заданной температуры испытуемого образца 5.

Устройство для исследования кавитационной прочности материалов работает следующим образом.

Испытываемый образец 5, выполненный из чугуна, стали или другого материала, помещают в термоэлектрический нагреватель 8. Внутри герметичной емкости 10 через горловину 9 заливают исследуемую жидкость 4 (например, пресную или морскую воду, бензин или дизельное топливо, спирт или водотопливную эмульсию). Затем герметизируют емкость 10, заполняют объем над свободной поверхностью исследуемой жидкости 4 воздухом или иным газом и с помощью компрессора обеспечивают его заданное давление.

С помощью змеевика 7 и термоэлектрического нагревателя 8 обеспечивают нагрев и поддержание заданных температур образца 5 и исследуемой жидкости 4.

Затем включают ультразвуковой генератор, который обеспечивает колебания магнитострикционного вибратора 1, что создает образование кавитационного облака над поверхностью образца 5. Замыкание кавитационных пузырьков вызывает эрозионные разрушения образца 5 в зависимости от эрозионной прочности его материала, температуры образца 5, физико-химических свойств, давления и температуры жидкости 4 и физико-химических свойств и концентрации растворенного в ней газа.

Терморегулятор, входящий в состав установки, обеспечивает автоматическое поддержание заданных температур испытуемого образца 5 и жидкости 4, находящейся в емкости 10, в процессе проведения исследований.

Периодическое взвешивание образца 5 позволяет определить динамику разрушений и прогнозировать эрозионную стойкость деталей оборудования, которые изготовлены из этого же материала.

Обсуждение

Таким образом, задача получения достоверной информации об интенсивности кавитационно-эрозионных разрушений деталей систем охлаждения судовых дизелей в условиях высокотемпературного охлаждения решается за счет того, что в созданной экспериментальной установке, благодаря применению герметичной емкости, компрессора, повышающего давление в полости над жидкостью, нагревателя испытуемого образца и охладителя жидкости обеспечена возможность исследования кавитационных разрушений материалов при давлениях как выше, так и ниже атмосферного и температурах жидкости от температуры замерзания до температуры кипения, использования различных газов над поверхностью кавитирующей жидкости.

Достоинствами предложенного технического решения являются возможность проведения исследований кавитационного разрушения материалов:

- в широком диапазоне давлений и температур, в том числе отличных от атмосферных (комнатных);
- при температурах образцов, изготовленных из различных материалов и имеющих температуру отличающуюся от температуры кавитирующей жидкости;
- при различных составах и свойствах охлаждающих жидкостей, которые могут быть использованы в системах охлаждения судовых дизелей;
- при различном составе газов над поверхностью кавитирующей рабочей жидкости на интенсивность эрозионных разрушений.

Заключение

Проведение исследований на предлагаемой установке позволит определить влияние широкого перечня факторов на интенсивность кавитационных разрушений элементов энергетического оборудования, машин и механизмов.

Для проведения исследований разработан план многофакторного эксперимента, в котором в качестве факторов (регулируемых параметров) использованы температура жидкости, температура образца, статическое давление в камере, вязкость жидкости. При необходимости получения дополнительной информации, перечень регулируемых параметров может быть расширен.

Список литературы:

1. Рождественский В.В. Кавитация / В.В. Рождественский. – Л.: Судостроение, 1977. – 247 с.
2. Готман А.Ш. К 200-летию со дня рождения Вильяма Фруда // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2011. – Т. 4, № 1. – С. 88-96.

3. Knapp R.T. Recent investigations of the mechanics of cavitation and cavitation damage // IEEE ASME, 75 (8) (1955), pp. 1045-1054.
4. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. М.: Мир. – 1974. – 687 с.
5. Hammitt F.G. Observations on cavitation damage in a flowing system // Trans. ASME J. Basic Eng., 85 (1963), pp. 347-356
6. K. Endo, T. Okada, Y. Baba. Fundamental studies on cavitation erosion // Bull. JSME, 12 (52) (1969), pp. 729-737
7. Левковский Ю.Л. Структура кавитационных течений. Л.: Судостроение, 1978. – 224 с.
8. Иванов А.Н. Гидродинамика развитых кавитационных течений / А.Н. Иванов. – Л.: Судостроение, 1980. – 237 с.
9. Запорожец Е.П. Гидромеханическая кавитация / Е.П. Запорожец, Г.П. Зиберт, Е.Е. Запорожец. – М.: ИРЦ Газпром.– 2003. – 129 с.
10. Kato H. A consideration on scaling laws of cavitation erosion // Int. Shipbuild. Prog., 22 (253) (1975), pp. 305–327
11. Георгиевская Е.П. Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней / Е.П. Георгиевская. –Л.: Судостроение, 1978. –206 с.
12. Погодаев Л.И. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования / Л. И. Погодаев, П.А. Шевченко. – Л.: Судостроение, 1984. –264 с
13. Иванченко Н.Н. Кавитационные разрушения в дизелях / Н. Н Иванченко, А.А. Скуридин, М.Д. Никитин; ред. Н.Н. Иванченко. – Л.: Машиностроение, 1970. –152 с.
14. Горбаченко Е.О. Прогнозирование инкубационного периода кавитационного изнашивания лопастей гребных винтов с использованием метода измерения профиля поверхности / Е.О. Горбаченко, Ю.Н. Цветков / Вестник волжской государственной академии водного транспорта. – 2017. – №52. – С. 87–95.
15. Pereira F., Salvatore F., Felice F. Measurement and modelling of propeller cavitation in uniform inflow // J. Fluids Eng., 126 (2004), pp. 671-679.
16. Яковлев А.Ю., Коваль А.А. Новые исследования кавитации гребных винтов. // Судостроение. 2010. – № 2 (789). – С. 12–14.
17. Onur Usta, Emin Korkut. Prediction of cavitation development and cavitation erosion on hydrofoils and propellers by Detached Eddy Simulation // Ocean Engineering. – Volume 191 November 2019.– Article 106512
18. Feng Cheng, Weixi Ji, Chenhao Qian, Xu. Jie. Cavitation bubbles dynamics and cavitation erosion in water jet // Results Phys, 9 (2018). – pp. 1585–1593
19. Batuhan Aktas, Onur Usta, Mehmet Atlar. Systematic investigation of coating application methods and soft paint types to detect cavitation erosion on marine propellers // Applied Ocean Research Volume 94 January 2020 Article 101868
20. Маслов Н.А. Анализ неисправностей пластинчатых гидромашин путевой техники, вызванных чрезмерным давлением, аэрацией гидравлического масла и кавитацией. // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2016. – № 1 (36). – С. 5–15.
21. Степанов А.М. Щелевая кавитация в судовых осевых насосах / А.М. Степанов, А.Л. Федоров // Судостроение. – 2001. – № 3 (736). – С. 27–29.
22. Минеев А.В. Некоторые вопросы влияния кавитации при работе гидроприводов машиностроительной техники различного направления, изготовления и способов эксплуатации / А.В. Минеев, А.С. Каверзина, А.А. Тимко. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2015. – № 10. – С. 36–37.
23. Каверзина А.С. Проблемы кавитации в гидроприводе самоходных машин и способы ее снижения / А.С. Каверзина, А.В. Минеев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. – № 6. – С. 171–176.
24. Погодаев Л.И. Расчет долговечности цилиндрических втулок дизельных двигателей при вибрационной кавитации / Л.И. Погодаев, А.А. Кузьмин, Ю.К. Лопарев // В книге: Надежность судового оборудования. СПб., – 2015. – С. 44–56.
25. Валишин А.Г. Оценка ресурса цилиндрических втулок ДВС при вибрационной кавитации. // Двигателестроение. 2008. – № 1 (235). – С. 20–23.
26. Булдаков А.Г. Кавитация в насосах жидкостных ракетных двигателей / А.Г. Булдаков, Е.М. Краева // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2012. – Т. 1. № 8. – С. 47.
27. Maxwell Brunhart, Celia Soteriou, Christian Daveau, Manolis Gavaises, Mark Winterbourn. Cavitation erosion risk indicators for a thin gap within a diesel fuel pump // Wear. – Volumes 442–443, 15 February 2020. – Article 203024.
28. Marco Cristofaro, Wilfried Edelbauer, Phoevos Koukouvinis, Manolis Gavaises. A numerical study on the effect of cavitation erosion in a diesel injector // Applied Mathematical Modelling. – Volume 78, February 2020.– Pages 200–216.
29. Абачараев И.М. Аналитический подход к расчету эксплуатационной стойкости материалов в условиях воздействия кавитации // В сб.: Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах. Сб. тр. международной конференции. Российская академия наук Дагестанский научный центр Институт физики; Дагестанский гос. ун-т. – 2005. – С. 208–211.
30. Кукинова Г.В. Оценка интенсивности общего и местного гидроабразивного изнашивания с учетом кавитации // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2007. – № 4-1 (52). – С. 164–167.
31. Тузов Л.В. Вибрация судовых ДВС / Л.В. Тузов, О.К. Безюков, О.В. Афанасьева. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та.– 2012.– 348 с.
32. Аюгин П.Н. Кавитация и ее влияние на эффективность работы системы охлаждения / П.Н. Аюгин, Н.П. Аюгин // В сб. Актуальные проблемы инженерно-технического обеспечения АПК. Материалы Международной научно-практической конференции. Курск: Изд-во Курской гос. сельскохозяй. акад. им. проф. И.И. Иванова. – 2013. – С. 77–82.
33. W.H. Xian, D.G. Li, D.R. Chen. Investigation on ultrasonic cavitation erosion of TiMo and TiNb alloys in sulfuric acid solution // Ultrasonics Sonochemistry.– Volume 62, April 2020.– Article 104877
34. Haixia Liu, Jinhao Chen, Jie Sun, Can Kang. Influence of the concentration of NaHCO₃ solution on cavitation erosion of copper alloy // Results in Physics. – Volume 13, June 2019.– Article 102145
35. Q.N. Song, Y. Tong, N. Xu, S.Y. Sun, Y.X. Qiao. Synergistic effect between cavitation erosion and corrosion for various copper alloys in sulphide-containing 3.5% NaCl solutions // Wear.– Volumes 450–451 June 2020. – Article 203258

36. Enkang Hao, Xia Liu, Yulong An, Huidi Zhou, Fengyuan Yan. The coupling effect of immersion corrosion and cavitation erosion of NiCoCrAlYTa coatings in artificial seawater // Corrosion Science In press, corrected proof Available online 2 April 2020 Article 108635
37. Xiang Ding, Yan Huang, Chengqing Yuan, Zhangxiong Ding. Deposition and cavitation erosion behavior of multimodal WC-10Co4Cr coatings sprayed by HVOF // Surface and Coatings Technology Volume 39225 June 2020 Article 125757
38. Marija M. Vuksanović, Nataša Z. Tomić, Maja Gajić-Kvašček, Veljko R. Djokić, Radmila Jančić Heinemann. The influence of alumina crystal structures on the morphology and surface erosion of PMMA composite materials exposed to cavitation testing // Wear Volumes 436–43715 October 2019 Article 203033
39. Непомнящий В.А. Влияние физических свойств жидкости на возникновение и развитие кавитации в гидросистемах // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2010. № 1 (16). С. 33–38.
40. Il-Cho Park, Seong-Jong Kim. Effect of pH of the sulfuric acid bath on cavitation erosion behavior in natural seawater of electroless nickel plating coating // Applied Surface Science.– Volume 48331.– July 2019.– Pages 194–204.
41. C.T. Kwok, F.T. Cheng, H.C. Man. Synergistic effect of cavitation erosion and corrosion of various engineering alloys in 3.5% NaCl solution // Mater Sci Eng, A, 290 (2000), pp. 145–154
42. Безюков О.К. Охлаждающие жидкости транспортных ДВС / О.К. Безюков, В.А. Жуков.– СПб.: СПГУВК, 2009. – 263 с.
43. Безюков О.К. Комплексная оптимизация параметров охлаждения судовых энергетических установок / О.К. Безюков, В.А. Жуков // Журнал университета водных коммуникаций. – 2012. – №1. – С. 51–61.
44. Markku Ylönen, Jean-Pierre Franc, Juha Miettinen, Pentti Saarenrinne, Marc Fivel. Shedding frequency in cavitation erosion evolution tracking // International Journal of Multiphase Flow.-Volume 118.– September 2019.– Pages 141–149.
45. Tengfei Cai, Yan Pan, Fei Ma Effects of nozzle lip geometry on the cavitation erosion characteristics of self-excited cavitating waterjet // Experimental Thermal and Fluid Science Volume 1171.– September 2020.– Article 110137
46. Сосиков В.А. Особенности кавитации жидкостей вблизи температуры замерзания / В.А. Сосиков, А.В. Уткин // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 3. С. 10–16.
47. Markus Hoshbach, Romuald Skoda, Tobias Sander, Uwe Leuteritz, Michael Pfitzner. On the temperature influence on cavitation erosion in micro-channels // Experimental Thermal and Fluid Science In press, journal pre-proof Available online.– 11 April 2020.– Article 110140
48. Исследование влияния температуры жидкости на активность кавитации / В.В. Шаплыко, А.В. Красовский, А.В. Котухов, Н.В. Дежунов // В сб.: Современные тенденции развития науки и производства. Западно-Сибирский научный центр, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Международный научно-образовательный центр КузГТУ-Arena Multimedia. – 2014. – С. 145.
49. Li Zhen, Han Jiesheng, Lu Jinjun, Zhou Jiansong, Chen Jianmin. Vibratory cavitation erosion behavior of AISI304 stainless steel in water at elevated temperatures // Wear, 321 (2014), pp. 33–37
50. Безюков О.К. Выбор параметров охлаждения судовых дизелей / О.К. Безюков, В.А. Жуков, А.А. Пуляев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2018. – №2(48). – С. 379–389.
51. Tukker J., Kuiper G.. High-speed Video Observations and Erosive Cavitation // 9th Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Germany, Lübeck, August 2004.
52. Jaekwon Jung, Seung-Jae Lee, Jae-Moon Han. Study on Correlation between Cavitation and Pressure Fluctuation Signal Using High-Speed Camera System // Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation CAV 2009, August 17-22 2009, Ann Arbor, Michigan, USA1CAV 2009 – Paper № 27.
53. Гусак А.Г. Исследование кавитации в свободновихревом насосе методом визуального наблюдения / А.Г. Гусак, А.И. Котенко, В.Ф. Герман // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. Т. 6. № 7 (48). С. 7-9.
54. Иваницкий Г.К. Численное моделирование динамики пузырькового кластера в процессах гидродинамической кавитации // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2011. № 2 (7). С. 52-58.
55. Гайнутдинова Д.Ф. Вычислительное моделирование области возникновения кавитации при вибрациях / Д.Ф. Гайнутдинова, В.Я. Модорский, А.В. Козлова // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 6. С. 127-129.
56. Бубнов М. Изучение процессов кавитации и изнашивания рабочих колес гидромашин посредством решений ANSYS / М. Бубнов, Л. Тищенко, А. Ковалев // САПР и графика. – 2014. – № 9 (215). – С. 56-58.
57. Sedlar M., Soukal J., Kratky T., Vugoubal M. Численное прогнозирование кавитации в энергетических насосах // Теплоэнергетика. – 2015. – № 6. – С. 23.
58. Schreiner F., Paepenmöller S., Skoda R. 3D flow simulations and pressure measurements for the evaluation of cavitation dynamics and flow aggressiveness in ultrasonic erosion devices with varying gap widths // Ultrasonics Sonochemistry In press, journal pre-proof Available online 31 March.– 2020.– Article 105091.
59. Цветков Ю.Н. Прогнозирование кавитационной износостойкости хромовых электролитических покрытий по профилю изношенной поверхности / Ю.Н. Цветков, Е.О. Горбаченко, В.А. Голицын // Вестник машиностроения. – 2019. – № 4. – С. 79–86.
60. Цветков Ю.Н. Испытание сталей на кавитационное изнашивание с применением метода измерения профиля поверхности / Ю.Н. Цветков, Е.О. Горбаченко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83. – № 7. – С. 54–58.
61. Цветков Ю.Н. Применение метода измерения шероховатости при испытании материалов втулок цилиндров судовых дизелей на кавитационное изнашивание / Ю.Н. Цветков, Е.О. Горбаченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2016. – Вып. 4 (38). – С. 131–137.
62. Третьяков Д.В. Моделирование долговечности цилиндрических втулок двигателя внутреннего сгорания при вибрационной кавитации / Д.В. Третьяков, А.Г. Валишин, О.О. Матвеевский // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – № 2. – С. 50–60.
63. Берестовицкий Э.Г. Вибрационный метод определения критериев кавитации / Э.Г. Берестовицкий, И.А. Сарафанов // Судостроение. – 2008. – № 4 (779). – С. 32–35.

64. Romero R., Teran L.A., Coronado J.J., Ladino J.A., Rodríguez S.A. Synergy between cavitation and solid particle erosion in an ultrasonic tribometer // *Wear*.– Volumes 428–429, 15 June 2019.– Pages 395-403
65. Fengjun Chen, Jianhua Du, Shanzi Zhou. Cavitation erosion behaviour of incoloy alloy 865 in NaCl solution using ultrasonic vibration // *Journal of Alloys and Compounds*.– Volume 83, 15 August 2020.– Article 154783
66. Churchill R.A. Low-heat rejection engine concept review / R. A. Churchill, J. E. Smith, N. N. Clarc, R. A. Turton // *SAE Technical Paper Series*. – 1989.– № 890153. – p. 25-36
67. Franz W Koch. Cooling System Development and Optimization / Franz W Koch, Frank G. Haubner // *SAE Technical Paper Series*.– 2000.– 2000-01-283.– 15 pp.
68. Жуков В.А. Исследование теплогидравлической эффективности высокотемпературных систем охлаждения судовых дизелей / В.А. Жуков, В.Л. Ерофеев, А.А. Пуляев // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2020. – №1(59). – С. 107–114.
69. Разработка стенда для экспериментальных исследований кавитационно акустических явлений / С.С. Хмельёв, В.Н. Хмельёв, Р.Н. Голых, Ю.М. Кузовников // *Научно-технический вестник Поволжья*, 2015, №3, с. 231–234.
70. ASTM G32-16, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org).

THE INSTALLATION FOR THE RESEARCH OF CAVITATION PROCESSES IN COOLING SYSTEMS OF MARINE DIESEL ENGINES

Oleg K. Bezjukov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

Vladimir A. Zhukov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

Andrey A. Puljaev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

Abstract. The article describes the design of the experimental installation that provides new data on cavitation-erosion failures in high-temperature cooling systems. Based on the analysis of domestic and foreign sources of scientific and technical information concerning the research of cavitation processes, technical objects where cavitation processes take place, factors that affect the intensity of cavitation-corrosion destruction, and methods that are used for cavitation research are identified. A modernized design of the laboratory unit is proposed. The main element of it is a high-frequency magnetostrictive vibrator. Due to the sealed experimental cavity, the unit allows the determining of the intensity of cavitation-erosion destruction at high liquid temperatures and pressure above atmospheric, which is typical for high-temperature cooling of marine diesels. The usage of the installation will allow getting the correct data about the resource of elements of high-temperature cooling systems for marine diesels.

Keywords: cavitation, cavitation-erosive destruction, methods of cavitation research, marine diesels, high-temperature cooling, laboratory installation

References:

1. Rozhdestvenskij V.V. Cavitatsija. L.: Sudostroenie.– 1977. – 247 s.
2. Gotman A.Sh. K 200-letiju so dnja rozhdenija Viliama Fruda // Fundamental'naja i prikladnaja gidrofizika. – 2011.– T. 4, № 1. – S. 88-96.
3. R.T. Knapp. Recent investigations of the mechanics of cavitation and cavitation damage // IEEE ASME, 75 (8) (1955), pp. 1045-1054.
4. Knapp R., Daili Dzh., Hammit F. Cavitatsija. M.: Mir. – 1974. – 687 s.
5. F.G. Hammit. Observations on cavitation damage in a flowing system // Trans. ASME J. Basic Eng., 85 (1963), pp. 347-356
6. K. Endo, T. Okada, Y. Baba. Fundamental studies on cavitation erosion // Bull. JSME, 12 (52) (1969), pp. 729-737
7. Levkovskij Yu. L. Struktura cavitatsionnykh techenij. L.: Sudostroenie. – 1978. – 224 s.
8. Ivanov A.N. Gidrodinamika razvitykh cavitatsionnykh techenij. L.: Sudostroenie.– 1980.– 237 s.
9. Zaporozhets E.P., Zibert G.P., Zaporozhets E.E. Gidromekhanicheskaja cavitatsija. M.: IRC Gazprom.– 2003. – 129 s.
10. H. Kato. A consideration on scaling laws of cavitation erosion // Int. Shipbuild. Prog., 22 (253) (1975), pp. 305-327
11. Georgievskaja E.P. Cavitatsionnaja erozija grebnykh vintov i metody bor'by s nej. L.: Sudostroenie.– 1978. – 206 s.
12. Pogodaev L.I. Shevchenko P.A. Gidroobrazivnyj i cavitatsionnyj iznos sudovogo oborudovanija. L.: Sudostroenie. – 1984. – 264 s.
13. Ivanchenko N.N., Skuridin A.A., Nikitin M.D. Cavitatsionnye razrushenija v dizeljah. – L.: Mashinostroenie. – 1970. – 152 s.
14. Gorbachenko E.O., Tsvetkov Yu.N. Prognozirovanie inrubatsionnogo perioda cavitatsionnogo iznashivanja lopastej grebnykh vintov s ispol'zovaniem metoda izmerenija profila poverhnosti. // Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. – 2017. – № 52. – S. 87–95.
15. F. Pereira, F. Salvatore, F. Felice. Measurement and modelling of propeller cavitation in uniform inflow // J. Fluids Eng., 126 (2004), pp. 671–679.
16. Yakovlev A.Yu., Koval' A.A. Novyje issledovanija cavitatsii grebnykh vintov // Sudostroenie. – 2010. – № 2 (789). – S. 12-14.
17. Onur Usta, Emin Korkut. Prediction of cavitation development and cavitation erosion on hydrofoils and propellers by Detached Eddy Simulation // Ocean Engineering. – Volume 191 November 2019.– Article 106512
18. Feng Cheng, Weixi Ji, Chenhao Qian, Xu. Jie. Cavitation bubbles dynamics and cavitation erosion in water jet // Results Phys, 9 (2018). – pp. 1585–1593
19. Batuhan Aktas, Onur Usta, Mehmet Atlar. Systematic investigation of coating application methods and soft paint types to detect cavitation erosion on marine propellers // Applied Ocean Research Volume 94 January 2020.– Article 101868
20. Maslov N.A. Analiz neispravnostej plastinchatykh gidromashin putevoj tehniki, vyzvanykh chrezmernym davleniem, aeratziej gidravlicheskogo masla i cavitatsiej // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobsh'enija. 2016. – № 1 (36). – S. 5-15.
21. Stepanov A.M., Fedorov A.L. Sh'elevaja cavitatsija v sudovyh osevyh nasosah // Sudostroenie.– 2001. – № 3 (736). – S. 27-29.
22. Mineev A.V., Kaverzina A.S., Timko A.A. Nekotorye voprosy vlijanija kavitatsii pri rabote gidroprivodov mashinostrotel'noj tehniki razlichnogo napravlenija, izgotovlenija i sposobov ekspluatatsii // Stroitel'stvo nefljanij i gazovyh skvazhin na sushi i na more. 2015. – № 10. – S. 36-37.
23. Kaverzina A.S. Mineev A.V. Problemy kavitatsii v gidroprivode samohodnykh mashin i sposoby ee snizhenija // Gornyj informatsionno-analiticheskij bulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal). – 2015. – № 6. – S. 171-176.
24. Pogodaev L.I., Kuz'min A.A., Loprev Yu. K. Raschet dolgovechnosti tselindrovnykh vtulok dizel'nykh dvigatelej pri vibratsionnoj cavitatsii. V knige: Nadezhnost' sudovogo oborudovanija. SPb. – 2015. – S. 44-56.
25. Valishin A.G. Otsenka resursa tselindrovnykh vtulok DVS pri vibratsionnoj cavitatsii // Dvigatellestroenie.– 2008. – № 1 (235). – S. 20-23.
26. Buldakov A.G., Kraeva E.M. Cavitatsija v nasosah zhidkostnykh raketnykh dvigatelej // Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki.– 2012. – T. 1. № 8. – S. 47.
27. Maxwell Brunhart, Celia Soteriou, Christian Daveau, Manolis Gavaises, Mark Winterbourn. Cavitation erosion risk indicators for a thin gap within a diesel fuel pump // Wear. – Volumes 442–443, 15 February 2020. – Article 203024.
28. Marco Cristofaro, Wilfried Edelbauer, Phoevos Koukouvini, Manolis Gavaises. A numerical study on the effect of cavitation erosion in a diesel injector // Applied Mathematical Modelling. – Volume 78, February 2020.– Pages 200-216.
29. Abacharaev I.M. Analiticheskij podhod k raschetu ekspluatatsionnoj stojkosti materialov v uslovijah vozdejstvija kavitatsii // V sb. Fazovye perehody, kriticheskie i nelinejnye javlenija v kondensirovannykh sredah. Sb. Trudov mezhdunarodnoj konferentsii. Rossijskaja akademija nauk Dagestanskij nauchnyj tsentr Institut Fiziki Dagestanskij gos. universite. – 2005. – S. 208-211.
30. Kukinova G.V. Otsenka intensivnosti obsh'ego i mestnogo gidroabrazivnogo iznashivanja s uchetom kavitatsii // Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. – 2007. – № 4-1 (52). – C. 164-167.
31. Tuzov L.V., Bezjukov O.K., Afanasjeva O.V. Vibratsija sudovyh DVS. SPb.: Izd-vo politehn. un-ta.– 2012.– 348 c.
32. Ayugin P.N., Ayugin N.P. Cavitatsija i ee vlijanije na effektivnost' raboty sistemy ohlazhdenija // V sb. Aktual'nye problemy inzhenerno-tehnicheskogo obespechenija APK. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Kursk. Izd-vo Kurskoj gos. sel'skohoz. Akad. im. Prof. I.I. Ivanova. – 2013. – S. 77-82.
33. W. H. Xian, D. G. Li, D. R. Chen. Investigation on ultrasonic cavitation erosion of TiMo and TiNb alloys in sulfuric acid solution // Ultrasonics Sonochemistry.– Volume 62, April 2020.– Article 104877
34. Haixia Liu, Jinhao Chen, Jie Sun, Can Kang. Influence of the concentration of NaHCO₃ solution on cavitation erosion of copper alloy // Results in Physics. – Volume 13, June 2019.– Article 102145
35. Q. N. Song, Y. Tong, N. Xu, S. Y. Sun, Y. X. Qiao. Synergistic effect between cavitation erosion and corrosion for various copper alloys in sulphide-containing 3.5% NaCl solutions // Wear.– Volumes 450–451 June 2020. – Article 203258

36. Enkang Hao, Xia Liu, Yulong An, Huidi Zhou, Fengyuan Yan. The coupling effect of immersion corrosion and cavitation erosion of NiCoCrAlYTa coatings in artificial seawater // *Corrosion Science* In press, corrected proof Available online 2 April 2020 Article 108635
37. Xiang Ding, Yan Huang, Chengqing Yuan, Zhangxiong Ding. Deposition and cavitation erosion behavior of multimodal WC-10Co4Cr coatings sprayed by HVOF // *Surface and Coatings Technology* Volume 39225 June 2020 Article 125757
38. Marija M. Vuksanović, Nataša Z. Tomić, Maja Gajić-Kvašček, Veljko R. Djokić, Radmila Jančić Heinemann. The influence of alumina crystal structures on the morphology and surface erosion of PMMA composite materials exposed to cavitation testing // *Wear* Volumes 436–43715 October 2019 Article 203033
39. Nepomnjash'ij V.A. Vlijanie fizicheskikh svojstv zhidkosti na voznikovenie i razvitie cavitatsii v gidrosystemah // *Vestnik Rybinskoj gosudarstvennoj aviatcionnoj tehnologicheskoy arademii im. P.A. Solovjeva*. – 2010. – № 1 (16). – S. 33-38.
40. Il-Cho Park, Seong-Jong Kim. Effect of pH of the sulfuric acid bath on cavitation erosion behavior in natural seawater of electroless nickel plating coating // *Applied Surface Science*.– Volume 48331.– July 2019.– Pages 194-204.
41. C.T. Kwok, F.T. Cheng, H.C. Man. Synergistic effect of cavitation erosion and corrosion of various engineering alloys in 3.5% NaCl solution // *Mater Sci Eng, A*, 290 (2000), pp. 145-154
42. Bezjukov O.K., Zhukov V.A. Ohlazhdajush'ie zhidkosti transpotnyh DVS.– SPb.: SPGUVK.– 2009. – 263 s.
43. Bezjukov O.K., Zhukov V.A. Kompleksnaja optimizatsija parametrov ohlazhdenija sudovyh energeticheskikh ustanovok // *Zhurnal universiteta vodnyh komunikatsij*. – 2012. – №1.– C. 51–61.
44. Markku Ylönen, Jean-Pierre Franc, Juha Miettinen, Pentti Saarenrinne, Marc Fivel. Shedding frequency in cavitation erosion evolution tracking // *International Journal of Multiphase Flow*.–Volume 118.– September 2019.– Pages 141-149.
45. Tengfei Cai, Yan Pan, Fei Ma Effects of nozzle lip geometry on the cavitation erosion characteristics of self-excited cavitating waterjet // *Experimental Thermal and Fluid Science* Volume 1171.– September 2020.– Article 110137
46. Sosikov V.A., Utkin A.V. Osobennosti kavitatsii zhidkosti vblizi temperatury zamerzanija // *Deformatsija i razrushenie materialov*. – 2008. № 3. – S. 10-16.
47. Markus Hosbach, Romuald Skoda, Tobias Sander, Uwe Leuteritz, Michael Pfitzner. On the temperature influence on cavitation erosion in micro-channels // *Experimental Thermal and Fluid Science* In press, journal pre-proof Available online.– 11 April 2020.– Article 110140
48. Shaplyko V.V., Krasovskij A.V., Kotuhov A.V., Dezhkunov N.V. Issledovanie vlijaniya temperatury zhidkosti na aktivnost' cavitatsii // *V sb. Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i proizvodstva. Zapadno-Sibirskij nauchnyj centr, Kuzbasskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet im. T.F. Gorbacheva, Mezhdunarodnyj nauchno-obrazovatel'nyj centr KuzGTU-Arena Multimedia*. – 2014. – S. 145.
49. Li Zhen, Han Jiesheng, Lu Jinjun, Zhou Jiansong, Chen Jianmin. Vibratory cavitation erosion behavior of AISI304 stainless steel in water at elevated temperatures // *Wear*, 321 (2014), pp. 33-37
50. Bezjukov O.K., Zhukov V.A., Puljaev A.A. Vybore parametrov ohlazhdenija sudovyh dizelej // *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova*.– 2018. – №2 (48). –S. 379-389.
51. J. Tukker, G. Kuiper. High-speed Video Observations and Erosive Cavitation // 9th Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Germany, Lübeck, August 2004.
52. Jaekwon Jung, Seung-Jae Lee, Jae-Moon Han. Study on Correlation between Cavitation and Pressure Fluctuation Signal Using High-Speed Camera System // *Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation CAV 2009*, August 17-22 2009, Ann Arbor, Michigan, USA ICAV 2009 – Paper № 27.
53. Gusak A.G., Kotenko A.I., German V.F. Issledovanie cavitatsii v svobodnovihrevom nasose metodom vizual'nogo nablyudeniya // *Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij*.– 2010. – T. 6. № 7 (48). – S. 7-9.
54. Ivanitskij G.K. Chislennoe modelirovanie dinamiki puzyr'kovogo klastera v protsessah gidrodinamicheskoy cavitatsii // *Sovremennaja nauka: issledovanija, idei, rezul'taty, tehnologii*.– 2011. – № 2 (7). – S. 52-58.
55. Gajnutdinova D.F., Modorskij V.Ja., Kozlova A.V. Vychislitel'noe modelirovanie oblasti voznikovenija cavitatsii pri vibratsijah // *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja*.–2014. – № 6. – S. 127-129.
56. Bubnov M., Tish'enko L., Kovalev A. Izuchenie protsessov cavitatsii i iznashivaniya rabochih koles gidromashin posredstvom reshenij ANSYS // *SAPR i grafika*. – 2014. – № 9 (215). – S. 56-58.
57. Sedlar M., Soukal J., Kratky T., Vyroubal M. Численное прогнозирование кавитации в энергетических насосах // *Теплоэнергетика*. – 2015. – № 6. – С. 23.
58. F. Schreiner, S. Paepenmöller, R. Skoda. 3D flow simulations and pressure measurements for the evaluation of cavitation dynamics and flow aggressiveness in ultrasonic erosion devices with varying gap widths // *Ultrasonics Sonochemistry* In press, journal pre-proof Available online 31 March.– 2020.– Article 105091.
59. Tsvetkov Yu. N. Gorbachenko E.O., Golitsin V.A. Prognozirovanie cavitatsionnoj iznosostojkosti hromovyh elektroliticheskikh pokrytij po profilu iznoshennoj poverhnosti // *Vestnik mashinostroeniya*. – 2019. – № 4. – S. 79–86.
60. Tsvetkov Yu. N. Gorbachenko E.O. Ispytanie stalej na cavitatsionnoe iznashivanie s primeneniem metoda izmereniya profilya poverhnosti // *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov*. – 2017. – T. 83. – № 7. – С. 54–58.
61. Tsvetkov Yu. N. Gorbachenko E.O. Primenenie metoda izmereniya sherohovatosti pri ispytanii materialov vtulok tsilindrov sudovyh dizelej na cavitatsionnoe iznashivanie // *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova*. – 2016. – Vyp. 4 (38). – S. 131–137.
62. Tret'jakov D.V., Valishin A.G., Matveevskij O.O. Modelirovanie dolgovechnosti tsilindrovyyh vtulok dvigatelej vnutrennego sgoraniya pri vibratsionnoj cavitatsii // *Problemy mashinostroeniya i nadezhnost' mashin*. – 2008. – № 2. – С. 50-60.
63. Berestovitskij E.G., Sarafanov I.A. Vibratsionnyj metod opredelenija kriteriev cavitatsii // *Sudostroenie*. – 2008. – № 4 (779). – S. 32-35
64. R. Romero, L. A. Teran, J. J. Coronado, J. A. Ladino, S. A. Rodríguez. Synergy between cavitation and solid particle erosion in an ultrasonic tribometer // *Wear*.– Volumes 428–429, 15 June 2019.– Pages 395-403
65. Fengjun Chen, Jianhua Du, Shanzi Zhou. Cavitation erosion behaviour of incoloy alloy 865 in NaCl solution using ultrasonic vibration // *Journal of Alloys and Compounds*.– Volume 83, 15 August 2020.– Article 154783
66. Churchill R.A. Low-heat rejection engine concept review / R. A. Churchill, J. E. Smith, N. N. Clarc, R. A. Turton // *SAE Technical Paper Series*. – 1989.– № 890153. – p. 25-36

67. Franz W Koch. Cooling System Development and Optimization / Franz W Koch, Frank G. Haubner // SAE Technical Paper Series.– 2000.– 2000-01-283.– 15 pp.
68. Zhukov V.A., Erofeev V.L., Puljaev A.A. Issledovanie teplogidravlicheskoj effektivnosti vysokotemperaturnyh system ohlazhdenija sudovyh diselej // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova. – 2020. – №1(59). – S. 107-114.
69. Khmelev S.S., Khmelev V.N., Golyh R.N., Kuzovnikov Yu. M. Razrabotka stenda dlja eksperimental'nyh issledovanij cavitatsionno-akusticheskij javlenij // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja. – 2015, №3. – S. 231-234.
70. ASTM G32-16, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Безюков Олег Константинович, д.т.н., профессор, профессор кафедры теории и конструкции судовых ДВС (ФГБОУ ВО ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова) 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: okb-nauka@yandex.ru

Oleg K. Bezjukov, doctor of technical sciences, Professor of the Department of theory and design of marine internal combustion engines, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., St. Petersburg, 198035,

Жуков Владимир Анатольевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой теории и конструкции судовых ДВС (ФГБОУ ВО ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова) 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: va_zhukov@rambler.ru

Vladimir A. Zyukov, doctor of technical sciences, Head of the Department of theory and design of marine internal combustion engines, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., St. Petersburg, 198035,

Пуляев Андрей Аратович, аспирант кафедры теории и конструкции судовых ДВС (ФГБОУ ВО ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова) 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: kaf_sdvs@gumrf.ru

Andrej A. Puljaev, postgraduate of the Department of theory and design of marine internal combustion engines, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya st., St. Petersburg, 198035