СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СУДНА

SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ECOLOGICAL SAFETY OF THE SHIP

УДК 629.5 (004.94)
DOI: 10.37890/jwt.vi88.747

Математическое моделирование распространения ультразвуковых волн в приемной трубке гидродинамического лага нового типа

В.В Бочарова
А.А. Антонов
О.О. Дробышева
В.Ю. Стадников
Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия

Аннотация: Актуальность исследования обусловлена негативным влиянием биообрастания на точность работы судовых навигационных приборов, в частности гидродинамических лагов нового типа, что приводит к погрешностям в определении скорости и пройденного расстояния. Целью работы является математическое и имитационное моделирование процесса распространения ультразвуковых волн в приемной трубке гидродинамического лага для обоснования параметров системы защиты от обрастания, основанной на явлении кавитации. В качестве инструмента исследования использован программный комплекс COMSOL Multiphysics, позволяющий решать связанные мультифизические задачи. Результаты моделирования визуализируют распределение ультразвукового поля по поверхности и в объеме трубки, подтверждая возможность генерации акустической кавитации для разрушения органического слоя. Полученные данные позволяют перейти к созданию малогабаритной системы защиты, размещенной в клинкете, что повышает надежность навигационного оборудования и снижает эксплуатационные затраты.

Ключевые слова: математическое моделирование, гидродинамический лаг, ультразвук, кавитация, биообрастание, COMSOL Multiphysics

Mathematical modeling of ultrasonic wave propagation in the receiving tube of a new type of hydrodynamic log

Victoria V. Bocharova
Alexander A. Antonov
Olga O. Drobysheva
Victor Y. Stadnikov
Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russia

Abstract: The relevance of the research is due to the negative impact of biofouling on the accuracy of shipboard navigation instruments, in particular hydrodynamic logs of a new type, which leads to errors in determining speed and distance traveled. The aim of the work is mathematical and simulation modeling of the propagation process of ultrasonic waves in the receiving tube of a hydrodynamic log to substantiate the parameters of an anti-fouling protection system based on the phenomenon of cavitation. The COMSOL Multiphysics

software package, which allows solving coupled multiphysics problems, was used as a research tool. The simulation results visualize the distribution of the ultrasonic field over the surface and in the volume of the tube, confirming the possibility of generating acoustic cavitation to destroy the organic layer. The obtained data enable the creation of a compact protection system placed in the clinket, which increases the reliability of navigation equipment and reduces operating costs.

Keywords: mathematical modeling, hydrodynamic log, ultrasound, cavitation, biofouling, COMSOL Multiphysics

Введение

Обрастание подводной части корпуса судна и его выступающих элементов морскими организмами является серьезной эксплуатационной проблемой (рис.1).



Рис. 1. Обрастание корпуса судна морскими организмами

Для судовых измерителей скорости – лагов – этот фактор критичен, так как слой обрастания на приемных устройствах (трубках, датчиках давления) искажает гидродинамический поток, что приводит к нестабильности измерений и снижению точности вычисления скорости [1].

Традиционные методы борьбы с обрастанием включают механическую очистку, химические покрытия на основе биоцидов, электрические, термические и ультразвуковые способы [2–4]. Механическая очистка трудоёмка и может повреждать защитные покрытия; периодичность её проведения на активно обрастающих акваториях составляет 3–6 месяцев. Химические покрытия, например, с медью или цинком, эффективны в течение 2–3 лет, но токсичны для морской среды, накапливаются в донных отложениях и постепенно вытесняются природоохранным законодательством [5]. В последние десятилетия активно развиваются акустические методы, основанные на излучении ультразвука (рис.2). В таблице 1 приведено сравнение основных методов борьбы с обрастанием по эксплуатационным показателям.

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов защиты от обрастания

Параметр	Механическая очистка	Химические покрытия	Ультразвуковой метод
Периодичность применения	3–6 месяцев	2–3 года (покрытие)	Постоянно (оборудование)
Экологическая безопасность	Высокая	Низкая (токсично)	Высокая
Влияние на точность лага	Возможны повреждения	Не влияет	Не влияет
Трудоёмкость обслуживания	Высокая (водолазы)	Низкая (при нанесении)	Низкая (контроль)



Рис. 2. Корпус судна после очистки акустическим методом

Ультразвуковые волны частотой выше 20 кГц способны либо создавать кавитацию, разрушающую клетки организмов, либо вызывать микровибрации поверхности, препятствующие закреплению личинок и спор. Важным преимуществом является то, что частота 30 кГц находится выше диапазона слуха большинства рыб (до 2–3 кГц) и морских млекопитающих (до 20–22 кГц) [6,7], что минимизирует прямое акустическое воздействие на них. Однако, как показывают исследования [7], некоторые беспозвоночные (асцидии) могут реагировать на ультразвук, поэтому необходима осторожность при массовом применении в портах и маринах.

Ультразвуковой метод, основанный на эффектах кавитации и субкавитации, лишен этих недостатков и позволяет создавать автоматические системы защиты, работающие в процессе эксплуатации [8-10].

Цель данной работы – с помощью методов математического моделирования в среде COMSOL Multiphysics исследовать распределение ультразвукового поля в приемной трубке гидродинамического лага для определения возможности использования акустической кавитации для предотвращения биообрастания.

Математическая постановка задачи

Анализ физических и химических методов защиты показал, что ультразвуковая технология является наиболее предпочтительной для гидродинамических лагов нового типа [11]. В таких лагах предполагается использование миниатюрных датчиков давления, встраиваемых непосредственно в приемную трубку, что исключает протяженные трубопроводы и повышает точность [12]. Это позволяет разместить ультразвуковой излучатель компактно, в непосредственной близости от чувствительных элементов. Ультразвук высокой интенсивности вызывает в жидкости акустическую кавитацию – образование, рост и схлопывание парогазовых пузырьков. При схлопывании пузырька возникает локальный гидравлический удар и микропотоки, обладающие достаточной энергией для разрушения первичной биопленки и предотвращения прикрепления личинок обрастателей [13].

С точки зрения математического моделирования, процесс распространения ультразвуковых волн в конструкции лага представляет собой связанную задачу динамики деформируемого твёрдого тела и акустики жидкости. Подобные задачи относятся к классу задач математической физики и требуют применения современных численных методов для своего решения.

Объектом исследования является трубка современного гидродинамического лага со следующими геометрическими параметрами (рис.3):

– длина трубки: L = 1,5 м;
– наружный диаметр: D = 50 мм;
– толщина стенки: h = 3 мм.

Материал трубки – медно-никелевый сплав с характеристиками:

– плотность: ρ= 8900 кг/м³;
– модуль Юнга: E = 130 ГПа;
– коэффициент Пуассона: η= 0.33.

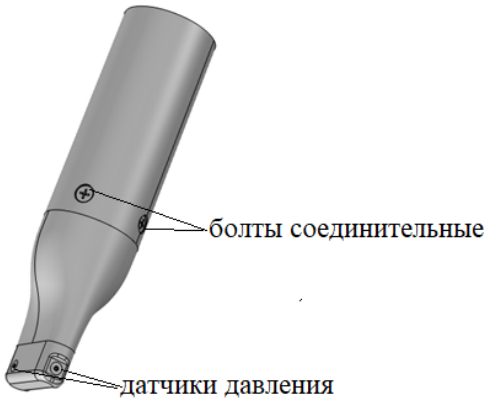


Рис. 3. Модель гидродинамического лага с расположенными датчиками давления

Математическая модель распространения упругих волн в материале лага базируется на уравнениях линейной теории упругости. В декартовой системе координат движение сплошной среды описывается уравнением [14]:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma + \mathrm{F}_V, \tag{1}$$

где ρ – плотность материала (кг/м³); $\boldsymbol{u} = (\boldsymbol{u}_x, \boldsymbol{u}_y, \boldsymbol{u}_z,)$ – вектор перемещений, м; $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений (Па); $\mathbf{F}_V$ – вектор объёмных сил (Н/м³).

Для изотропного линейно-упругого материала связь между тензором напряжений и тензором деформаций определяется обобщённым законом Гука:

$$\sigma = \mathrm{C} : \varepsilon, \tag{2}$$

где **C** – тензор упругих постоянных, $\boldsymbol{\varepsilon}$ – тензор малых деформаций.

Тензор деформаций связан с вектором перемещений кинематическим соотношением:

$$\varepsilon - \frac{1}{2}[\nabla u + (\nabla u)^T] = 0. \tag{3}$$

Возбуждение ультразвуковых колебаний моделируется заданием гарм онического воздействия на участке клинкета:

$$u(t) = u_0 \sin(2\pi f t) \cdot e^{-\left(\frac{2(t-2T_0)}{T_0}\right)^2}, \tag{4}$$

где $\boldsymbol{u}_0$ – амплитуда перемещений, определяемая мощностью излучателя. Для типичных пьезоэлектрических преобразователей мощностью 50–100 Вт амплитуда перемещений составляет порядка 1–10 мкм; f = 30 кГц – частота ультразвука; T_0 – период колебания. Выбор частоты обоснован результатами экспериментальных исследований, показавших эффективность диапазона 20–50 кГц для подавления обрастания [15,16].

На внешней поверхности трубки, контактирующей с забортной водой, происходит излучение акустической энергии в окружающую среду. Давление в жидкости p удовлетворяет волновому уравнению:

$$\frac{1}{\mathrm{c}^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0, \tag{5}$$

где c = 1500 м/с – скорость звука в воде.

На границе раздела «трубка-жидкость» выполняются условия непрерывности нормальных компонент скорости и напряжений:

$$\mathrm{n} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = \mathrm{n} \cdot v_f, \quad \sigma \cdot \mathrm{n} = -p\mathrm{n}, \tag{6}$$

где **n** – вектор внешней нормали; $\boldsymbol{v}_f$ – скорость частиц жидкости.

На внутренней поверхности трубки задаётся условие свободной поверхности, т.к. приемная трубка гидродинамического лага внутри полая и заполнена воздухом, влиянием воздушной среды на динамику стенки пренебрегается:

$$\sigma \cdot \mathrm{n} = 0 \tag{7}$$

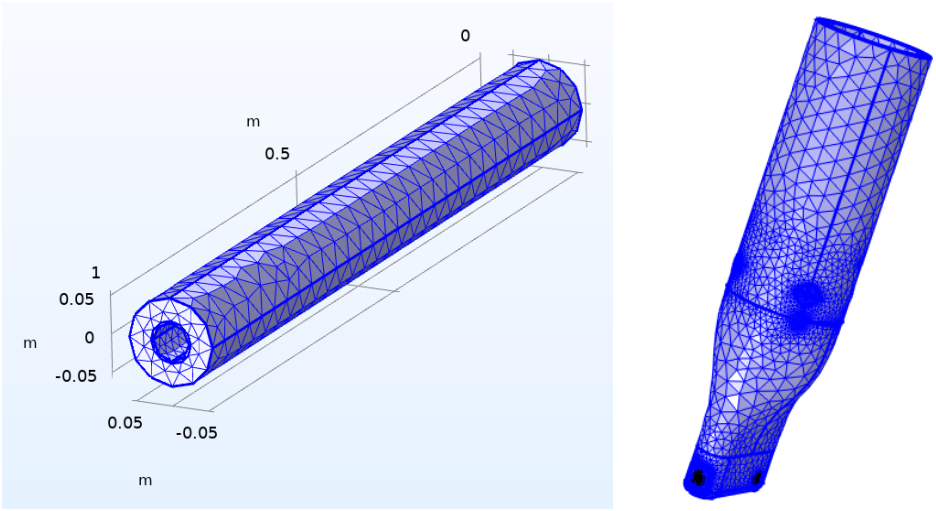
Уравнения (1)-(4) создают математическую модель распространения ультразвука по поверхности лага, выражения (5)-(7) являются граничными условиями.

Для численного решения сформулированной краевой задачи используется программный продукт COMSOL Multiphysics®, основанный на методе конечных элементов (МКЭ) [13]. Основная идея МКЭ заключается в дискретизации непрерывной области на конечные элементы и аппроксимации искомого решения на каждом элементе.

Дискретизация выполнена с использованием 10-узловых тетраэдральных элементов второго порядка (рис.4). Для обеспечения сходимости решения проведено

три последовательных измельчения сетки с коэффициентом 1,5. Количество элементов в финальной сетке – 124560, количество степеней свободы – 578932.

Цель расчета – определить характер распространения ультразвукового импульса от источника, условно расположенного у основания клинкета.



а) б)

а) Часть лага, выходящая из корпуса судна через клинкет
б) измерительная часть лага с расположенными чувствительными элементами

Рис. 4. Расчетная модель лага в COMSOL Multiphysics

Для описания распространения волн в твердом теле использовался модуль «Акустика твердых тел». Граничные условия на торцах трубки заданы как свободные. Источник возбуждения моделировался как нормальное ускорение на малой площадке, соответствующей месту крепления преобразователя. Форма сигнала представляла собой синусоидальный импульс с частотой *f*, модулированный гауссовой огибающей (рис. 5), что позволяет сконцентрировать энергию в узкой полосе частот и избежать резких фронтов.

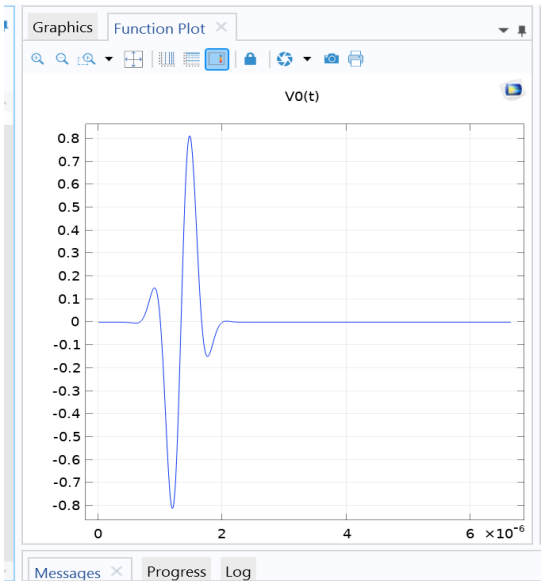


Рис. 5. Огибающая по Гауссу для ультразвукового импульса

Расчеты проводились для различных временных интервалов. Результаты моделирования (рис. 6 и 7) наглядно демонстрируют, что упругие волны от точечного источника эффективно распространяются по всей длине и поверхности трубки, не затухая полностью на исследуемом отрезке времени, равном 10 периодов колебания источника ультразвука. Это подтверждает, что одного излучателя, установленного в верхней части трубки, достаточно для создания кавитационного поля по всей рабочей поверхности, контактирующей с забортной водой.

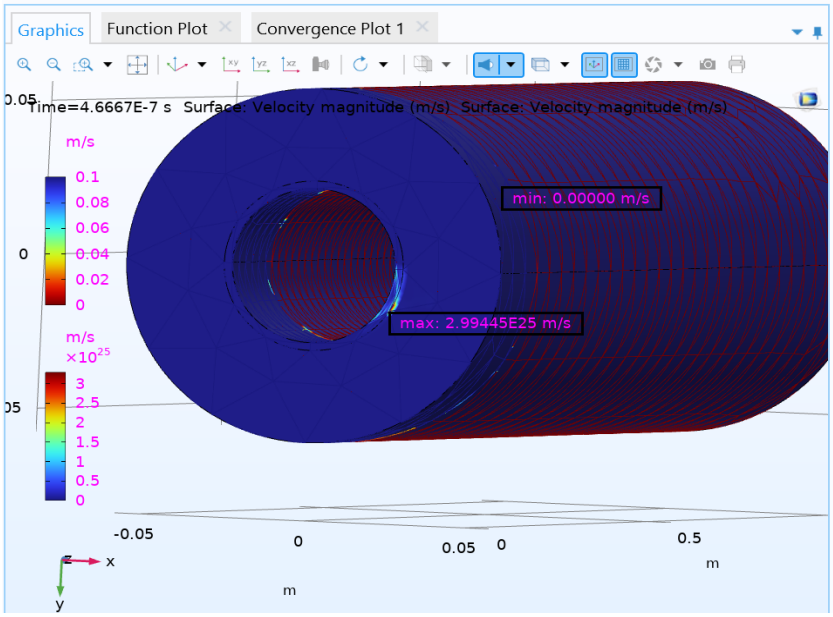


Рис. 6. Распространение ультразвукового импульса в 3D модели

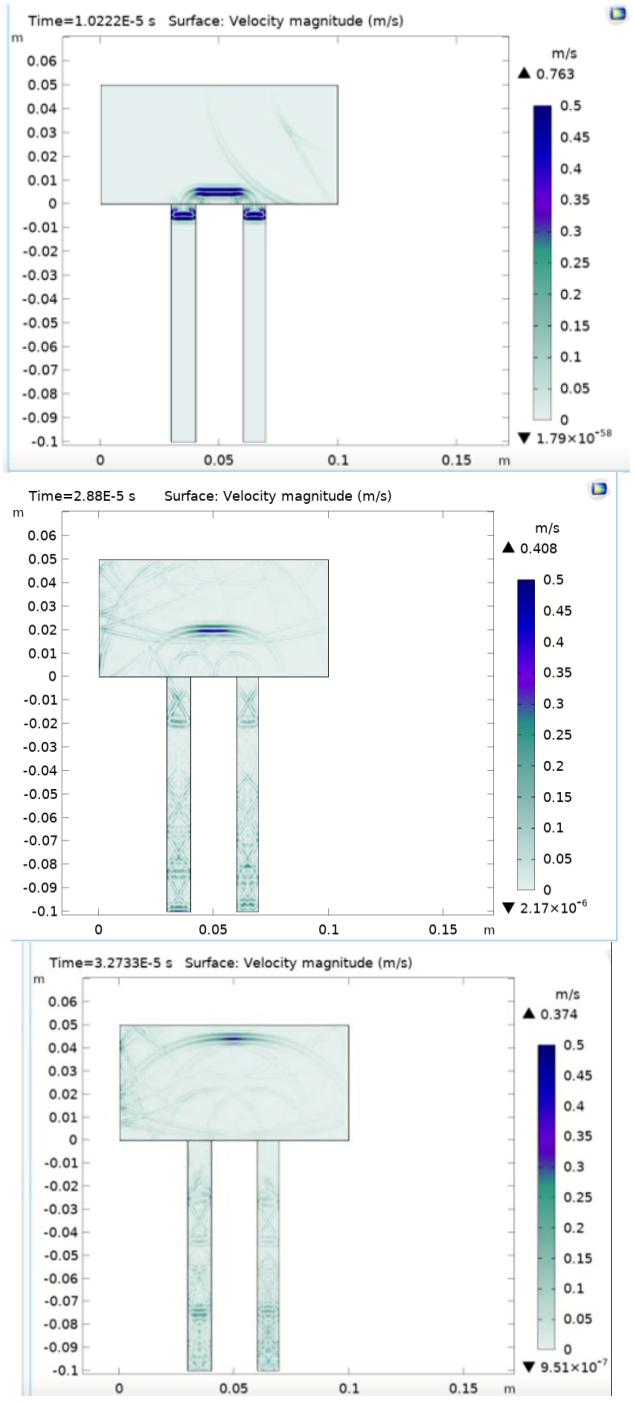


Рис. 7. Распространение волны в разрезе трубки в разный момент времени

Проведённое исследование в программном продукте COMSOL, наглядно показывает, как распространяется волна. Согласно моделированию, звуковая волна обладает достаточной энергией для обеспечения эффекта кавитации на всей площади

лага. При расположении источника ультразвука на клинкете (фланце выхода лага) распространение ультразвукового излучения происходит по всей поверхности трубки равномерно, таким образом реально использовать кавитационный метод для очистки лага от обрастания.

Заключение

В ходе исследования с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics была построена математическая модель распространения ультразвуковых волн в приемной трубке гидродинамического лага нового типа. Моделирование подтвердило равномерное распределение акустического поля по поверхности трубки при размещении одного излучателя в верхней части конструкции. Это доказывает техническую реализуемость компактной встроенной системы защиты.

Разработанная система не требует вмешательства в конструкцию лага, не выделяет вредных веществ и может работать автоматически. Внедрение таких систем позволит повысить точность навигационных измерений, сократить эксплуатационные расходы на очистку и докование. Направлением дальнейших исследований является экспериментальная проверка полученных модельных данных в лабораторных и натурных условиях.

Список литературы

1. Итенберг, С.И. Курс кораблевождения. Том 5, книга 3. Лаги и автосчислители / С.И. Итенберг, А.П. Дворников, И.В. Балашков. – Ленинград: [б.и.], 1964. – 548 с.
2. Технология очистки и окраски корпусов судов / А. А. Васильев, В. М. Левшаков, Н. П. Маслова, С. В. Морозов. – Санкт-Петербург : ЦТСС, 2015. – 269 с. – ISBN 978-5-902241-29-4.
3. Подводная технология / В.А. Коробков, В.С. Левин, А.В. Лукошков, П.П. Серебреницкий. – Л.: Судостроение, 1981. – 239 с.
4. Филимонова В.А. Методы борьбы с биологическими обрастаниями / В.А. Филимонова, Е.О. Харчевникова // Вологдинские чтения. – 2009. – № 76. – С. 129–131.
5. Donnelly B., Sammut K., Tang Y. Materials Selection for Antifouling Systems in Marine Structures // Molecules. – 2022. – Vol. 27, № 11. – P. 3408. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules27113408
6. Legg M., Yücel M.K., de Carellan I.G., Kappatos V., Selcuk C., Gan T.H. Acoustic methods for biofouling control: A review // Ocean Engineering. – 2015. – Vol. 103. – P. 237–247.
7. Kitamura H., Takahashi K., Kanamaru D. Inhibitory effect of ultrasonic waves on the larval settlement of the barnacle Balanus amphitrite in the laboratory // Marine Fouling. – 1995. – Vol. 12, № 1. – P. 9–13.
8. Гуревич, Е.С. Морское обрастание и борьба с ним / Е.С. Гуревич, Е.В. Александрова, С.В. Максимова, Т.Н. Тасуна. – М.: Воениздат, 1957. – 504 с.
9. Mazue G., Viennet R., Hihn J.Y., Carpentier L., Devidal P., Albaina I. Large-scale ultrasonic cleaning system: design of a multi-transducer device for boat cleaning (20 kHz) // Ultrasonics Sonochemistry. – 2011. – Vol. 18, № 4. – P. 895–900.
10. Guo S., Lee H.P., Khoo B.C. Inhibitory effect of ultrasound on barnacle (Amphibalanus amphitrite) cyprid settlement // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. – 2011. – Vol. 409, № 1–2. – P. 253–258.
11. Патент RU 2837729 C2 Российская Федерация, G01P 5/14. Гидродинамический лаг : № 2023113865 : заявл. 27.05.2023 : опубл. 03.04.2025 // Антонов А.А., Куценко В.А., Артемьев А.В., Горшков А.А. ; Патентообладатели: Аракелян А.А. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=80657322– Текст электронный.
12. Перспективы развития судовых относительных измерителей скорости / Антонов, А. А.; Артемьев, А. В.; Дробышева, О. О. // Морские Исследования на Дальнем Востоке : Сборник Докладов VII Научно-Практической Конференции, Владивосток, 19 Ноября 2024 г. – Владивосток : МГУ им. адмирала Г.И. Невельского, 2024. – С. 122–126.
13. Сиротюк, М.Г. Акустическая кавитация / М.Г. Сиротюк. – М.: Наука, 2008. – 271 с.
14. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: В 10 т. Т. VII: Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2003. – 264 с.

15. Seth N., Chakravarty P., Khandeparker L., Anil A.C., Pandit A.B. Quantification of the energy required for the destruction of Balanus amphitrite larva by ultrasonic treatment // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. – 2010. – Vol. 90, № 7. – P. 1475–1482.
16. Habibi H., Gan T.H., Legg M., Garcia de Carellan I., Kappatos V., Tzitzilonis V., Selcuk C. An acoustic antifouling study in sea environment for ship hulls using ultrasonic guided waves // International Journal of Engineering Technologies and Management Research. – 2016. – Vol. 3, № 4. – P. 14–30.

References

1. Itenberg, S.I. Kurs korablevozhdeniya. Volume 5, Book 3. Lagi i avtoschisliteli / S.I. Itenberg, A.P. Dvornikov, I.V. Balashkov. – Leningrad: [s.n.], 1964. – 548 p.
2. Tekhnologiya ochistki i okraski korpusov sudov / A. A. Vasiliev, V. M. Levshakov, N. P. Maslova, S. V. Morozov. – Saint Petersburg: CSTS, 2015. – 269 p. – ISBN 978-5-902241-29-4.
3. Podvodnaya tekhnologiya / V.A. Korobkov, V.S. Levin, A.V. Lukoshkov, P.P. Serebrenitsky. – L.: Sudostroenie, 1981. – 239 p.
4. Filimonova V.A. Metody borby s biologicheskimi obrastaniyami / V.A. Filimonova, E.O. Kharchennikova // Vologdinsky Readings. – 2009. – № 76. – P. 129–131.
5. Donnelly B., Sammut K., Tang Y. Materials Selection for Antifouling Systems in Marine Structures // Molecules. – 2022. – Vol. 27, № 11. – P. 3408. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules27113408
6. Legg M., Yücel M.K., de Carellan I.G., Kappatos V., Selcuk C., Gan T.H. Acoustic methods for biofouling control: A review // Ocean Engineering. – 2015. – Vol. 103. – P. 237–247.
7. Kitamura H., Takahashi K., Kanamaru D. Inhibitory effect of ultrasonic waves on the larval settlement of the barnacle Balanus amphitrite in the laboratory // Marine Fouling. – 1995. – Vol. 12, № 1. – P. 9–13.
8. Gurevich, E.S. Morskoe obrastanie i borba s nim / E.S. Gurevich, E.V. Alexandrova, S.V. Maksimova, T.N. Tasuna. – M.: Voenizdat, 1957. – 504 p.
9. Mazue G., Viennet R., Hihn J.Y., Carpentier L., Devidal P., Albaina I. Large-scale ultrasonic cleaning system: design of a multi-transducer device for boat cleaning (20 kHz) // Ultrasonics Sonochemistry. – 2011. – Vol. 18, № 4. – P. 895–900.
10. Guo S., Lee H.P., Khoo B.C. Inhibitory effect of ultrasound on barnacle (Amphibalanus amphitrite) cyprid settlement // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. – 2011. – Vol. 409, № 1–2. – P. 253–258.
11. Patent RU 2837729 C2 Russian Federation, G01P 5/14. Gidrodinamicheskiy lag: № 2023113865 : appl. 27.05.2023 : publ. 03.04.2025 / Antonov A.A., Kutsenko V.A., Artemyev A.V., Gorshkov A.A. ; Proprietor: Arakelyan A.A. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=80657322 – Text electronic.
12. Perspektivy razvitiya sudovykh otnositelnykh izmeriteley skorosti / Antonov, A. A.; Artemyev, A. V.; Drobysheva, O. O. // Marine Research in the Far East : Collection of Reports of the VII Scientific-Practical Conference, Vladivostok, November 19, 2024. – Vladivostok : MSU named after adm. G.I. Nevelskoy, 2024. – P. 122–126.
13. Sirotyuk, M.G. Akusticheskaya kavitatsiya / M.G. Sirotyuk. – M.: Nauka, 2008. – 271 p.
14. Landau L.D. Teoreticheskaya fizika: In 10 vols. Vol. VII: Theory of Elasticity / L.D. Landau, E.M. Lifshitz. – M.: Fizmatlit, 2003. – 264 p.
15. Seth N., Chakravarty P., Khandeparker L., Anil A.C., Pandit A.B. Quantification of the energy required for the destruction of Balanus amphitrite larva by ultrasonic treatment // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. – 2010. – Vol. 90, № 7. – P. 1475–1482.
16. Habibi H., Gan T.H., Legg M., Garcia de Carellan I., Kappatos V., Tzitzilonis V., Selcuk C. An acoustic antifouling study in sea environment for ship hulls using ultrasonic guided waves // International Journal of Engineering Technologies and Management Research. – 2016. – Vol. 3, № 4. – P. 14–30.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бочарова Виктория Валерьевна, к.т.н., доцент кафедры радиоэлектроники и радиосвязи, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50а, e-mail:bocharova@msun.ru

Victoria V. Bocharova, PhD, Associate Professor of the Department of Radio Electronics and Radio Communications, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Verkhneportovaya St., 50a, 690059

Дробышева Ольга Олеговна, аспирант, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: drobysheva@msun.ru

Olga O. Drobysheva, Postgraduate Student, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Verkhneportovaya St., 50a, 690059

Стадников Виктор Юрьевич, студент, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: victor01.02@yandex.ru

Victor Y. Stadnikov, student, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Verkhneportovaya St., 50a, 690059

Антонов Александр Александрович, аспирант, Морской государственный университет имени адмирала Г.И.Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: antonov@msun.ru

Alexander A. Antonov, Postgraduate Student, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Verkhneportovaya St., 50a, 690059

Статья поступила в редакцию 07.05.2026; принята к публикации 10.08.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 07.05.2026; published online 20.09.2026.