Теория корабля и строительная механика

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-2>
УДК 532.3; 532.5; 629.585

В.Л. Земляк, В.М. Козин, А.С. Васильев

ЗЕМЛЯК ВИТАЛИЙ ЛЕОНИДОВИЧ – к.ф.-м.н., доцент (автор, ответственный за переписку),
SPIN: 9172-5202, ResearcherID: Y-2761-2018, ORCID: 0000-0002-3218-5738,
ScopusID 36085759800, vellkom@list.ru

ВАСИЛЬЕВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ – к.т.н., доцент, SPIN: 3401-1530,
ResearcherID: Q-9416-2018, ORCID: 0000-0001-7783-0000, ScopusID 57203895897,
vasil-grunt@mail.ru

Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема
Биробиджан, Россия

КОЗИН ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник,
SPIN: 1265-7970, ResearcherID: S-6053-2016, ORCID: 0000-0002-2673-469X,
ScopusID: 8548383800, kozinvictor@rambler.ru

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН

Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН
Комсомольск-на-Амуре, Россия

Движение погруженного тела вблизи свободной поверхности жидкости

Аннотация: Для выполнения различных задач подводные суда часто эксплуатируются в приповерхностной водной среде. В таких условиях маневренность и управляемость судном становятся критически важным фактором его безопасной эксплуатации. Силы, действующие со стороны жидкости на погруженное тело, могут оказывать существенное влияние на характер его движения. В работе авторами с помощью программного комплекса ANSYS 19 R2 Academic Research выполнены расчеты движения погруженного тела с различной скоростью вблизи свободной поверхности жидкости. Получены профили взволнованной поверхности водной среды. Проанализирован характер распределения давления вдоль верхней поверхности погруженного тела в зависимости от скорости движения. Определена зависимость коэффициента волнового сопротивления для модели тела с заданными параметрами. Установлены скорости движения, при которых наблюдались максимумы и минимум значений коэффициента волнового сопротивления. Работоспособность алгоритма подтверждена путем сопоставления с известными экспериментальными данными и результатами модельных экспериментов, выполненных в опытовом бассейне.

Ключевые слова: погруженное тело, свободная поверхность, волновое сопротивление

Введение

Скорость движения современного подводного аппарата в подводном положении сильно меняется в зависимости от выполняемых им задач. Так, для комплексов, выполняющих научно-исследовательские работы, скорость составляет до 5 узлов, а для субмарин гражданского и боевого назначения максимальная скорость подводного хода может достигать 45 узлов [1], для современных подводных беспилотных систем – до 100 узлов [4]. Часто подводные суда эксплуатируются в приповерхностной водной среде, при этом маневренность и управляемость в таких условиях становятся критически важным фактором безопасной эксплуатации судна.

Еще в 1950-х годах в США было установлено, что низким сопротивлением при высоких скоростях движения обладает погруженное тело в виде эллипсоида вращения с относительным удлинением L/D (где L – длина, D – диаметр тела), равным порядка 6,0 [9]. Однако для подводного судна эллиптическая форма корпуса нецелесообразна в виду необходимости размещения бортовых систем и отсеков с полезной нагрузкой, поэтому современные субмарины имеют цилиндрическую вставку значительной длины [6].

Для погруженного обтекаемого тела, движущегося с постоянной скоростью в однородной вязкой жидкости, полное сопротивление будет складываться из сопротивления трению и сопротивления форме [10]. Сопротивление трению возникает в результате взаимодействия жидкости с погруженным телом и создания пограничного слоя жидкости на поверхности и вокруг него [13]. Сопротивление формы существенно зависит от размеров тела: так, Ю.Н. Кормилицин и О.А. Хализев показали, что для эллипсоида вращения при $6,0 \leq L/D \leq 10,0$ сопротивление формы снижается с 25 до 10% [12]. При движении вблизи свободной поверхности давление, формируемое вокруг внешних поверхностей корпуса, будет генерировать гравитационные волны, которые взаимодействуют между собой [13]. Гидродинамическое сопротивление и возникающая вертикальная подъемная сила могут оказывать существенное влияние на тело по сравнению со случаем движения на большом заглублении, при котором волнообразование на свободной поверхности воды отсутствует. Несмотря на то что первые работы, посвященные рассматриваемой теме, появились еще во время Первой мировой войны, на сегодняшний день влияние сил, действующих на погруженное тело, изучено недостаточно. Результаты теоретических расчетов и экспериментальных данных сильно разнятся, что связано с трудностью и особенностью проведения модельных экспериментов подобного рода, когда модель погруженного тела буксируется на специальной штанге, закрепленной в корме модели и оказывающей существенное влияние на картину волнообразования.

Цель настоящей статьи – разработка численного решения для определения сил, действующих на погруженное тело при его движении вблизи свободной поверхности жидкости, а также проверка работоспособности предложенного алгоритма с помощью модельного эксперимента.

Разработка численной модели

Численные расчеты проводились в программном комплексе ANSYS 19 R2 Academic Research. Модель учитывала волнообразование на свободной поверхности жидкости от перемещения на определенном заглублении с различной скоростью погруженного тела заданной геометрической формы. Расчеты выполнялись в модуле ANSYS Fluent, позволяющем решать различные задачи гидродинамики. За основу движения брались две модели: модель Multiphase (Volume of Fluid) для учета двухфазных сечений (так как в данной задаче рассматривалось две фазы: водная и воздушная) и модель турбулентности $k-\epsilon$. Данные модели основаны на трех системах уравнений, решаемых в ANSYS: Flow; Volume fraction; $k-\epsilon$ (модель турбулентности).

Система уравнений потока Flow (1) использовалось для математического описания физики потока жидкости и состояла из уравнения неразрывности и уравнения Навье–Стокса [5]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla(\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}_{vol},$$

где ρ – плотность; ∇ – оператор набла; $\vec{V}$ – скорость в данный момент времени; P – давление; $\vec{\tau}$ – тензор вязкого напряжения; $\vec{g}$ – ускорение свободного падения, $\vec{F}_{vol}$ – объемная сила.

Уравнение Volume fraction (2) применялось для реализации модели Multiphase. При исследовании волнообразования на поверхности воды и движении объектов в водной среде жидкая и газообразная фазы разделялись четкими границами [11].

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{V}_i) = 0 \quad (i = g \text{ (gas) or } l \text{ (liquid)}), \quad (2)$$

где α_i – объемная доля газа или жидкости. Индексы g и l представляют газовую и жидкую фазы соответственно.

При расчете движения погруженного тела средствами ANSYS Fluent использовалась модель турбулентности k-ε, которая относится к классу дифференциальных моделей турбулентности с двумя уравнениями, т.е. в ней строятся два дополнительных дифференциальных уравнения переноса для осредненных пульсационных характеристик, через которые затем выражается коэффициент турбулентной вязкости μ_t . Для определения турбулентной вязкости в этой модели рассматриваются два скалярных параметра: k – удельная кинетическая энергия турбулентности; ε – скорость вязкой диссипации энергии турбулентности.

Уравнение для кинетической энергии турбулентности имело вид (3):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \text{grad} k \cdot \vec{v} = \overline{\vec{v}' \times \vec{v}'} \times \text{grad} \times \vec{v} + \text{div} \left(\nu \times \text{grad} k - \overline{\vec{v}' \left(\frac{p'}{\rho} + \frac{1}{2} \vec{v}' \cdot \vec{v}' \right)} \right) - 2\nu \text{tr} \left(\text{grad} \vec{v}' \cdot \text{grad} \vec{v}' \right)^T. \quad (3)$$

Для совместной работы всех уравнений применялся метод конечных объемов (finite volume method – FVM). В FVM вычислительная область разделяется на контрольные объемы, и принципы сохранения данных применяются к каждому контрольному объему. Это обеспечивает сохранение как в каждой ячейке, так и глобально – во всей вычислительной области, что является большим преимуществом FVM [14].

Сетка накладывалась с учетом пристеночных слоев, с использованием сеточной функции inflation. Для построения сетки использовался алгоритм CutCell. Дискретная модель погруженного тела в водной среде показана на рис. 1. Размеры пространства по осям составили: X – 5L; Y – 7D; Z – 15D. Максимальный размер ячейки равнялся 0,01L. Вода представляла собой жидкость плотностью $\rho=998 \text{ кг/м}^3$ и динамической вязкостью $\nu = 1,03 \text{ МПа}\cdot\text{с}$.

**Рис. 1. Дискретизация модели в водной среде.
Здесь и далее иллюстрации В.Л. Земляка.**

Расчеты выполнялись в нестационарном решателе Transient с использованием динамических сеток Dynamic Mesh. Погруженное тело окружалось пристеночными слоями для улучшения обтекаемости. Основные характеристики модели: число ячеек 1880897; коэффициент полноты мидель-шпангоута $\beta=0,785$; коэффициент общей полноты $\delta=0,673$; призматический коэффициент $\varphi=0,857$; относительное удлинение $L/D=8,4$. Скорость движения модели лежала в диапазоне $Fr=0,3-0,71$. Относительное заглубление $H^*=H/D$ составило 1,16 (H – расстояние до оси симметрии модели погруженного тела).

Подготовка к проведению модельных экспериментов

Для подтверждения работоспособности предложенного численного алгоритма была проведена серия модельных экспериментов по движению погруженного тела вблизи свободной поверхности воды в опытовом бассейне лаборатории ледотехники (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, г. Биробиджан) [3] в январе 2020 г. Геометрическая форма и относительное удлинение полностью повторяли форму и удлинение модели, использовавшейся в численных расчетах. Тело изготавливалось с помощью послойной печати физического объекта на принтере Raise3D по цифровой трехмерной модели. Точность изготовления составила 0,01 мм. Длина модели равнялась $L=1,154$ м, $D=0,1375$ м. Скорость перемещения и относительное заглубление также соответствовали численным экспериментам. Масштаб моделирования составил $\lambda=1-120$.

Размеры опытового бассейна, в котором проводились модельные эксперименты, соответствовали требованиям, предъявляемым к экспериментам подобного рода [2]. Параметры чаши бассейна составили: длина – 11,6L; ширина – 21,8D; глубина – 6,5D.

Перемещение модели выполнялось с помощью тросовой буксировочной системы, которая, в отличие от традиционных методов буксировки погруженных тел, с помощью штанги, размещенной в корме моделей, не оказывала влияние на общую картину волнообразования. Конструктивно система была выполнена в виде двух рам, устанавливаемых по разные стороны бассейна и оснащенных подвижными балками с блоками проводки буксировочного троса. Для буксировки модели использовалась буксировочная тележка, перемещающаяся с помощью сервопривода Servoline 130SPSM14 компании Zetek (Russia) по рельсовым направляющим.

Запись взволнованной поверхности осуществлялась через измерительный модуль Q.bloxx A107 с помощью бесконтактных лазерных датчиков LAS-Z Q.Gate A107 компании Way Con (Германия). Профили волн записывались с помощью программы Test.viewer 2.34. Также в процессе буксировки модели измерялась скорость ее движения. Буксировочная система не была предназначена для записи величин общего и волнового сопротивления при движении нагрузки.

Основные результаты моделирования

На первом этапе исследования было выполнено сопоставление данных модельных и численных экспериментов, полученных в опытовом бассейне при буксировке модели судна на относительном заглублении $H^*=1,16$, с известными результатами по буксировкам моделей погруженных тел вблизи свободной поверхности воды. Для сопоставления брались профили гравитационных волн (H_w – высота волны), полученные при буксировке модели погруженного тела каплеобразной формы с относительным удлинением $L/D=8,5$, $\varphi=0,815$ и относительным заглублением $H^*=1,02$, при скоростях движения $Fr=0,3$ (рис. 2) и $Fr=0,5$ (рис. 3), опубликованные в работе Dawson [7].

Анализ соотношения профилей показал качественную сходимость между данными экспериментов Dawson и модельными и численными результатами, полученными в настоящем исследовании. Различие в высоте гравитационных волн можно объяснить разницей между относительными заглублениями моделей, их параметрами, а также влиянием системы крепления модели к буксировочной тележке в экспериментах Dawson.

Далее сопоставлялись параметры гравитационных волн, полученные в результате экспериментального и численного моделирования. На рис. 4 показаны зависимости относительной высоты волны H_w/L от скорости движения погруженного тела. Графики иллюстрируют: разность между результатами для скоростей $Fr=0,41-0,71$ составила 1–4%. При скоростях движения $Fr=0,31-0,35$ разница доходила до 14%, что связано с трудностью проведения экспериментов при малых скоростях движения нагрузки и особенностями работы буксировочной системы. При скорости движения $Fr=0,59$ наблюдалась максимальная высота генерируемых гравитационных волн.

Рис. 2. Сопоставление профилей гравитационных волн, полученных при скорости движения модели погруженного тела $Fr=0,3$:
 1 – эксперимент, проведенный нами; 2 – эксперимент Dawson [7];
 3 – численный расчет, проведенный нами.

Рис. 3. Сопоставление профилей гравитационных волн, полученных при скорости движения модели погруженного тела $Fr = 0,5$:
 1 – эксперимент, проведенный нами; 2 – эксперимент Dawson [7];
 3 – численный расчет, проведенный нами.

Рис. 4. Зависимость Hw/L от скорости движения модели погруженного тела:
 1 – эксперимент с моделью № 1; 2 – численный расчет для модели № 1.

На рис. 5 представлены численные результаты расчета вертикальной составляющей распределения давления вдоль нижней поверхности погруженного тела $C_{pz} = \frac{P-P_{\infty}}{0,5\rho V^2}$ для различных скоростей движения.

Рис. 5. Распределение давления вдоль нижней поверхности погруженного тела для различной скорости движения.

Результаты моделирования показали, что при малом заглублении возникало значительное изменение в распределении давления по верхней поверхности погруженного тела, которое соответствовало установившейся волновой системе на свободной поверхности жидкости. Относительное расположение вершин и впадин волновой системы приводило к формированию локализованных областей высокого и низкого давления, а увеличение скорости движения модели – к росту длины гравитационных волн (рис. 6) и смещению относительного положения пиков давления в район кормы тела. Неравномерное распределение давления по верхней и нижней поверхности тела приводило к возникновению подъемной силы, которая при малых числах Fr способна притягивать тело к свободной поверхности жидкости; достигнув максимальных значений при $Fr=0,4$ и уменьшаясь после этого, она переходит в силу, отталкивающую тело от свободной поверхности жидкости [8].

На рис. 7 представлены численные результаты зависимости коэффициента волнового сопротивления погруженного тела $C_w = \frac{R_w}{0,5\rho V^2 S}$ (R_w – волновое сопротивление; S – площадь смоченной поверхности тела) от скорости его движения. Известно, что при движении тела вблизи свободной поверхности жидкости на формирование профиля волнового поля оказывают влияние пять волновых компонентов, формирующихся в областях максимального и минимального давления [13]. Взаимодействие между волновыми компонентами приводит к интерференции поверхностных волн, которая зависит от скорости движения, длины и геометрии тела [15]. В результате этого взаимодействия происходит либо увеличение волнового сопротивления, либо его уменьшение. Результаты численного моделирования показали, что при скорости порядка $Fr=0,3$ наблюдался первый локальный максимум коэффициента волнового сопротивления, затем происходило его снижение до минимального значения при $Fr=0,35$. При скорости равной $Fr=0,50$ наблюдался второй локальный максимум C_w , значительно превосходящий по значениям первый. При более высоких скоростях движения формировались волны, длина которых была слишком велика, чтобы вызывать эффект интерференции. В результате C_w уменьшался. Сопоставление результатов с известными экспериментальными данными для тела схожей геометрии показало качественное совпадение положения максимумов и минимумов коэффициента волнового сопротивления (рис. 7).

Рис. 6. Численное моделирование изополей взволнованной поверхности жидкости:
а – $Fr = 0,3$; б – $Fr = 0,42$; в – $Fr = 0,6$.

Рис. 7. Зависимость коэффициента C_w от скорости движения тела:
1 – численный расчет; 2 – эксперимент Dawson [7].

Заключение

На базе программного комплекса ANSYS 19 R2 Academic Research разработано численное решение, позволяющее выполнить анализ волнообразования при движении погруженного тела вблизи свободной поверхности жидкости. Работоспособность предложенного алгоритма проверена путем сопоставления данных с результатами модельных экспериментов, полученных в опытовом бассейне, а также с данными экспериментов, опубликованных другими авторами. Расхождение между результатами составило от 1 до 14%.

Определена скорость, при которой волнообразование от движения погруженного тела с заданными характеристиками было максимальным.

Получены поля давлений вдоль верхней поверхности погруженного тела для различных скоростей движения.

Построена зависимость коэффициента волнового сопротивления C_w для модели с заданными характеристиками. Установлены скорости движения, при которых наблюдались два локальных максимума и минимум значений C_w .

Дальнейшим направлением исследования является доработка предложенного численного алгоритма с целью определения значений коэффициентов вертикальной подъемной силы, дифференцирующего момента и вертикального перемещения, возникающих при движении погруженного тела вблизи свободной поверхности жидкости с различной скоростью.

Вклад авторов в статью: В.Л. Земляк – составление плана эксперимента, изготовление модели, проведение и анализ данных эксперимента, выводы; В.М. Козин – выбор метода моделирования, перевод источников, ответственность за целостность всех частей статьи; А.С. Васильев – разработка численного алгоритма, проведение численных экспериментов. Все авторы – редактирование текста и утверждение окончательного варианта статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апальков Ю.В. Подводные лодки советского флота 1945–1991 гг. Т. 3: Третье и четвертое поколения АПЛ. М.: Моркнига, 2012, 308 с. URL: https://www.studmed.ru/apalkov-yu-v-podvodnye-lodki-sovetskogo-flota-1945-1991-gg-tom-iii-trete-i-chetvertoe-pokoleniya-apl-mono-grafiya_f5dee2c5a7c.html (дата обращения: 20.03.2020).
2. Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов. Л.: Судостроение, 1988. 288 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001395848> (дата обращения: 16.04.2020).
3. Земляк В.Л., Баурин Н.О., Курбацкий Д.А. Лаборатория ледотехники // Вестник Приамурского гос. ун-та им. Шолом-Алейхема. 2013. № 1(12). С. 68–77. eLIBRARY ID: 21023639
4. Сайт: Министерство обороны Российской Федерации. URL: <http://vote.mil.ru/vote/oms.htm> (дата обращения: 13.03.2020).
5. ANSYS CFX Solver Theory Guide. ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, 2011, 270 p. URL: https://www.researchgate.net/profile/Ghassan_Smaisim/post/How_to_solve_below_integral_numerically/attachment/59d6555f79197b80779ac936/AS%3A525446028115968%401502287503696/-download/113+Ansys+CFX+Solver+Theory+Guide.pdf – 08.02.2020.
6. Burcher R., Rydill L. Concepts in Submarine Design. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press, 1994, 314 p. URL: https://books.google.ru/books?id=tGVgQgAACAAJ&hl=ru&source=gbs_book_other_versions_r&cad=4 – 06.04.2020.
7. Dawson E. An investigation into the effects of submergence depth, speed and hull length-to-diameter ratio on the near-surface operation of conventional submarines. PhD thesis, University of Tasmania, Hobart, Australia, 2014, 214 p. URL: <https://eprints.utas.edu.au/22368/1/Whole-Dawson-thesis.pdf> – 08.02.2020.
8. Doctors L., Beck R. Convergence Properties of the Neumann-Kelvin Problem for a Submerged Body. Journal of Ship Research, 1987(31):227–234. URL: <https://trid.trb.org/view/397172> – 14.03.2020.
9. Gertler M. Resistance Experiments on a Systematic Series of Streamlined Bodies of Revolution – For Application to the Design of High-Speed Submarines. Washington D.C., Navy Department: The David W. Taylor Model Basin, 1950, 144 p. URL: <https://clck.ru/QGNGm> – 04.04.2020.

10. Granville P.S. Elements of the Drag of Underwater Bodies. Bethesda, Maryland, USA: David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center, 1976, 35 p. URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA031995/mode/2up – 07.04.2020.
11. Hirt C., Nichols B. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J. of Computational Physics 1981(39):201–225. URL: https://www.academia.edu/1516914/Volume_of_Fluid_VOF_Method_for_the_Dynamics_of_Free_Boundaries – 06.02.2020.
12. Kormilitsin Y.N., Khalizev O.A. Theory of Submarine Design. Saint-Petersburg, Russia, Saint-Petersburg State Maritime Technical Univ. 2001, 335 p. URL: <https://ru.scribd.com/doc/86467251/Theory-of-Submarine-Design> – 18.04.2020.
13. Larsson L., Raven H. The Principles of Naval Architecture Series: Ship Resistance and Flow. Jersey City, New Jersey, USA. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010, 243 p. URL: <https://b-ok.cc/book/2215126/b6efe8> – 12.04.2020.
14. Stenmark E. On Multiphase Flow Models in ANSYS CFD Software. Master's Thesis in Applied Mechanics. Göteborg, Sweden, 2013, 75 p. URL: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/-182902/182902.pdf> – 10.02.2020.
15. Weinblum G., Amtsberg H., Bock, W. Tests on Wave Resistance of Immersed Bodies of Revolution. Washington D.C. The David W. Taylor Model Basin, 1950, 26 p. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Tests-on-Wave-Resistance-of-Immersed-Bodies-of-Weinblum-Amtsberg/04e148-5784f2b752bc599839dfa9ff18ff72ac73> – 18.05.2020.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 4/45

Theory of the Ship and Construction Mechanics

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-2>

Zemlyak V., Kozin V., Vasilyev A.

VITALIY ZEMLYAK, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate professor (corresponding author), ResearcherID: Y-2761-2018, ORCID: 0000-0002-3218-5738, ScopusID 36085759800, vellkom@list.ru

ALEXEY VASILYEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate professor, ResearcherID: Q-9416-2018, ORCID: 0000-0001-7783-0000, ScopusID: 57203895897, vasil-grunt@mail.ru

Sholom-Aleichem Priamursky State University
Birobidzhan, Russia

VICTOR KOZIN, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief researcher, ResearcherID: S-6053-2016, ORCID: 0000-0002-2673-469X, ScopusID: 8548383800, kozinvictor@rambler.ru

Institute of Machine Science and Metallurgy FEB RAS
Komsomolsk-on-Amur, Russia

The movement of an submerged body near the free surface of a liquid

Abstract: To perform various tasks, submarines are often operated in near-surface aquatic environments. In such conditions, the maneuverability and controllability of the vessel become a critical factor in its safe operation. The forces exerted by the liquid on the submerged body can have a significant effect on the nature of its movement. Using the ANSYS 19 R2 Academic Research software package, the authors performed calculations of the movement of an submerged body at different speeds near the free surface of a liquid. Profiles of the excited surface of the aquatic environment are obtained. The nature of the pressure distribution along the upper surface of an submerged body depending on the speed of movement is analyzed. The dependence of the wave resistance coefficient for a model of a body with given parameters is determined. The speeds of motion were established at which the maximums and minimum values of the wave resistance coefficient were observed. The efficiency of the algorithm is confirmed by comparing with the known experimental data and the results of model experiments performed in the experimental tank.

Keywords: submerged body, free surface of a liquid, wave resistance coefficient

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Article: received: 15.06.2020; reviewed: 13.08.2020; accepted: 18.08.2020.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project N 16-19-10097).

REFERENCES

1. Apalkov Y.V. Submarine vessels of the USSR Navy of 1945–1991. Vol. 3. M., Morkniga, 2012, 308 p. URL: https://www.studmed.ru/apalkov-yu-v-podvodnye-lodki-sovetskogo-flota-1945-1991-gg-tom-iii-trete-i-chetvertoe-pokoleniya-apl-monografiya_f5dee2c5a7c.html – 20.03.2020.
2. Voitkunsky Y.I. Water Resistance to Vessel Motion. L., Sudostroenie, 1988, 288 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001395848> – 16.04.2020.
3. Zemlyak V.L., Baurin N.O., Kurbackiy D.A. Laboratory Ice technology. J. of Amur State University after Sholom-Aleichem. 2013(12):68–77. eLIBRARY ID: 21023639
4. Web-site of Ministry of Defence of the Russian Federation. URL: <http://vote.mil.ru/vote/oms.htm> – 13.03.2020.
5. ANSYS CFX Solver Theory Guide. ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, 2011, 270 p. URL: https://www.researchgate.net/profile/Ghassan_Smaisim/post/How_to_solve_below_integral_numerically/attachment/59d6555f79197b80779ac936/AS%3A525446028115968%401502287503696/download/-113+Ansys+CFX+Solver+Theory+Guide.pdf – 08.02.2020.
6. Burcher R., Rydill L. Concepts in Submarine Design. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press, 1994, 314 p. URL: https://books.google.ru/books?id=tGVgQgAACAAJ&hl=-ru&source=gbs_book_other_versions_r&cad=4 – 06.04.2020.
7. Dawson E. An investigation into the effects of submergence depth, speed and hull length-to-diameter ratio on the near-surface operation of conventional submarines. PhD thesis, University of Tasmania, Hobart, Australia, 2014, 214 p. URL: <https://eprints.utas.edu.au/22368/1/Whole-Dawson-thesis.-pdf> – 08.02.2020.
8. Doctors L., Beck R. Convergence Properties of the Neumann-Kelvin Problem for a Submerged Body. Journal of Ship Research, 1987(31):227–234. URL: <https://trid.trb.org/view/397172> – 14.03.2020.
9. Gertler M. Resistance Experiments on a Systematic Series of Streamlined Bodies of Revolution – For Application to the Design of High-Speed Submarines. Washington D.C., Navy Department: The David W. Taylor Model Basin, 1950, 144 p. URL: <https://clck.ru/QGNGm> – 04.04.2020.
10. Granville P.S. Elements of the Drag of Underwater Bodies. Bethesda, Maryland, USA: David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center, 1976, 35 p. URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA031995/mode/2up – 07.04.2020.
11. Hirt C., Nichols B. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J. of Computational Physics 1981(39):201–225. URL: https://www.academia.edu/1516914/Volume_of_Fluid_VOF_Method_for_the_Dynamics_of_Free_Boundaries – 06.02.2020.
12. Kormilitsin Y.N., Khalizev O.A. Theory of Submarine Design. Saint-Petersburg, Russia, Saint-Petersburg State Maritime Technical Univ. 2001, 335 p. URL: <https://ru.scribd.com/doc/86467251/-Theory-of-Submarine-Design> – 18.04.2020.
13. Larsson L., Raven H. The Principles of Naval Architecture Series: Ship Resistance and Flow. Jersey City, New Jersey, USA. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010, 243 p. URL: <https://b-ok.cc/book/2215126/b6efe8> – 12.04.2020.
14. Stenmark E. On Multiphase Flow Models in ANSYS CFD Software. Master's Thesis in Applied Mechanics. Göteborg, Sweden, 2013, 75 p. URL: <http://publications.lib.chalmers.se/records/full-text/182902/182902.pdf> – 10.02.2020.
15. Weinblum G., Amtsberg H., Bock W. Tests on Wave Resistance of Immersed Bodies of Revolution. Washington D.C. The David W. Taylor Model Basin, 1950, 26 p. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Tests-on-Wave-Resistance-of-Immersed-Bodies-of-Weinblum-Amtsberg/04e-1485784f2b752bc599839dfa9ff18ff72ac73> – 18.05.2020.