

УДК 532.582
EDN: GMJPKD

В.Л. Земляк¹ , В.М. Козин² , А.С. Васильев¹, К.С. Некозырева¹

¹ ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема», Биробиджан, Россия

² ФГБУН «Институт машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН», Комсомольск-на-Амуре, Россия

ВЛИЯНИЕ РУБКИ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОГРУЖЕННОГО ТЕЛА ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ВОДНОЙ СРЕДЕ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является процесс движения погруженного тела с расположенной в носовой оконечности рубкой крыловидной формы вблизи свободной поверхности воды. Цели – определение влияния рубки на сопротивление, вертикальную подъемную силу и гидродинамический момент, действующие на тело со стороны жидкости, а также экспериментальное определение вертикального перемещения тела и угла дифферента для различных значений чисел Фруда.

Материалы и методы. Материалом для проведения исследований является методика моделирования, технологии и результаты модельных экспериментов в опытовом бассейне. Численное моделирование выполнено с помощью программного комплекса ANSYS.

Основные результаты. Проведено экспериментально-теоретическое исследование влияния на гидродинамические характеристики и параметры движения погруженного тела с рубкой, расположенной в носовой оконечности.

Закключение. Полученные результаты полезны для стабилизации движения в горизонтальной плоскости погруженного тела, имеющего выступающую часть в виде рубки крыловидной формы в зависимости от скорости его движения в приповерхностной водной среде.

Ключевые слова: погруженное тело, рубка, свободная поверхность жидкости, сопротивление, подъемная сила, гидродинамический момент.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 532.582
EDN: GMJPKD

V.L. Zemlyak¹ , V.M. Kozin² , A.S. Vasiliev¹, K.S. Nekozyreva¹

¹ Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russia

² Institute of Machinery and Metallurgy of the FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russia

INFLUENCE OF THE SAIL ON HYDRODYNAMICS OF A SUBMERGED BODY MOVING NEAR WATER SURFACE

Object and purpose of research. The object of research is motion of a submerged body with forward wing-shaped sail near free water surface. The purpose is to determine the sail influence on drag, vertical lift and hydrodynamic moment acting on the body from water as well as experimental evaluation of vertical displacement and angle of pitch for a range of Froude numbers.

Materials and methods. Investigations are based on the modeling procedures and technologies as well as test data of model experiments in test tanks. Numerical simulations are done using ANSYS software package.

Для цитирования: Земляк В.Л., Козин В.М., Васильев А.С., Некозырева К.С. Влияние рубки на гидродинамические характеристики погруженного тела при его движении в приповерхностной водной среде. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 4(406): 41–48.

For citations: Zemlyak V.L., Kozin V.M., Vasiliev A.S., Nekozyreva K.S. Influence of the sail on hydrodynamics of a submerged body moving near water surface. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 4(406): 41–48 (in Russian).

Main results. Experimental and theoretical studies have been performed to investigate the influence of the forward sail on hydrodynamic characteristics and motion parameters of the body.

Conclusion. The obtained results may be helpful for horizontal stabilization of a submerged body having an appendage in the form of a wing-shaped sail in function of speed when the body moves near water surface.

Keywords: submerged body, sail, free water surface, drag, lifting force, hydrodynamic moment.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Наружный корпус современного подводного аппарата (ПА) обычно имеет сложную архитектуру в виде ограждения выдвигаемых устройств, надстройки, кормового оперения и рулей, которые искажают удобообтекаемую форму корпуса. Наличие выступающих частей вызвано необходимостью обеспечения маневренности ПА, размещения гидроакустических станций, выдвигаемых устройств и другого оборудования, без которых нормальная эксплуатация устройства невозможна.

В практике проектирования ПА встречаются два основных типа ограждения выдвигаемых устройств в виде рубки крыловидной или объемной (лимузинной) формы [1]. Для крыловидной формы рубки характерна большая высота, минимальная ширина и наличие вертикальных стенок. Такая форма в наибольшей степени отвечает своему функциональному назначению – является опорой для выдвигаемых устройств, обеспечивая их работу при движении в подводном положении [1].

Несмотря на важность использования различного типа выступающих элементов, в научной литературе при определении сил и момента, действующих на погруженное тело, обычно вместо геометрически сложного корпуса ПА используется упрощенное тело вращения [2–5]. Усложнение геометрической формы погруженного тела ведет к снижению скорости его движения и росту сопротивления, особенно при перемещении на малом заглублении в приповерхностной водной среде.

В работе [6] авторы проанализировали влияние выступающих частей на составляющие сопротивление и волнообразование от движения субмарины DARPA Suboff на малом заглублении. Влияние рубки и кормового оперения на сопротивление и давление, возникающее вокруг тела при его движении в жидкости, покрытой ледяным покровом различной толщины, исследовано в [7]. В работе [8] рассчитаны спектры волн, генерируемых корпусами некоторых подводных лодок, и выполнено их сравнение со спектрами поверхностных волн от движения китов вблизи свободной поверхности воды.

В работе [9] проведен детальный анализ влияния на ходкость геометрически сложной формы корпуса подводной лодки проекта Joubert BB2. Для этой же модели субмарины проведено исследование влияния на гидродинамические характеристики формы геометрии носовой оконечности и положения рубки относительно мидель-шпангоута [10].

Очевидно, что выступающие части также оказывают влияние на характер движения погруженного тела, а именно на вертикальное перемещение, возникающее под воздействием подъемной силы F_z и угол дифферента. Измерение этих параметров экспериментально с помощью традиционного метода буксировки моделей на вертикально или горизонтально расположенном пилоне и жестко закрепленном на буксировочной тележке нереализуемо.

Цель данной работы – оценка влияния рубки крыловидной формы на гидродинамические характеристики и параметры движения погруженного тела.

Подготовка к проведению модельных и численных экспериментов

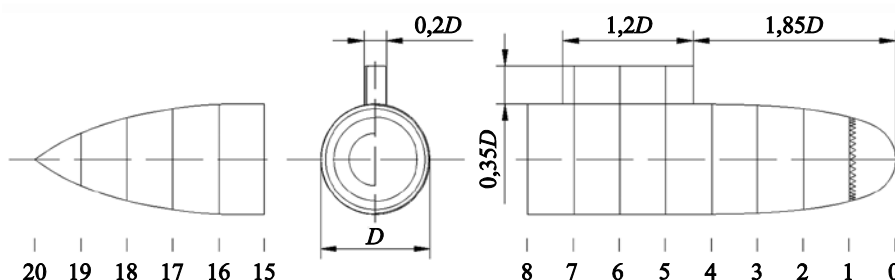
Preparation for model tests and numerical simulations

Для оценки влияния рубки на параметры движения модели при малом заглублении была проведена серия модельных экспериментов на базе опытового бассейна лаборатории ледотехники Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема [11] в феврале 2023 г.

Для экспериментов использовалась обобщенная модель современного ПА в виде погруженного тела асимметричной формы круглого сечения с цилиндрической вставкой и относительным удлинением $L^* = L/D = 8,4$ (где L – длина модели, равная 1,154 м, D – диаметр корпуса) в масштабе $\lambda = 1 - 120$. Модель имела расположенную в носовой части рубку крыловидной формы и была изготовлена с помощью послойной печати на принтере Raise3D. Наличие рубки приводило к увеличению площади смоченной поверхности корпуса тела S на 3,3 %. Теоретический чертеж погруженного тела, выполнен-

Рис. 1. Теоретический чертеж модели № 1.1 погруженного тела

Fig. 1. Lines drawing of submerged body model № 1.1



ный в AutoCAD 2019, показан на рис. 1. Моделирование турбулентного режима течения в пограничном слое осуществлялось с помощью искусственного турбулизатора в виде полосы Нама [12], расположенной на расстоянии $0,05L$ от носового перпендикуляра.

С учетом длины модели, особенностей ее изготовления и требуемой высоты турбулизатора полоса Нама оказалась оптимальным решением, обеспечивающим достаточный уровень устойчивого турбулентного потока при минимальном увеличении сопротивления по сравнению с эквивалентными ей проволочными турбулизаторами. Коэффициент полноты мидель-шпангоута равнялся $\beta = 0,785$, коэффициент общей полноты $\delta = 0,673$.

В работе [13] авторы описали особенности и методику проведения модельных экспериментов для определения относительного вертикального перемещения тела h_m/h (где h_m – отклонение модели от первоначально заданного заглубления h) под воздействием подъемной силы F_z и угла дифферента модели γ . Выполнена оценка сопоставления полученных результатов с данными известных исследований.

Схема проведения эксперимента показана на рис. 2. Ранее проведенные тестовые прогоны показали, что с учетом габаритов модели погруженного тела оптимальной величиной первоначально заданного заглубления является значение $h = 1,45D$. Относительная скорость движения составила

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gL}} = 0,3 - 0,72,$$

где u – скорость движения, g – ускорение свободного падения.

Численное моделирование движения тела в приповерхностной водной среде осуществлялось с помощью математической модели, разработанной авторами в ПК ANSYS 9 R2 Academic Research и подробно описанной в работе [14]. Для решения поставленных в исследовании задач модель была доработана. На поверхности погруженного тела в его носовой оконечности была смоделирована рубка крыловидной формы. По параметрам тело полностью повторяло модель, использованную в модельных экспериментах.

На рис. 3 показана дискретизация модели объекта в водной среде. Сетка накладывалась с учетом

Fig. 2. Top view of test setup (dimension in meters): 1 – starting line mark; 2 – acceleration distance mark; 3 – steady motion distance; 4 – model; 5 – displacement sensor; 6 – cell for recording model's vertical motions; 7 – watertight viewport

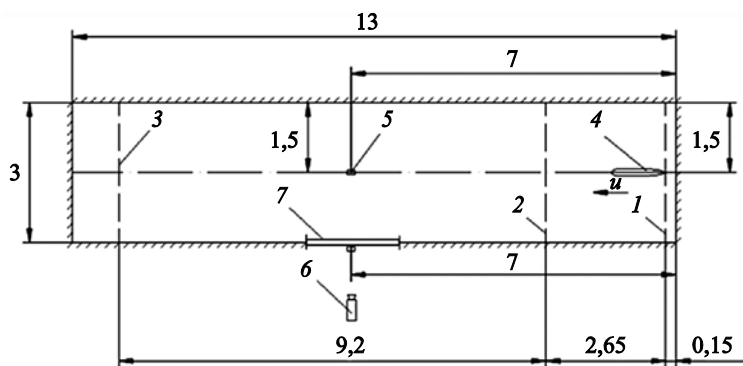


Рис. 2. Вид сверху схемы проведения эксперимента (размеры указаны в метрах): 1 – линия начала движения модели; 2 – линия окончания разгонного участка; 3 – линия окончания стационарного участка движения; 4 – модель; 5 – датчик перемещений; 6 – камера для регистрации вертикального перемещения модели; 7 – водонепроницаемое окно

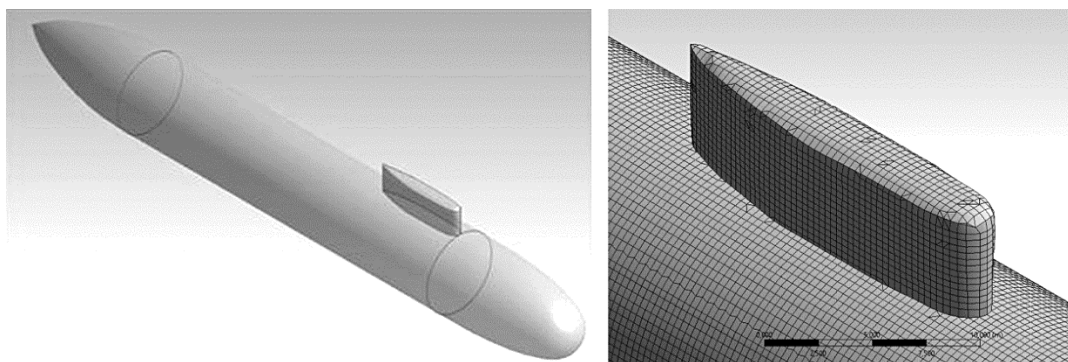


Рис. 3. Модель объекта в водной среде и дискретизация рубки и корпуса
Fig. 3. Model in water and discretization of sail and hull

пристеночных слоев, с использованием сеточной функции inflation, для улучшения обтекаемости объекта в потоке. Построение сетки осуществлялось алгоритмом CutCell. Модель расчетной области состояла из ячеек в форме гексаэдра.

Расчеты выполнялись в стационарном решателе stationary с применением моделей Volume of Fluid и $k-\epsilon$ – модели турбулентности. На рис. 4 (см. вклейку) представлены граничные условия модели движения тела. Нижняя зона расчетной области, характеризующая дно, имела тип wall. Скорость тела задавалась при помощи расхода воды Mass-flow-inlet. В верхней части модели находилась воздушная среда, в нижней части – водная среда, каждой из которых задавались соответствующие свойства: плотность и вязкость.

Численная модель полностью повторяла параметры модельного эксперимента после пересчета на натуру. Предложенный алгоритм позволял моделировать волнообразование на свободной поверхности жидкости от движения погруженного тела, а также определять давление P , полное сопротивление $R_t = R_v + R_p$ (где R_v – сопротивление трения, R_p – остаточное сопротивление), величину подъемной силы F_z и гидродинамический момент M_y .

На основе полученных значений строилась зависимость вертикальной составляющей распределения давления вдоль нижней поверхности погруженного тела в виде коэффициента $C_p = \frac{P - P_\infty}{0,5\rho u^2}$

(где ρ – плотность жидкости), зависимость коэффициента полного сопротивления $C_T = \frac{R_T}{0,5\rho u^2 S}$, ко-

эффициента подъемной силы $C_F = \frac{F_z}{0,5\rho u^2 S}$ и ко-

эффициента гидродинамического момента

$$C_M = \frac{M_y}{0,5\rho u^2 SL}$$

При определении F_z за положительные значения принималась сила, направленная вертикально вверх и притягивающая погруженное тело к свободной поверхности жидкости, а за отрицательные значения – сила, отталкивающая тело вниз. За положительные значения M_y принимался момент, вызывающий дифферент судна на корму, а за отрицательные – момент, вызывающий дифферент на нос.

Основные результаты модельных и численных экспериментов

Main results of model tests and numerical simulations

Для оценки влияния на характер движения погруженного тела рубки крыловидной формы, расположенной в носовой оконечности (модель № 1.1), полученные данные сравнивались с результатами, опубликованными ранее авторами в работе [15] для аналогичного по форме корпуса и параметрами тела, не имеющего выступающих частей (модель № 1.2).

Численное моделирование показало, что рост относительной скорости движения погруженного тела приводил к изменению поля давления вокруг него, соответственно менялся и характер волнообразования на свободной поверхности воды. Наличие рубки оказывало влияние на значения вертикальной составляющей распределения давления P вдоль нижней поверхности тела, особенно это проявлялось в месте расположения рубки (рис. 5, см. вклейку). Сопоставление экспериментальных и теоретических профилей гравитационных волн также показало вли-

яние выступающей части на относительную высоту волн $H^* = H/L$ (H – высота волны). С ростом числа Fr происходило смещение положения максимума впадины гравитационной волны относительно погруженного тела, которая достигала мидель-шпангоута при $Fr \approx 0,39$, смещаясь за кормовую оконечность при $Fr > 0,62$ из-за смещения области пониженного давления в корму (рис. 5в).

Наличие рубки приводило к скачкообразному изменению области давления в месте ее расположения на модели № 1.1 по сравнению с моделью № 1.2 (рис. 6, см. вклейку). С увеличением относительной скорости движения скачок давления на переднем срезе рубки значительно возрастал.

Составляющая R_V сопротивления тела увеличивалась примерно на 4 %. Отметим, что схожие результаты были получены в работе [16], в которой увеличение площади смоченной поверхности тела на 4,3 % (в исследовании авторов на 3,3 %) за счет моделирования рубки и рулей в корме приводило к росту R_V примерно на 6 % по сравнению с корпусом, не имеющим выступающих частей. Значения полного сопротивления R_T возрастали в среднем на 12 %, что несколько меньше, чем результаты авторов работы [16], где рост R_T составил в среднем 16 %. На рис. 7 (см. вклейку) показано сопоставление зависимостей коэффициента C_T для обеих моделей.

На рис. 8 (см. вклейку) показаны сопоставления относительной величины вертикального перемещения моделей h_m/h , возникающего под воздействием подъемной силы F_Z , полученные в ходе проведения модельных экспериментов. Случай $h_m/h = 0$ соответствовал первоначально заданной величине заглупления. Кривые сравнивались с теоретическими зависимостями коэффициента C_F . Предварительные расчеты показали, что при малой скорости движения тела $u \rightarrow 0$, значения C_F стремились к ненулевому значению C_{F0} , что согласуется с результатами работы [17] для движения сферы в жидкости вблизи свободной поверхности воды или под слоем битого льда.

При этом проведенные авторами эксперименты показали, что при малой скорости движения моделей величина h_m практически не изменялась относительно значения h , поэтому при сопоставлении зависимостей h_m/h брались кривые C_F за вычетом значения C_{F0} (рис. 9, см. вклейку).

Полученные кривые имели сложный характер. При $Fr > 0,3$ для моделей наблюдался первый локальный максимум значений h_m/h и $C_F - C_{F0}$. Далее в результате интерференции и трансформации гравитационных волн F_Z уменьшалась и фиксировался

локальный минимум значений. При $Fr > 0,33$ F_Z вновь начинала возрастать, достигая максимального значения при $Fr \approx 0,4$. Из зависимостей видно, что модель № 1.1 слабее притягивалась к поверхности воды, чем модель № 1.2, что, очевидно, связано с появлением значительной области переменного давления в районе расположения рубки.

Однако при движении с относительной скоростью $Fr > 0,42$ подъемная сила оказывала большее воздействие на модель № 1.1 (рис. 9), в результате чего она сильнее отталкивалась от поверхности воды (рис. 8). Относительное перемещение h_m/h , как и значения $C_F - C_{F0}$, возрастали по сравнению с моделью № 1.2. Значение h_m становилось равным h для модели № 1.1 при $Fr \approx 0,51$, для модели № 1.2 – при $Fr \approx 0,54$. Последующее увеличение относительной скорости движения приводило к большей разнице между значениями h_m/h и $C_F - C_{F0}$. Стоит отметить, что кривые, показанные на рис. 8–9, полностью совпадали как по характеру, так и по расположению локальных пиков.

Также в ходе проведения экспериментов при движении модели наблюдался дифферент, возникший от воздействия гидродинамического момента, угол γ которого менялся в зависимости от числа Fr (рис. 10, см. вклейку). Для модели № 1.2 в диапазоне $0,3 < Fr < 0,39$ фиксировался дифферент на корму. При $Fr > 0,39$ модель двигалась с дифферентом на нос. Максимальные значения γ фиксировались при $Fr \approx 0,51$.

Наличие рубки у модели № 1.1 приводило к росту угла γ (рис. 10) по сравнению с моделью № 1.2. Дифферент на корму модель № 1.1 приобретала при $Fr = 0,33$ – $0,36$. При всех остальных значениях Fr модель испытывала дифферент на нос. Максимальные значения угла γ приобретал также при $Fr = 0,51$. В целом зависимости полностью повторяли характер друг друга с незначительным ростом значений γ у модели № 1.1.

Существенной разницы между теоретическими значениями C_M для обеих моделей не наблюдалось. Лишь в диапазоне $0,39 < Fr < 0,54$ (рис. 11, см. вклейку) величина коэффициента гидродинамического момента для модели № 1.1 была чуть выше, чем у модели № 1.2, что в целом хорошо согласуется с результатами рис. 10.

При движении с относительной скоростью $Fr > 0,6$ значения C_M практически не отличались. Максимум коэффициента C_M для обеих моделей фиксировался $Fr = 0,48$, что несколько меньше значения максимума угла дифферента γ , фиксировавшегося при $Fr = 0,51$.

Заключение

Conclusion

Предложена численная модель, разработанная на базе ПК ANSYS 19 R2 Academic Research, которая позволяет определять величину сил и гидродинамического момента, действующих на погруженное тело, имеющее выступающую часть в виде рубки крыловидной формы в носовой оконечности при его движении вблизи свободной поверхности воды с различной скоростью.

Впервые экспериментально измерена величина вертикального перемещения погруженного тела с рубкой под воздействием подъемной силы, определены значения угла дифферента модели тела.

Путем сопоставления данных, полученных в ходе численного моделирования, с ранее опубликованными авторами результатами для аналогичной модели тела без выступающих частей показано влияние рубки на исследуемые параметры. Установлено, что наличие рубки крыловидной формы приводило к резкому изменению области давления в месте ее расположения на модели № 1.1, в результате чего сопротивление трения R_V возрастало на 4 %, а значения полного сопротивления R_T возрастали в среднем на 12 %. Также наблюдался рост F_Z , в результате чего модель № 1.1 сильнее отталкивалась от поверхности воды при $Fr > 0,39$, чем модель № 1.2. Существенного влияния наличия рубки на угол дифферента модели и значения гидродинамического момента обнаружено не было.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00118).

Список использованной литературы

1. *Kormilitzin Y., Khalizev O.* Theory of submarine design. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State Maritime Technical University, 2001. 335 p.
2. *Weinblum G., Amtsberg H., Bock W.* Tests on wave resistance of immersed bodies of revolution. Washington: The David W. Taylor Model Basin, 1950. 25 p.
3. *Doctors L., Beck R.* Convergence Properties of the Neumann-Kelvin problem for a submerged body // *Journal of Ship Research.* 1987. Vol. 31. P. 227–234. DOI: 10.5957/jsr.1987.31.4.227.
4. *Crook T.P.* An Initial Assessment of Free Surface Effects on Submerged Bodies: thesis / *Thomas P. Crook*; Naval Postgraduate School. Monterey, 1994. VI, 102 p.
5. *Gourlay T., Dawson E.* A Havelock source panel method for near-surface submarines // *Journal of Marine Science and Application.* 2015. Vol. 14. P. 215–224. DOI: 10.1007/s11804-015-1319-5.
6. *Shariati S., Mousavizadegan H.* The effect of appendages on the hydrodynamic characteristics of an underwater vehicle near the free surface // *Applied Ocean Research.* 2017. Vol. 67. P. 31–43. DOI: 10.1016/j.apor.2017.07.001.
7. *Bai T.C., Xu J., Wang G.D.* Analysis of resistance and flow field of submarine sailing near the ice surface // *Chinese Journal of Ship Research.* 2021. Vol. 16(2). P. 36–48.
8. *Liu T.-L., Guo Z.-M.* Analysis of wave spectrum for submerged bodies moving near the free surface // *Ocean Engineering.* 2013. Vol. 58. P. 239–251. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2012.10.003.
9. *Carrica P., Kim Y., Martin J.* Near-surface self propulsion of a generic submarine in calm water and waves // *Ocean Engineering.* 2019. Vol. 183. P. 87–105. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.04.082.
10. *Submarine hydrodynamics for off-design conditions / S. Toxopeus, M. Kerkvliet, R. Vogels [et al.]* // *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy.* 2022. Vol. 8. P. 499–511. DOI: 10.1007/s40722-022-00261-y.
11. *Земляк В.Л., Козин В.М.* Ледовый бассейн лаборатории ледотехники // *Вестник Приамурского гос. ун-та им. Шолом-Алейхема.* 2021. № 1(42). С. 19–31. DOI: 10.24412/2227-1384-2021-142-19-31.
12. *Hama F.R., Long J.D., Hegarty J.C.* On Transition from Laminar to Turbulent Flow // *Journal of Applied Physics.* 1957. Vol. 28. P. 388–394. DOI: 10.1063/1.1722760.
13. *Земляк В.Л., Козин В.М., Васильев А.С.* Влияние формы погруженного тела на характер его движения вблизи свободной поверхности жидкости // *Труды Крыловского государственного научного центра.* 2021. № 4(398). С. 35–42. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-4-398-35-42.
14. *Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М.* Движение погруженного тела вблизи свободной поверхности жидкости // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета.* 2020. № 4(45). С. 16–25. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-4-2.
15. *Движение погруженного тела в приповерхностной водной среде при малой глубине дна / В.Л. Земляк, А.С. Васильев, В.М. Козин, С.А. Чингалаев* // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета.* 2022. № 4(53). С. 13–22. DOI: 10.24866/2227-6858/2022-4/13-22.
16. *Shariati S., Mousavizadegan S.* The effect of appendages on the hydrodynamic characteristics of an underwater vehicle near the free surface // *Applied Ocean Research* 2017. Vol. 67. P. 31–43. DOI: 10.1016/j.apor.2017.07.001.
17. *Sturova I.* Unsteady three-dimensional sources in deep water with an elastic cover and their applications //

Journal Fluid Mechanics 2013. Vol. 730. P. 392–418.
DOI: 10.1017/jfm.2013.303.

References

1. *Kormilitsin Y., Khalizev O.* Theory of submarine design. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State Maritime Technical University, 2001. 335 p.
2. *Weinblum G., Amtsberg H., Bock W.* Tests on wave resistance of immersed bodies of revolution. Washington: The David W. Taylor Model Basin, 1950. 25 p.
3. *Doctors L., Beck R.* Convergence Properties of the Neumann-Kelvin problem for a submerged body // Journal of Ship Research. 1987. Vol. 31. P. 227–234. DOI: 10.5957/jsr.1987.31.4.227.
4. *Crook T.P.* An Initial Assessment of Free Surface Effects on Submerged Bodies: thesis / *Thomas P. Crook*; Naval Postgraduate School. Monterey, 1994. VI, 102 p.
5. *Gourlay T., Dawson E.* A Havelock source panel method for near-surface submarines // Journal of Marine Science and Application. 2015. Vol. 14. P. 215–224. DOI: 10.1007/s11804-015-1319-5.
6. *Shariati S., Mousavizadegan H.* The effect of appendages on the hydrodynamic characteristics of an underwater vehicle near the free surface // Applied Ocean Research. 2017. Vol. 67. P. 31–43. DOI: 10.1016/j.apor.2017.07.001.
7. *Bai T.C., Xu J., Wang G.D.* Analysis of resistance and flow field of submarine sailing near the ice surface // Chinese Journal of Ship Research. 2021. Vol. 16(2). P. 36–48.
8. *Liu T.-L., Guo Z.-M.* Analysis of wave spectrum for submerged bodies moving near the free surface // Ocean Engineering. 2013. Vol. 58. P. 239–251. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2012.10.003.
9. *Carrica P., Kim Y., Martin J.* Near-surface self propulsion of a generic submarine in calm water and waves // Ocean Engineering. 2019. Vol. 183. P. 87–105. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.04.082.
10. Submarine hydrodynamics for off-design conditions / *S. Toxopeus, M. Kerkvliet, R. Vogels* [et al.] // Journal of Ocean Engineering and Marine Energy. 2022. Vol. 8. P. 499–511. DOI: 10.1007/s40722-022-00261-y.
11. *Zemlyak V.L., Kozin V.M.* Ice basin of ice engineering laboratory // Herald of Sholom-Aleichem Priamursky State University. 2021. No. 1(42). P. 19–31. DOI: 10.24412/2227-1384-2021-142-19-31 (in Russian).
12. *Hama F.R., Long J.D., Hegarty J.C.* On Transition from Laminar to Turbulent Flow // Journal of Applied Physics. 1957. Vol. 28. P. 388–394. DOI: 10.1063/1.1722760.
13. *Zemlyak V.L., Kozin V.M., Vasiliev A.S.* Influence of a submerged body shape on the type of motion near free water surface // Transactions of KSRC. 2021. Vol. 4(398). P. 35–42. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-4-398-35-42 (in Russian).
14. *Zemlyak V.L., Vasiliev A.S., Kozin V.M.* Motion of a submerged body near free water surface // The School of Engineering Herald, Far Eastern Federal University. 2020. No. 4(45). P. 16–25. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-4-2 (in Russian).
15. Motion of a submerged body near surface in shallow water / *V.L. Zemlyak, A.S. Vasiliev, V.M. Kozin, S.A. Chingalaev* // The School of Engineering Herald, Far Eastern Federal University. 2022. No. 4(53). P. 13–22. DOI: 10.24866/2227-6858/2022-4/13-22 (in Russian).
16. *Shariati S., Mousavizadegan S.* The effect of appendages on the hydrodynamic characteristics of an underwater vehicle near the free surface // Applied Ocean Research 2017. Vol. 67. P. 31–43. DOI: 10.1016/j.apor.2017.07.001.
17. *Sturova I.* Unsteady three-dimensional sources in deep water with an elastic cover and their applications // Journal Fluid Mechanics 2013. Vol. 730. P. 392–418. DOI: 10.1017/jfm.2013.303.

Сведения об авторах

Земляк Виталий Леонидович, к.ф.-м.н., доцент, заведующий лабораторией ледотехники ФГБОУ ВО Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема. Адрес: 679015, Россия, Еврейская автономная область, Биробиджан, Широкая ул., д. 70а. E-mail: vellkom@list.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3218-5738>.

Козин Виктор Михайлович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий ФГБУН Институт машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН. Адрес: 681005, Россия, Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, д. 1. E-mail: kozinvictor@rambler.ru <https://orcid.org/0000-0002-2673-469X>.

Васильев Алексей Сергеевич, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой технических дисциплин ФГБОУ ВО Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема. Адрес: 679015, Россия, Еврейская автономная область, Биробиджан, ул. Широкая, д. 70а. E-mail: vasil-grunt@mail.ru.

Некозырева Ксения Сергеевна, начальник управления научно-исследовательской и инновационной деятельности ФГБОУ ВО Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема. Адрес: 679015, Россия, Еврейская автономная область, Биробиджан, ул. Широкая, д. 70а. E-mail: nekozyreva_ks_94_25@mail.ru.

About the authors

Vitaly L. Zemlyak, Dr. Sci. (Phys.&Math.), Associate Professor, Head of Ice Technology Laboratory of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sholom-Aleihem Amur State University”. Address: 70a, Shirokaya st., Birobidzhan, Jewish Autonomous Region, Russia, post code 679015. E-mail: vellkom@list.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3218-5738>.

Viktor M. Kozin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Materials Creation and Processing Laboratory of the Federal Publicly Funded Institution of Science, Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy of the Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. Address: 1, Metallurgov st., Komsomolsk-on-Amur, Russia, post code 681005. E-mail:

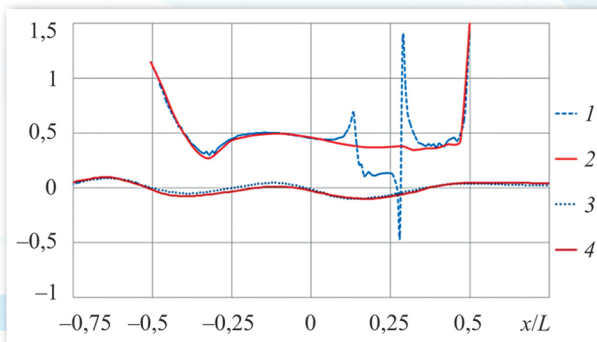
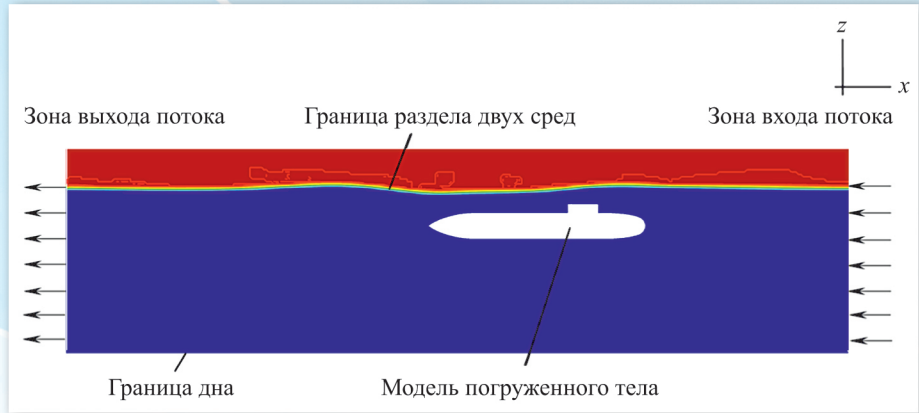
kozinvictor@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2673-469X>.

Aleksey S. Vasiliev, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Technical Disciplines Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sholom-Aleihem Amur State University”. Address: 70a, Shirokaya st., Birobidzhan, Jewish Autonomous Region, Russia, post code 679015. E-mail: vasil-grunt@mail.ru.

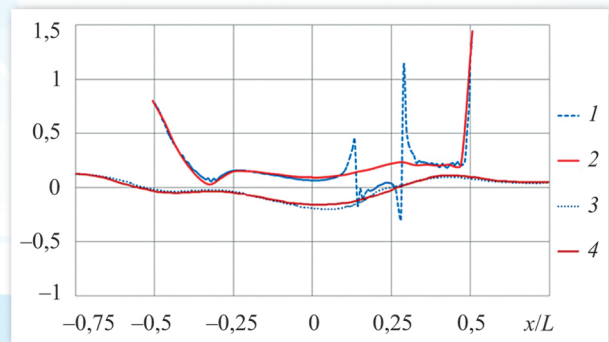
Kseniya S. Nekozyreva, Head of R&D and Innovation Directorate of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sholom-Aleihem Amur State University”. Address: 70a, Shirokaya st., Birobidzhan, Jewish Autonomous Region, Russia, post code 679015. E-mail: nekozyreva_ks_94_25@mail.ru.

Поступила / Received: 04.09.23
Принята в печать / Accepted: 30.11.23
© Коллектив авторов, 2023

Рис. 4. Граничные условия модели
Fig. 4. Boundary conditions of the model



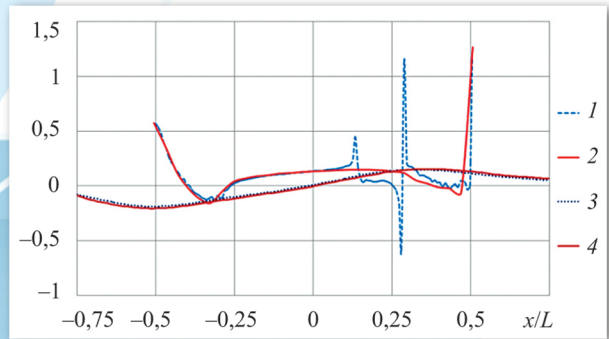
а)



б)

Рис. 5. Сопоставление между теоретическими значениями C_p и H^* моделей № 1.1 и № 1.2 для различных значений чисел Fr: а) Fr = 0,3; б) Fr = 0,39; в) Fr = 0,62; 1 - $C_{p1.1}$; 2 - $C_{p1.2}$ [15]; 3 - $10H^*_{1.1}$; 4 - $10H^*_{1.2}$ [15]

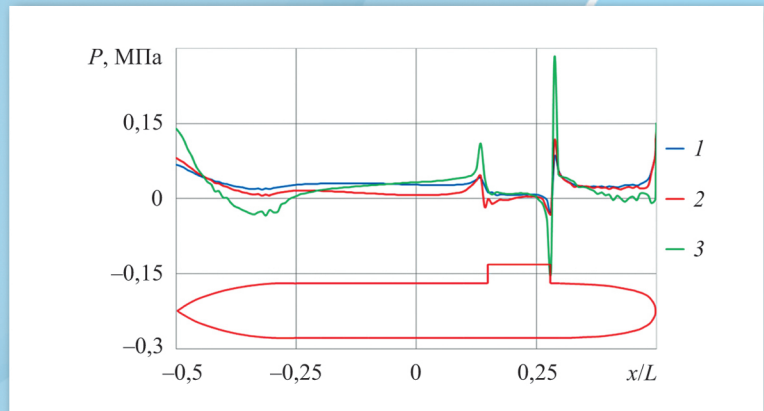
Fig. 5. Comparison between theoretical values of C_p and H^* for models No. 1.1 and No. 1.2 at different Fr numbers: а) Fr = 0.3; б) Fr = 0.39; в) Fr = 0.62; 1 - $C_{p1.1}$; 2 - $C_{p1.2}$ [15]; 3 - $10H^*_{1.1}$; 4 - $10H^*_{1.2}$ [15]



в)

Рис. 6. Характер изменения давления P для различных значений Fr относительно корпуса модели № 1.1: 1 - Fr = 0,3; 2 - Fr = 0,39; 3 - Fr = 0,62

Fig. 6. Character of pressure P variations for different Fr numbers with reference to model hull No. 1.1: 1 - Fr = 0.3; 2 - Fr = 0.39; 3 - Fr = 0.62



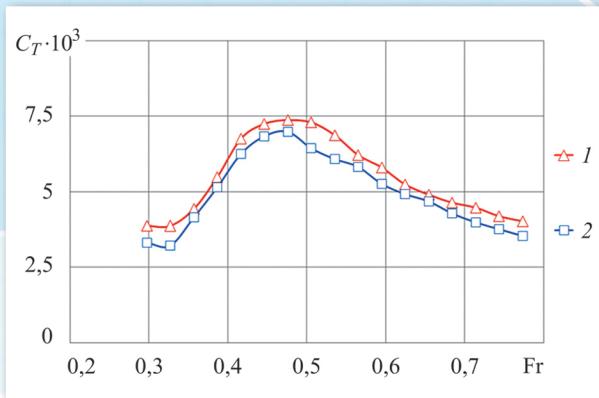


Рис. 7. Теоретические зависимости C_T от Fr:
1 – модель № 1.1; 2 – модель № 1.2

Fig. 7. Theoretical relations of C_T versus Fr:
1 – model No. 1.1; 2 – model No. 1.2

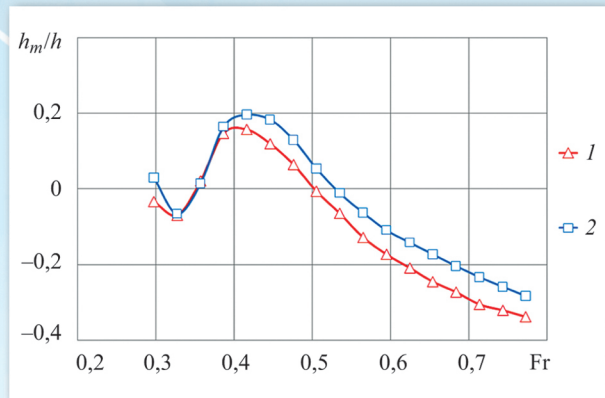


Рис. 8. Экспериментальные зависимости h_m/h от Fr:
1 – модель № 1.1; 2 – модель № 1.2 [15]

Fig. 8. Experimental relations of h_m/h versus Fr:
1 – Model No. 1.1; 2 – model No. 1.2 [15]

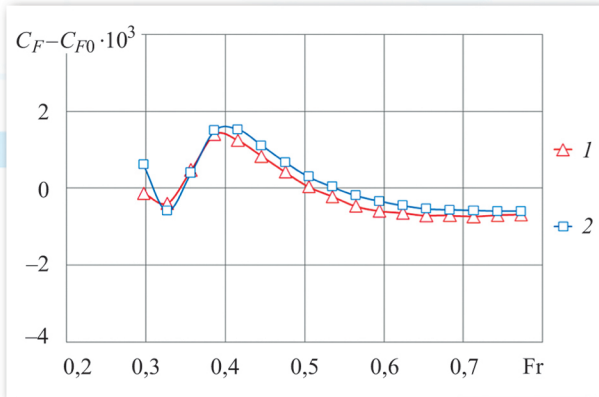


Рис. 9. Теоретические зависимости $C_F - C_{F0}$ от Fr:
1 – модель № 1.1; 2 – модель № 1.2 [15]

Fig. 9. Theoretical relations of $C_F - C_{F0}$ versus Fr:
1 – Model No. 1.1; 2 – model No. 1.2 [15]

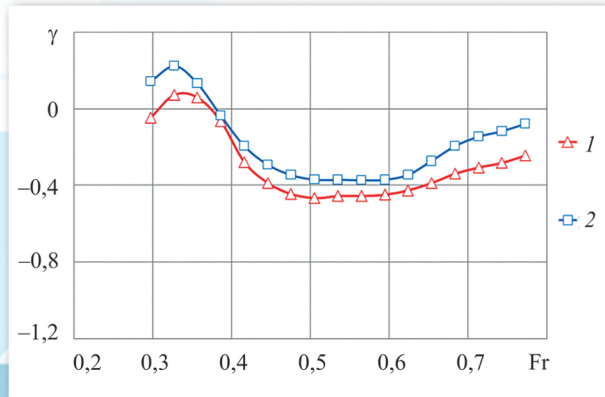


Рис. 10. Экспериментальные зависимости γ от Fr:
1 – модель № 1.1; 2 – модель № 1.2

Fig. 10. Experimental relations of γ versus Fr:
1 – Model No. 1.1; 2 – model No. 1.2

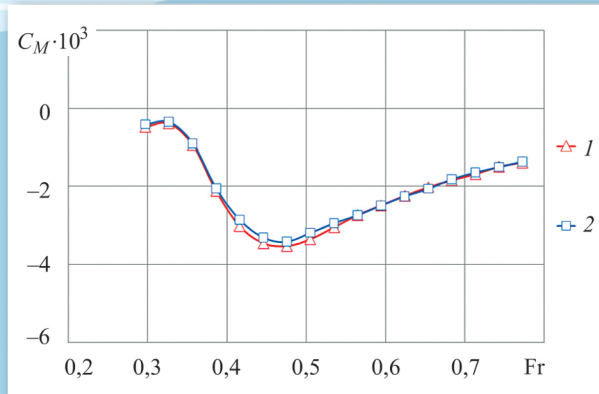


Рис. 11. Теоретические зависимости C_M от Fr:
1 – модель № 1.1; 2 – модель № 1.2 [15]

Fig. 11. Theoretical relations of C_M versus Fr:
1 – Model No. 1.1; 2 – model No. 1.2 [15]