

Научная статья
 УДК 532.3; 532.5; 629.585
<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-1/3-13>

Влияние выступающих частей на гидродинамические характеристики и движение погруженного тела при малом заглублении

Виталий Леонидович Земляк^{1✉}, Алексей Сергеевич Васильев¹, Сергей Алексеевич Чингалаев¹, Виктор Михайлович Козин²

¹ Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан, Россия

² Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре, Россия

✉ vellkom@list.ru

Аннотация. Современные автономные подводные аппараты имеют сложную форму корпуса с расположенными на поверхности надстройками, рулями и другими элементами. В исследовании проведен экспериментально-теоретический анализ влияния выступающих частей в виде расположенной в носовой оконечности надстройки крыловидной формы, горизонтальных и вертикальных кормовых рулей на характер движения тела в приповерхностной водной среде и его гидродинамические характеристики. Впервые экспериментально на базе опытового бассейна получены зависимости относительного вертикального перемещения тела, возникающего под воздействием подъемной силы, и определены углы дифферента модели для различных значений чисел Fr. С помощью предложенной численной модели рассчитаны поля давления, формирующиеся вокруг тела при его движении, установлен характер волнообразования на поверхности воды, получены зависимости коэффициентов подъемной силы и гидродинамического момента. Выполнено сопоставление полученных результатов с данными для аналогичной модели тела без выступающих частей. Установлено, что при движении модели с более сложной архитектурой корпуса подъемная сила и соответственно вертикальное перемещение тела возрастали. Также наблюдался существенный рост значений гидродинамического момента и соответственно углов дифферента модели, что, очевидно, связано с ростом площади смоченной поверхности.

Ключевые слова: погруженное тело, свободная поверхность воды, вертикальное перемещение, подъемная сила, гидродинамический момент

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

Для цитирования: Земляк В.Л., Васильев А.С., Чингалаев С.А., Козин В.М. Влияние выступающих частей на гидродинамические характеристики и движение погруженного тела при малом заглублении // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 1(58). С. 3–13.

Original article

The effect of appendages on the hydrodynamic characteristics and movement of a submerged body at shallow depth

Vitaliy L. Zemlyak^{1✉}, Alexey S. Vasilyev¹, Sergey A. Chingalaev¹, Victor M. Kozin²

¹ Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russia

² Institute of Machine Science and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russia

✉ vellkom@list.ru

Abstract. Modern autonomous underwater vehicles have a complex hull shape with superstructures, rudders and other elements located on the surface. The study carried out an experimental and theoretical analysis of

the influence of protruding parts in the form of a wing-shaped superstructure located at the bow end, horizontal and vertical stern rudders on the nature of body movement in the near-surface water environment and its hydrodynamic characteristics. For the first time, the dependences of the relative vertical displacement of a body arising under the influence of a lifting force were obtained experimentally on the basis of an experimental tank, and the trim angles of the model were determined for various values of Fr numbers. Using the proposed numerical model, the pressure fields that form around the body during its movement are calculated, the nature of wave formation on the water surface is established, and the dependences of the coefficients of lifting force and trimming moment are obtained. The results obtained were compared with data for a similar body model, without protruding parts. It was found that when a model with a more complex body architecture moved, the lifting force and, accordingly, the vertical movement of the body increased. There was also a significant increase in the values of the trimming moment and, accordingly, the trim angles of the model, which is obviously associated with an increase in the area of the wetted surface.

Keywords: submerged body, vertical displacement, lifting force, hydrodynamic moment, free surface

Funding: the research was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project no. 21-19-00118).

For citation: Zemlyak V.L., Vasilyev A.S., Chingalaev S.A., Kozin V.M. The effect of appendages on the hydrodynamic characteristics and movement of a submerged body at shallow depth. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 1(58), pp. 3–13. (In Russ.).

Введение

Известно, что оптимальной формой погруженного тела, обладающей низким сопротивлением при высоких скоростях движения, является эллипсоид вращения с относительным удлинением $L^* = L/D = 6,0$ (где L – длина, D – диаметр тела) [1]. Тем не менее такая форма для современных автономных подводных аппаратов (АПА) считается нецелесообразной. Это связано с необходимостью размещения в корпусе оборудования и отсеков с полезной нагрузкой, поэтому АПА обычно имеют цилиндрическую вставку значительной длины [2]. Наружный корпус также может иметь сложную геометрическую форму с расположенными на нем надстройками, кормовым оперением и рулями. Наличие выступающих частей вызвано необходимостью обеспечения маневренности АПА, размещения гидроакустических станций, устройств связи и другого оборудования, без которых нормальная эксплуатация аппарата невозможна [3]. Усложнение формы корпуса ведет к ухудшению обтекания, росту сопротивления и снижению скорости движения, особенно если АПА перемещается на малом заглублении. Тем не менее в теоретических работах погруженное тело обычно моделируется упрощенно, в виде тела вращения [4–6]. Для моделирования сложной геометрии и архитектуры корпуса АПА все чаще применяются методы вычислительной гидродинамики. Исследовано влияние носовой надстройки и кормового оперения на гидродинамические характеристики подводного аппарата, движущегося вблизи свободной поверхности на различном заглублении [7]. Проанализировано влияние выступающих частей на составляющие сопротивления и волнообразование. Показано, что более сложная геометрия тела приводит к увеличению полного сопротивления в основном из-за роста сопротивления трения при практически неизменном волновом сопротивлении и характере волнообразования. Проанализировано влияние выступающих частей на сопротивление и давление, возникающее вокруг тела при его движении в жидкости, покрытой ледяным покровом, различной толщины [8]. Проведен детальный анализ влияния на ходкость геометрически сложной формы корпуса АПА [9, 10].

Ранее авторами показано [11], что наличие на поверхности корпуса тела горизонтального и вертикального кормового оперения влияет не только на гидродинамические характеристики АПА, но и на характер его движения, то есть вертикальное перемещение и угол дифферента. Очевидно существенное влияние на исследуемые параметры и наличия носовой надстройки.

Цель работы – экспериментально-теоретическое исследование характера движения модели АПА с расположенной в носовой оконечности надстройкой крыловидной формы и

горизонтальными и вертикальными кормовыми рулями на малом заглублении вблизи свободной поверхности воды, а также оценка влияния выступающих частей на его гидродинамические характеристики.

Подготовка к проведению модельных и численных экспериментов

Для проведения модельных экспериментов использовался опытовый бассейн лаборатории ледотехники Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема (г. Биробиджан) [12]. Эксперименты проводились в феврале 2023 г. Длина бассейна составила $L_T = 11,6L$, ширина $B_T = 21,8D$, глубина $T_T = 7,3D$. Габариты чаши бассейна соответствовали требованиям, предъявляемым к подобным экспериментальным установкам [13] и размерам гидрлотков, на базе которых ранее проводились испытания погруженных тел в приповерхностной водной среде [5, 14].

Модель АПА представляла собой погруженное тело, по форме и параметрам полностью повторявшее собой модель, ранее использованную с расположенными в корме горизонтальными и вертикальными рулями [11]. В носовой части дополнительно была установлена надстройка крыловидной формы (рис. 1). Относительное удлинение тела составило $L^* = 8,4$ при $L = 1,154$ м. Для изготовления модели использовался метод послойной печати на принтере Raise3D с разрешением 0,01 мм. Наличие выступающих частей приводило к росту площади смоченной поверхности корпуса S на 8,5%. Также в носовой оконечности на расстоянии $0,05L$ от носового перпендикуляра были размещены турбулизаторы в виде полосы Нама [15] для моделирования турбулентного режима течения в пограничном слое. Коэффициент полноты мидель-шпангоута $\beta = 0,785$, коэффициент общей полноты тела $\delta = 0,674$.

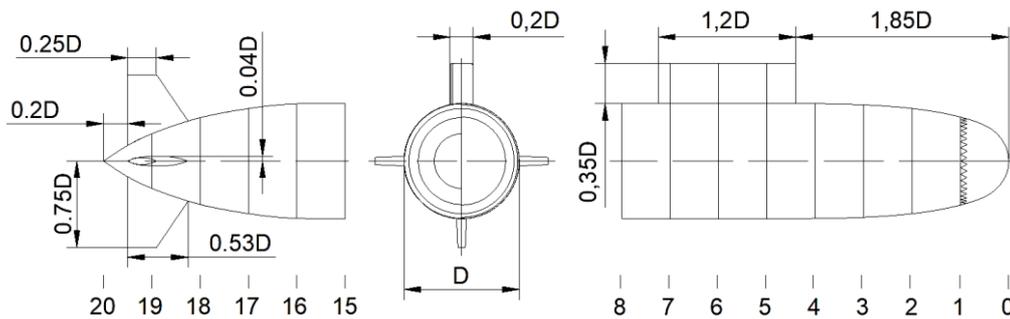


Рис. 1. Теоретический чертеж модели № 1.1 погруженного тела (здесь и далее иллюстрации В.Л. Земляка)

Fig. 1. Theoretical drawing of model No. 1.1 of an immersed body (hereinafter illustrations by V.L. Zemlyak)

Габариты чаши опытового бассейна позволили для буксировки модели АПА использовать тросовую буксировочную систему, которая в отличие от традиционных методов испытаний путем жесткого крепления модели погруженного тела через штангу или пилон к буксировочной тележке позволяет измерить вертикальное перемещение модели под воздействием подъемной силы F и возникающий от гидродинамического момента Мугол дифферента ψ .

В модель перед проведением испытаний укладывался твердый балласт, что обеспечивало ее нулевую плавучесть при заданном заглублении h . В процессе буксировки с заданной скоростью u под воздействием подъемной силы заглубление менялось на величину h_m и появлялся угол дифферента, которые измерялись графическим методом с помощью высокоскоростной видеокамеры машинного зрения VLXT-50M.I. Камера устанавливалась напротив водонепроницаемого окна, в месте стационарного участка движения модели, и осуществляла видеосъемку со скоростью до 163 кадров/с, фиксируя положение модели относительно свободной поверхности воды (рис. 2).

Предварительно проведенные испытания показали, что с учетом размеров модели погруженного тела и габаритов опытового бассейна оптимальной величиной заглубления будет

$h = 1,45D$, а относительная скорость движения $Fr = \frac{u}{\sqrt{gL}} = 0,3 - 0,72$ (где g – ускорение свободного падения).

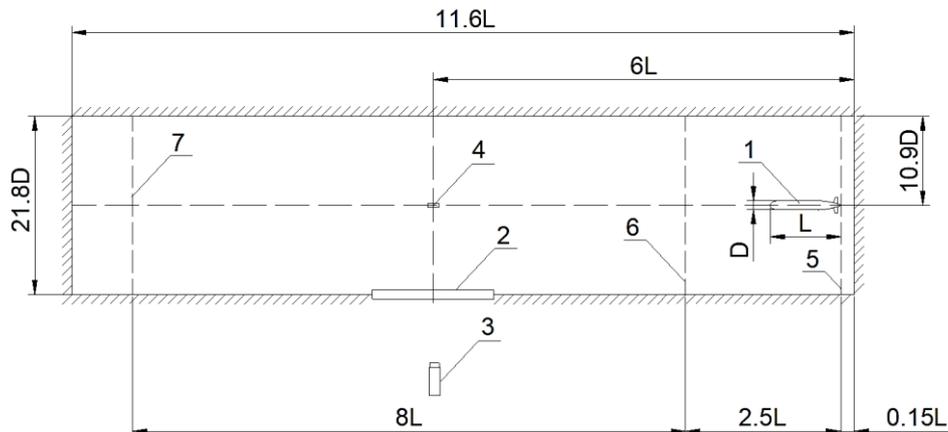


Рис. 2. Схема проведения эксперимента:

- 1) модель АПА; 2) водонепроницаемое окно; 3) камера для фиксации положения модели; 4) датчик перемещений; 5) линия начала движения модели; 6) линия окончания разгонного участка; 7) линия окончания стационарного участка движения (вид сверху)**

Fig. 2. Scheme of the experiment: 1) AUV model; 2) waterproof window; 3) camera for fixing the position of the model; 4) displacement sensor; 5) the line where the model begins to move; 6) end line of the acceleration section; 7) end line of a stationary section of traffic (top view)

Для проведения численного моделирования использовалась математическая модель, разработанная авторами в ПК ANSYS 19 R2 AcademicResearch. Расчеты выполняются в модуле ANSYSFluent, подробное описание численного алгоритма приведено авторами в работе [16], там же путем сопоставления данных численного моделирования с результатами модельных экспериментов выполнена оценка ее работоспособности. В верхней части расчетной области находилась воздушная среда, а под ней – водная среда, каждая имела соответствующие параметры – плотность и вязкость.

Для решения поставленных задач модель АПА была доработана: на поверхности в его кормовой оконечности были смоделированы вертикально и горизонтально расположенные рули, а в носу – надстройка крыловидной формы. По своим параметрам погруженное тело соответствовало модели АПА, использованной в экспериментах. Вода представляла собой жидкость плотностью $\rho = 998 \text{ кг/м}^3$ и динамической вязкостью $\mu = 1,03 \text{ МПа}\cdot\text{с}$.

Численная модель полностью повторяла параметры модельного эксперимента и габариты чаши опытового бассейна. Позволяла моделировать волнообразование на свободной поверхности жидкости и определять различные гидродинамические характеристики тела. На основе полученных данных строились зависимости коэффициентов: $C_p = \frac{P - P_\infty}{0,5\rho u^2}$ (где P – давление, ρ – плотность жидкости), $C_y = \frac{F}{0,5\rho u^2 S}$, $C_m = \frac{M}{0,5\rho u^2 SL}$. При определении подъемной силы за положительные значения принималась сила, притягивающая погруженное тело к свободной поверхности, а за отрицательные значения – сила, отталкивающая тело вниз. Положительные значения момента соответствовали дифференту тела на корму, а отрицательные – дифференту на нос.

Анализ полученных результатов модельных и численных экспериментов

Для оценки влияния на характер движения погруженного тела надстройки крыловидной формы, расположенной в носовой оконечности, и кормового оперения (модель № 1.1) полученные результаты сравнивались с данными для аналогичной по форме корпуса и параметрами модели тела, не имеющей на поверхности корпуса каких-либо выступающих частей (модель № 1.2) [16].

Численные эксперименты показали, что с ростом числа Fr вокруг погруженного тела происходило изменение поля давления, что соответственно меняло и характер волнообразования на свободной поверхности воды. Наличие выступающих частей приводило к скачкообразному изменению вертикальной составляющей распределения давления P в месте расположения надстройки и рулей (рис. 3). Кривые распределения коэффициента C_p строились в плоскости вдоль профиля вертикальных рулей погруженного тела. Значение по оси абсцисс на графиках, равное 0, соответствовало положению мидель-шпангоута модели, а 0,5 и -0,5 – положению носового и кормового перпендикуляров. С увеличением относительной скорости движения скачки давления значительно возрастали. Профили гравитационных волн также изменялись, особенно в местах расположения выступающих частей. С ростом числа Fr положение максимума впадины $H^* = H/L$ (H – высота волны) смещалось относительно погруженного тела, которая достигала мидель шпангоута при $Fr \approx 0,42$, смещаясь за кормовую оконечность при $Fr > 0,62$ из-за смещения области пониженного давления в корму (рис. 3).

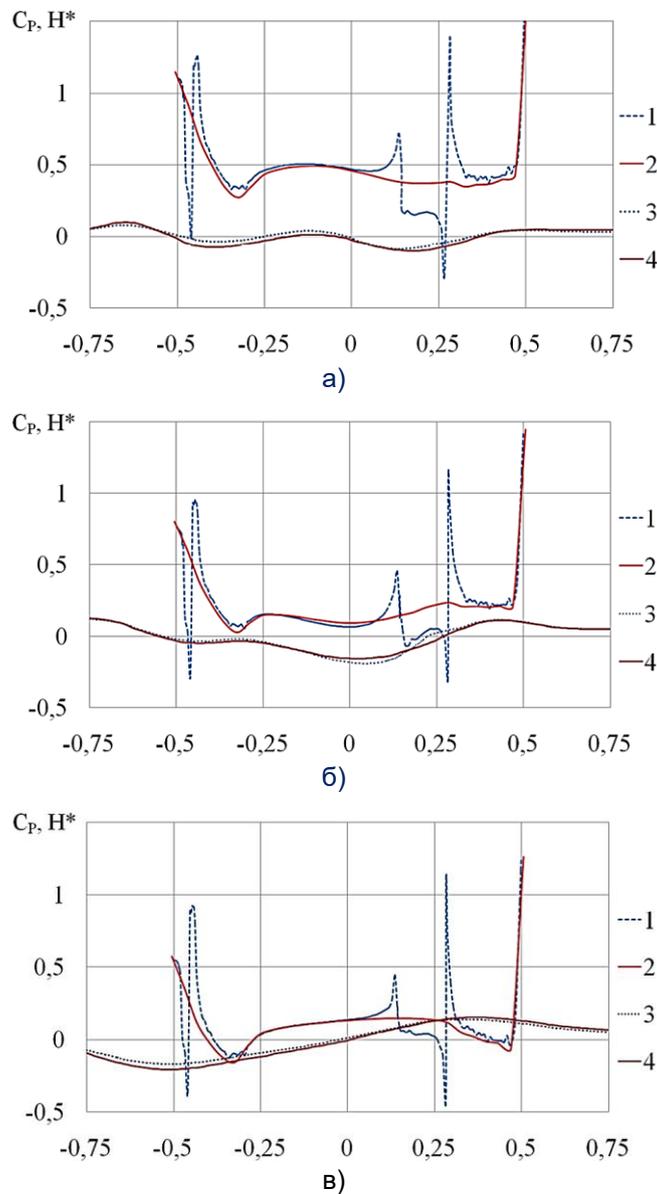


Рис. 3. Сопоставление теоретических значений C_p и H^* моделей № 1.1 и № 1.2 (а – $Fr = 0,3$; б – $Fr = 0,39$; в – $Fr = 0,62$):
1 – $C_{p1.1}$; 2 – $C_{p1.2}$ [16]; 3 – $10H_{1.1}^*$; 4 – $10H_{1.2}^*$ [16]
Fig. 3. Comparison of theoretical values of C_p and H^* of models No. 1.1 and No. 1.2
1 – $C_{p1.1}$; 2 – $C_{p1.2}$ [16]; 3 – $10H_{1.1}^*$; 4 – $10H_{1.2}^*$ [16]

С помощью численного моделирования установлено влияние выступающих частей на подъемную силу, действующую на тело при его движении с различной относительной скоростью. Известно [17], что при скорости движения $u \rightarrow 0$ значения коэффициента C_Y стремятся к ненулевому значению C_{Y0} . Проведенные авторами эксперименты показали, что для малых значений числа Fr величина вертикального отклонения модели h_m практически не изменялась относительно значения h , поэтому при сопоставлении зависимостей $\frac{h_m}{h}$ (рис. 4) со значениями коэффициента подъемной силы брались кривые C_Y за вычетом значения C_{Y0} (рис. 5). Полученные кривые имели сложный характер с двумя локальными максимумами, первый из которых наблюдался при $Fr = 0,3$. Модель № 1.1 отталкивалась от поверхности воды сильнее, чем модель № 1.2 (рис. 6а).

Далее за счет интерференции поверхностных волн подъемная сила уменьшалась и наблюдался локальный минимум значений, а заглубление увеличивалось (рис. 6б). При $Fr > 0,33$ F начинала вновь возрастать, достигая максимума при $Fr = 0,42$. Расстояние между поверхностью воды и моделями становилось минимальным (рис. 7в). Из полученных результатов видно, что модель № 1.1 в диапазоне относительных скоростей $0,33 < Fr < 0,39$ изменялась незначительно, но все-таки сильнее притягивалась к поверхности воды, чем модель № 1.2. Очевидно, что рост подъемной силы был связан с большей площадью смоченной поверхности корпуса у модели № 1.1. При $Fr > 0,39$ направление F вновь меняло знак, заглубление возрастало. Модель № 1.1 значительно сильнее отталкивалась от поверхности (см. рис. 5). Значение h_m становилось равным h для модели №1.1 при $Fr \approx 0,51$, для модели № 1.2 при $Fr \approx 0,53$ (рис. 6г). Дальнейшее увеличение числа Fr приводило к большей разнице между $C_Y - C_{Y0}$, заглубление модели № 1.1 возрастало (рис. 6д). Отметим, что кривые исследуемых зависимостей полностью совпадали по характеру и расположению локальных максимумов и минимумов значений.

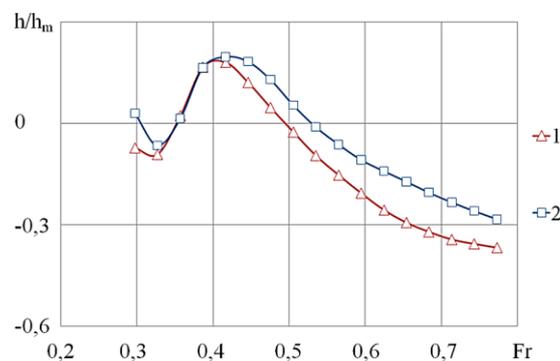


Рис. 4. Экспериментальные зависимости h_m/h от Fr : 1 – модель № 1.1; 2 – модель №1.2 [16]

Fig. 4. Experimental dependences of h_m/h on Fr : 1 – model No. 1.1; 2 – model No. 1.2 [16]

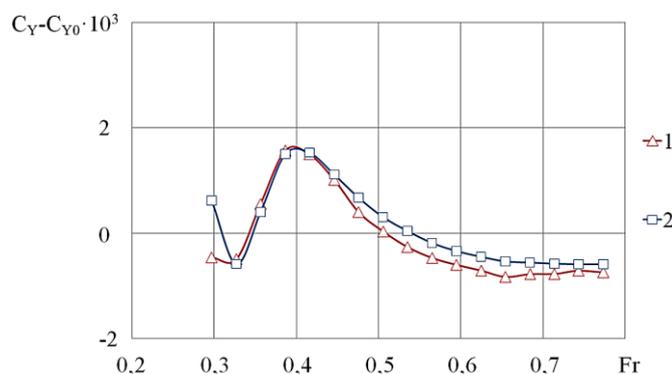


Рис. 5. Теоретические зависимости $C_Y - C_{Y0}$ от Fr : 1 – модель № 1.1; 2 – модель № 1.2

Fig. 5. Experimental dependences of $C_Y - C_{Y0}$ on Fr : 1 – model No. 1.1; 2 – model No. 1.2 [16]

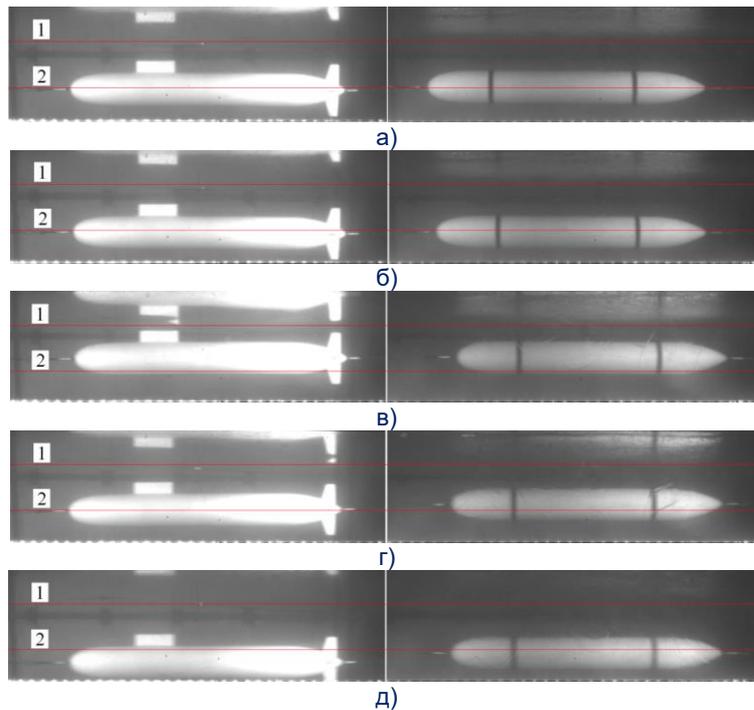


Рис. 6. Сопоставление визуализации изменения заглубления моделей № 1.1 и № 1.2 (а – $Fr = 0,3$; б – $Fr = 0,33$; в – $Fr = 0,42$; г – $Fr = 0,51$; д – $Fr = 0,66$): 1 – линия свободной поверхности воды; 2 – линия первоначально заданного заглубления модели $h = 1,45D$

Fig. 6. Comparison of visualization of changes in depth of models No. 1.1 and No. 1.2 (а – $Fr = 0,3$; б – $Fr = 0,33$; в – $Fr = 0,42$; г – $Fr = 0,51$; д – $Fr = 0,66$): 1 – line of free water surface; 2 – line of initially specified depth of the model $h = 1.45D$

Наличие выступающих частей оказало влияние и на величину гидродинамического момента. В диапазоне $0,3 < Fr < 0,39$ значения C_M для модели № 1.2 были выше, чем для модели № 1.1 (рис. 7), как и величина угла дифферента на нос ψ (рис. 8). С дальнейшим увеличением Fr возникал дифферент на корму, значения которого для модели № 1.1, как и величина коэффициента C_M , были значительно больше, особенно в диапазоне $0,39 < Fr < 6$. Максимальные значения C_M для модели № 1.1 наблюдались при $Fr \approx 0,45$, а для модели № 1.2 – при $Fr \approx 0,48$, максимум угла дифферента фиксировался соответственно при $Fr \approx 0,48$ и $Fr \approx 0,51$.

Отметим, что характер кривых коэффициента гидродинамического момента C_M (рис. 7) повторял характер зависимостей угла дифферента ψ для обеих моделей. Расчеты показали, что при движении моделей с относительной скоростью $Fr > 0,6$ значения коэффициента C_M мало различались, как и значения угла дифферента.

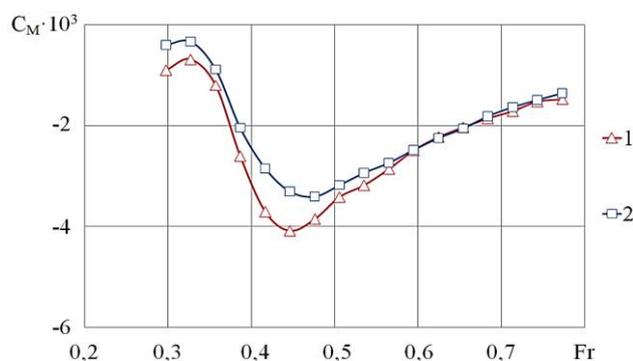
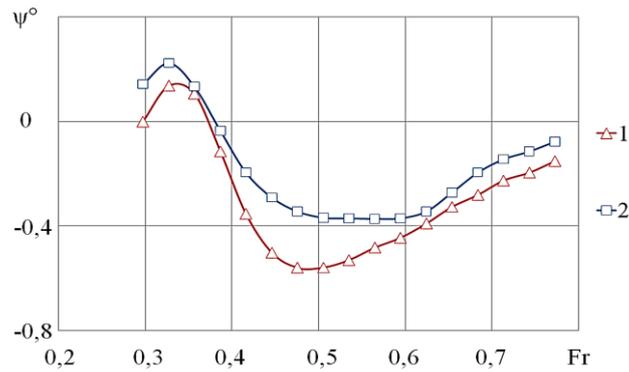


Рис. 7. Теоретические зависимости C_M от Fr : 1 – модель № 1.1; 2 – модель № 1.2 [16]

Fig. 7. Theoretical dependences of C_M on Fr : 1 – model No. 1.1; 2 – model No. 1.2 [16]



**Рис. 8. Экспериментальные зависимости ψ от Fr :
1 – модель № 1.1; 2 – модель № 1.2 [16]**

Fig. 8. Experimental dependences of ψ on Fr : 1 – model No. 1.1; 2 – model No. 1.2 [16]

Заклучение

Впервые выполнено экспериментальное исследование влияния носовой надстройки крыловидной формы и кормового оперения на параметры движения погруженного тела при малом заглублении. Построены зависимости относительного вертикального перемещения тела и углов дифферента от числа Fr .

На базе ПК ANSYS 19 R2 AcademicResearch разработана численная модель, позволяющая моделировать волнообразование на поверхности жидкости, определять значения подъемной силы и гидродинамического момента, действующих на погруженное тело заданной геометрической формы.

Путем сопоставления полученных данных с результатами движения аналогичной модели тела без выступающих частей показано, существенное влияние носовой надстройки и рулей на исследуемые параметры, наличие которых приводило к скачкообразному изменению вертикальной составляющей распределения давления P , в местах их расположения, что также влияло и на профиль генерируемых гравитационных волн. Установлено, что при движении модели с более сложной архитектурой корпуса подъемная сила и соответственно вертикальное перемещение тела возрастали, особенно при $Fr > 0,42$, когда F_z начинала отталкивать тело вниз от поверхности воды. Также наблюдался существенный рост значений гидродинамического момента и соответственно углов дифферента модели, что очевидно связано с ростом площади смоченной поверхности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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, 1950. 144 p. URL: <https://books.google.ru/books?id=8qPpAAAAMAAJ> (дата обращения: 21.09.2023).
2. Burcher R., Rydill L. Concepts in submarine design. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 1994. 314 p. URL: <https://archive.org/details/conceptsinsubmar0000burc/page/310/mode/2up> (дата обращения: 21.09.2023).
3. Kormilitsin Y., Khalizev O. Theory of submarine design. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State Maritime Technical University, 2001. 335 p. URL: <https://ru.scribd.com/doc/86467251/Theory-of-Submarine-Design> (дата обращения: 23.09.2023).
4. Коробкин А.А., Костиков В.К., Макаренко Н.И. Движение эллиптического цилиндра под ледовым покровом // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Математика, механика, информатика. 2012. Т. 12, № 4. С. 76–81. EDN: PUYMUX
5. Gourlay T., Dawson E. A Havelock source panel method for near-surface submarines // Journal of Marine Science and Application. 2015, vol. 14, pp. 215–224. <https://doi.org/10.1007/s11804-015-1319-5>

6. Pogorelova A.V., Zemlyak V.L., Kozin V.M. Effect of the viscoelasticity of an ice cover on wave resistance and lift force experienced by Joubert submarine // *Acta Mechanica*. 2023, vol. 234, pp. 2399–2411. <https://doi.org/10.1007/s00707-023-03500-x>
7. 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, pp. 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.07.001>
8. 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, pp. 36–48.
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, pp. 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.082>
10. Toxopeus S., Kerkvliet M., Vogels R., Quadvlieg F., Nienhuis B. Submarine hydrodynamics for off-design conditions // *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*. 2022, vol. 8, pp. 499–511. <https://doi.org/10.1007/s40722-022-00261-y>
11. Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М., Бабичева Е.Г. Влияние горизонтальных и вертикальных рулей на характер движения погруженного тела в приповерхностной водной среде // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2023. № 3(56). С. 3–14. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-3/3-14>
12. Земляк В.Л., Козин В.М. Ледовый бассейн лаборатории ледотехники // *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. 2021. № 1(42). С. 19–31. <https://doi.org/10.24412/2227-1384-2021-142-19-31>
13. Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов. Ленинград: Судостроение, 1988. 288 с.
14. Mackay M.A. A review of sting support interference and some related issues for the marine dynamic test facility (MDTF). Dartmouth: Defence Research Establishment Atlantic. 1993. 54 p. URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA271806 (дата обращения: 28.09.2023).
15. Nama F., Long J., Hegarty J. On Transition from Laminar to Turbulent Flow // *Journal of Applied Physics*. 1957, vol. 28, pp. 388–394. <https://doi.org/10.1063/1.1722760>
16. 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. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-2>
17. Sturova I.V. Unsteady three-dimensional sources in deep water with an elastic cover and their applications // *Journal Fluid Mechanics*. 2013, vol. 730, pp. 392–418. <https://doi.org/10.1017/jfm.2013.303>

REFERENCES

1. 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, 1950, 144 p. URL: <https://books.google.ru/books?id=8qPpAAAAMAAJ> (accessed: 21.09.2023).
2. Burcher R., Rydill L. Concepts in Submarine Design. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press, 1994, 314 p. URL: <https://archive.org/details/conceptsinsubmar0000burc/page/310/mode/2up> (accessed: September 21, 2023).
3. Kormilitsin Y., Khalizev O. Theory of submarine design. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State Maritime Technical University, 2001, 335 p. URL: <https://ru.scribd.com/doc/86467251/Theory-of-Submarine-Design> (accessed: September 23, 2023).
4. Korobkin A.A., Kostikov V.K., Makarenko N.I. The motion of elliptic cylinder under ice cover. *Vestnik Novosibirskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya Matematika, Mekhanika, Informatika*. 2012, vol. 12, iss. 4, pp. 76–81. (In Russ.).
5. Gourlay T., Dawson E. A Havelock source panel method for near-surface submarines. *Journal of Marine Science and Application*. 2015, vol. 14, pp. 215–224. <https://doi.org/10.1007/s11804-015-1319-5>
6. Pogorelova A.V., Zemlyak V.L., Kozin V.M. Effect of the viscoelasticity of an ice cover on wave resistance and lift force experienced by Joubert submarine. *Acta Mechanica*. 2023, vol. 234, pp. 2399–2411. <https://doi.org/10.1007/s00707-023-03500-x>
7. 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, pp. 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.07.001>

8. 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, pp. 36–48.
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, pp. 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.082>
10. Toxopeus S., Kerkvliet M., Vogels R., Quadvlieg F., Nienhuis B. Submarine hydrodynamics for off-design conditions. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*. 2022, vol. 8, pp. 499–511. <https://doi.org/10.1007/s40722-022-00261-y>
11. Zemlyak V., Vasilyev A., Kozin V., Babicheva E. Influence of horizontal and vertical rudders on the nature of the movement of a submerged body in a near-surface water environment. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023, no. 3(56), pp. 3–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-3/3-14>
12. Zemlyak V., Kozin V. Ice tank of Ice Technology Laboratory. *Sholom-Aleichem Priamursky state university bulletin*. 2021, no. 1(42), pp. 19–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2227-1384-2021-142-19-31>
13. Voitkunsky Ya.I. Resistance to the movement of ships. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1988. 288 p. (In Russ.).
14. Mackay M.A. A review of sting support interference and some related issues for the marine dynamic test facility (MDTF). Dartmouth, Defence Research Establishment Atlantic, 1993, 54 p. URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA271806 (accessed: September 28, 2023).
15. Hama F., Long J., Hegarty J. On transition from laminar to turbulent flow. *Journal of Applied Physics*. 1957, vol. 28, pp. 388–394. <https://doi.org/10.1063/1.1722760>
16. Zemlyak V., Vasilyev A., Kozin V. The movement of an submerged body near the free surface of a liquid. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2020, no. 4(45), pp. 16–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-2>
17. Sturova I.V. Unsteady three-dimensional sources in deep water with an elastic cover and their applications. *Journal Fluid Mechanics*. 2013, vol. 730, pp. 392–418. <https://doi.org/10.1017/jfm.2013.303>

Информация об авторах

Земляк Виталий Леонидович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра технических дисциплин, Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема (Биробиджан, Россия), vellkom@list.ru, SPIN-код: 9172-5202, <https://orcid.org/0000-0002-3218-5738>

Васильев Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, кафедра технических дисциплин, Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема (Биробиджан, Россия), vasil-grunt@mail.ru, SPIN-код: 3401-1530, <https://orcid.org/0000-0001-7783-0000>

Чингалаев Сергей Алексеевич – аспирант, кафедра технических дисциплин, Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема (Биробиджан, Россия), vellkom@list.ru, SPIN-код: 6675-3537

Козин Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий, Институт машиноведения и металлургии, Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН (Комсомольск-на-Амуре, Россия), vellkom@list.ru, SPIN-код: 1265-7970

Information about the authors

Vitaliy L. Zemlyak, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Technical Disciplines, Sholom-Aleichem Priamursky State University (Birobidzhan, Russia), vellkom@list.ru, SPIN: 9172-5202, <https://orcid.org/0000-0002-3218-5738>

Alexey S. Vasilyev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Technical Disciplines, Sholom-Aleichem Priamursky State University (Birobidzhan, Russia), vasil-grunt@mail.ru, SPIN: 3401-1530, <https://orcid.org/0000-0001-7783-0000>

Sergey A. Chingalae, Postgraduate Student, Department of Technical Disciplines, Sholom-Aleichem Priamursky State University (Birobidzhan, Russia), vellkom@list.ru, SPIN: 6675-3537

Victor M. Kozin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Researcher of the Laboratory for Problems of Creation and Processing of Materials and Products, Institute of Machine Science and Metallurgy, Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS (Komsomolsk-on-Amur, Russia), vellkom@list.ru, SPIN: 1265-7970

Вклад авторов

В.Л. Земляк – подготовка рукописи, проведение модельных исследований; В.М. Козин – организация модельного эксперимента; А.С. Васильев – разработка численной модели и проведение численного моделирования; А.С. Чингалаев – подготовка к проведению модельных экспериментов.

Contribution of the authors

V.L. Zemlyak – preparation of the manuscript, conducting model studies; V.M. Kozin – organization of the model experiment; A.S. Vasiliev – development of a numerical model and carrying out numerical simulations, S.A. Chingalaev – preparation for carrying out numerical simulations

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 08.11.2023; одобрена после рецензирования 17.11.2023; принята к публикации 15.03.2024.

Information about the article

The article was submitted: November 8, 2023; approved after reviewing: November 17, 2023; accepted for publication: March 15, 2024.