

Научная статья

УДК 532.3

DOI: 10.24412/2658-4255-2026-1-05-15



EDN: CTBDRZ

Для цитирования:

Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М., Бабичева Е.Г., Духнов К.А. Влияние положения рубки на характер движения погруженного тела на малой глубине // Российская Арктика. 2026. Т. 8. № 1. С. 05–15.

<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2026-1-05-15>

Получена: 08.11.2025

Принята: 09.12.2025

Опубликована: 26.02.2026

For citation:

Zemlyak VL, Vasiliev AS, Kozin VM, Babicheva EG, Dukhnov KA. Influence of the sail position on the movement of a submerged body at shallow depths. Russian Arctic. 2026;8(1):05–15. (In Russ.).

<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2026-1-05-15>

Received: 08.11.2025

Accepted: 09.12.2025

Published: 26.02.2026

Конфликт интересов.



Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Финансирование.

Исследование выполнено в рамках проекта FSNZ-2024-0010 (№ 1024060700009-7-2.3.2) на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания вузам.



ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РУБКИ НА ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ ПОГРУЖЕННОГО ТЕЛА НА МАЛОЙ ГЛУБИНЕ

В.Л. Земляк^{1*} , А.С. Васильев¹ , В.М. Козин², Е.Г. Бабичева³, К.А. Духнов¹

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

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

³ ФГБОУ ВО Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия



E-mail: *vellkom@list.ru

Аннотация

В работе представлены результаты исследования влияния положения рубки крыловидной формы на параметры движения и гидродинамические характеристики погруженного тела при его перемещении на малом заглублении. Рубка располагалась в носовой и кормовой оконечности, а также на мидель-шпангоуте модели тела. Экспериментально на базе опытового бассейна определена величина вертикального перемещения моделей под воздействием подъемной силы для заданных значений числа Фруда Fr . На основе полученных данных выполнены серии численных расчетов. Определены значения гидростатического и гидродинамического давления, возникающего при движении моделей. Установлено, что наличие рубки приводило к скачкообразному изменению области гидростатического давления в месте ее расположения. В результате движения модели с рубкой, расположенной на мидель-шпангоуте, при $Fr = 0,3 - 0,5$ за счет интерференции волновых систем происходило существенное снижение характера волнообразования и полного сопротивления. Наибольшие значения гидродинамических характеристик во всем скоростном диапазоне фиксировались от движения модели с расположением рубки в носу. Исследование показало, что расположение рубки на поверхности подводного аппарата в средней части корпуса является наиболее оптимальным с точки зрения полного сопротивления и подъемной силы.

Ключевые слова: погруженное тело, рубка, свободная поверхность жидкости, гидродинамические характеристики

INFLUENCE OF THE SAIL POSITION ON THE MOVEMENT OF A SUBMERGED BODY AT SHALLOW DEPTHS

Vitaly L. Zemlyak^{1*} , Alexey S. Vasiliev¹ , Viktor M. Kozin², Elena G. Babicheva³, Konstantin A. Dukhnov¹

¹ Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russia

² Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy of the Khabarovsk Federal Research Center, Komsomolsk-on-Amur, Russia

³ Amur State Humanitarian and Pedagogical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

E-mail: *vellkom@list.ru

Abstract

The article presents the results of a study of the influence of wing-shaped sail position on the motion parameters and hydrodynamic characteristics of a submerged body moving in shallow water. The sail was located at the

bow and stern ends, as well as on the midship frame of the body model. The magnitude of the vertical displacement of the models under the influence of the lifting force for the given values of the Froude number Fr was determined experimentally in an experimental tank. A series of numerical calculations were performed based on the obtained data. The values of hydrostatic and hydrodynamic pressure arising from the movement of the models were determined. It was found that the presence of the sail led to an abrupt change in the area of hydrostatic pressure at its location. When the model with the sail located on the midship frame moved at a relative speed of $Fr = 0.3 - 0.5$, the nature of wave formation and total resistance significantly decreased due to the interference of wave systems. The highest values of hydrodynamic characteristics over the entire speed range were recorded for the movement of the model with the sail located in the bow. The study showed that the location of the conning tower on the surface of the underwater vehicle, in the mid-hull, is the most optimal in terms of total resistance and lift force.

Keywords: submerged body, sail, free liquid surface, hydrodynamic characteristics

Введение

Подводные аппараты (ПА), обладая широкой сферой применения, оказались универсальным средством для проведения исследовательских работ, разведки углеводородов и других полезных ископаемых, топографии морского дна, решения задач двойного назначения. Быстрый прогресс в разработке ПА неуклонно повышает надежность и безопасность эксплуатации устройств, что обеспечивает их работоспособность в суровых морских и ледовых условиях. В работе [1] представлен научный обзор результатов изучения вынужденных гидроупругих волн, действующих на плавающую ледяную пластину или возмущений, создаваемыми погруженными в жидкость источниками при их движении вблизи нижней поверхности сплошного и битого льда. Форма корпуса ПА влияет на его гидродинамические характеристики: сопротивление; подъемную силу и гидродинамический момент [2] и зависит от назначения аппарата [3]. Как правило, даже небольшие по размеру ПА имеют на корпусе выступающие части, в том числе рубку, предназначенную для размещения выдвижных устройств [4]. В работе [5] авторы исследовали влияние рубки и кормового оперения на параметры движения модели погруженного тела и характер волнообразования в ледовых условиях. В работе [6] показано как влияет форма носовой оконечности, относительное удлинение L/D (где L – длина корпуса тела, D – диаметр корпуса) и крыловидная форма рубки на характер волнообразования и ходкость модели ПА *Joubert BB2*. Точные геометрические характеристики корпуса *Joubert BB2* описаны в исследовании [7]. Влияние формы носа и кормы на гидродинамические характеристики модели ПА *DARPA SUBOFF* рассмотрены в работе [8]. В работе [9] с помощью методов вычислительной гидродинамики на основе модели турбулентности $k-\omega$ проанализировано изменение полного сопротивления, гидростатического и гидродинамического давления, возникающего при движении модели ПА с различной скоростью вблизи нижней поверхности льда.

В экспериментально-теоретической работе [10] установлено, что при малой глубине погружения ПА наибольшее эксплуатационное значение при движении приобретает подъемная сила F_z , которая может как притягивать тело к поверхности воды, так и отталкивать его в зависимости от значения числа Фруда $Fr = u/(Lg)^{1/2}$ (где u – скорость движения, g – ускорение свободного падения) [11]. Измерение величины вертикального перемещения ПА h_m под воздействием F_z является сложной экспериментальной задачей, для решения которой традиционные методы буксировки моделей ПА путем размещения их на пилоне, жестко соединенном с буксировочной тележкой, не подходят.

Целью исследования было экспериментальное определение влияния положения рубки на изменение глубины погружения модели ПА под воздействием подъемной силы в зависимости от скорости движения. На основе полученных результатов модельных экспериментов теоретически рассчитаны поля гидростатического и гидродинамического давления, возникающего от движения тела на малом заглублении, проанализирован характер волнообразования, изменение полного сопротивления и подъемной силы.

Подготовка к проведению модельных и численных экспериментов

Для оценки влияния положения рубки на характер движения погруженного тела и его гидродинамические характеристики была проведена серия модельных и численных экспериментов. В качестве тела использовалась модель, форма корпуса которой была близка к геометрии *Joubert BB2*, описанной в научной литературе [7]. Модель при своей длине $L_m = 1,154$ м имела относительное удлинение $L_m/D_m = 8,4$. В средней части корпуса модели располагалась цилиндрическая вставка. На корпусе размещалась рубка крыловидной формы в носу (модель № 1), на мидель-шпангоуте (модель № 2) и в корме (модель № 3) (рис. 1).

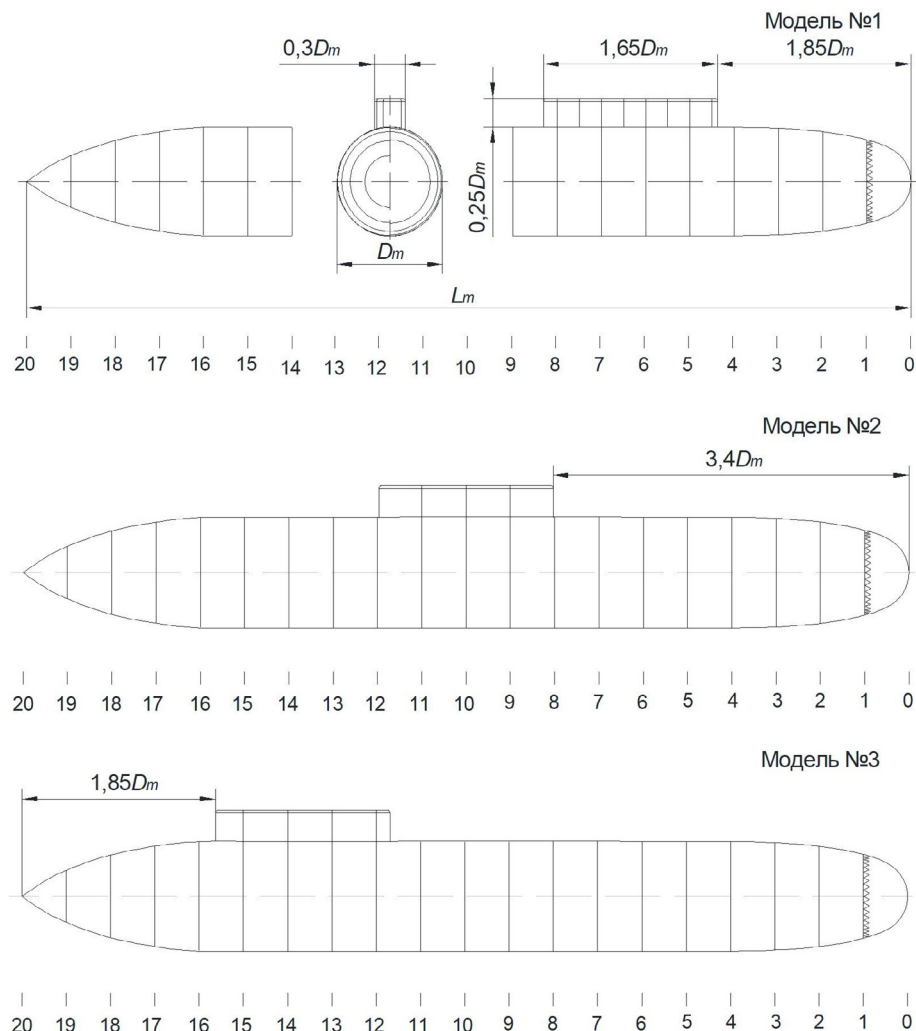


Рисунок 1. Теоретический чертеж моделей № 1 – 3

Отметим, что модель № 1 была идентична по своим параметрам модели, использовавшейся авторами в работе [5]. Коэффициент общей полноты равнялся $\delta = 0,673$. Модели изготавливались методом послойной печати. Моделирование турбулентного режима течения в пограничном слое осуществлялось с помощью искусственного турбулизатора в виде полосы *Nama* [12], расположенного на расстоянии $0,05L_m$ от носового перпендикуляра. С учетом длины модели, способа ее изготовления и требуемой высоты турбулизатора, полоса *Nama* оказалась наиболее оптимальным решением, обеспечивающим достаточный уровень устойчивого турбулентного потока при минимальном увеличении сопротивления по сравнению с эквивалентными ей проволочными турбулизаторами.

Моделирование движения погруженных тел осуществлялось на базе опытового бассейна лаборатории ледотехники (ФГБОУ ВО Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, г. Биробиджан) [13].

При проведении экспериментов с помощью лазерного датчика записывался профиль взволнованной поверхности воды для верификации численного решения, а также величина относительного вертикального перемещения погруженного тела h_m/h (где h_m – отклонение тела от первоначально заданного заглубления h), возникающего под воздействием подъемной силы.

Схема проведения экспериментов показана на рис. 2. Модель погруженного тела начинала свое движение из точки T1 разгонялась на разгонном участке Sa до заданной скорости в точке T2 и далее перемещалась по стационарному участку движения Sc до точки T3, где происходила ее остановка. Для выбора значения h были выполнены тестовые буксировки, которые показали, что с учетом габаритов моделей и высоты рубки наиболее оптимальной величиной первоначально заданного заглубления будет $h = 1,45D_m$, при значениях $Fr = 0,3 - 0,72$. Движение моделей на меньшем заглублении не моделировалось, т.к. при $Fr = 0,39$, когда F_z становилась максимальной, верхняя поверхность рубки оказывалась над поверхностью воды. При моделировании движения с большим заглублением при $Fr > 0,5$ заглубление модели h_m достигало значительной величины и начиналось влияние дна чаши бассейна на получаемые результаты экспериментов. Для численного моделирования использовалась величина заглубления h_m , т.к. в ходе расчетов необходимо было учитывать значения вертикального перемещения тела, полученные экспериментально.

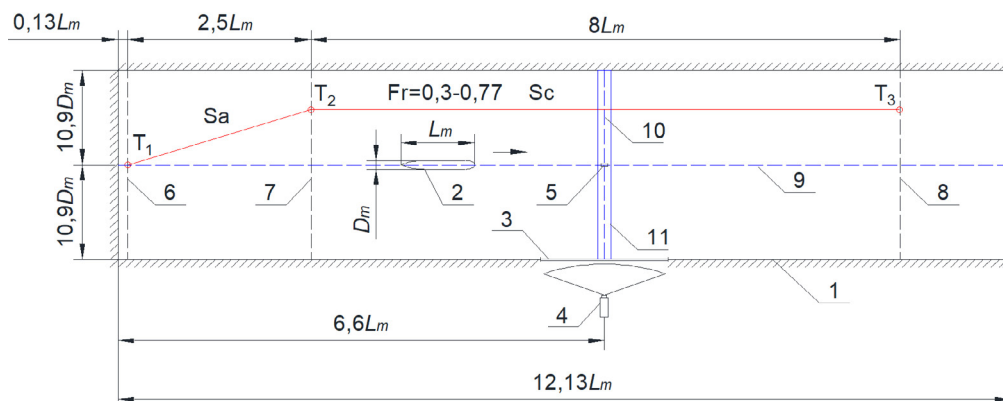


Рисунок 2. Схема модельного эксперимента (вид сверху):
 1 – чаша бассейна; 2 – модель ПА; 3 – водонепроницаемое окно;
 4 – камера для регистрации вертикального перемещения модели;
 5 – датчик перемещений; 6 – линия начала движения модели;
 7 – линия окончания разгонного участка; 8 – линия окончания
 стационарного участка движения

Определение величины гидростатического и гидродинамического давления, полного сопротивления и подъемной силы осуществлялось с помощью численной модели движения погруженного тела заданной геометрической формы на малом заглублении, разработанной в ПК ANSYS 19 R2 AcademicResearch [14]. На поверхности тела в его носовой и кормовой оконечности, а также на мидель-шпангоуте была смоделирована рубка. Форма рубки и характеристики корпуса тела полностью соответствовали ранее использованному в модельном эксперименте. На рис. 3 показан пример дискретизации модели № 2 в водной среде. Сетка накладывалась с учетом пристеночных слоев, с использованием сеточной функции *inflation*, для улучшения обтекаемости объекта в потоке. Количество ячеек и узлов модели тела составило порядка 1,9 млн. Построение сетки осуществлялось алгоритмом *CutCell*. Модель расчётной области состояла из ячеек в форме гексаэдров, число которых равнялось 17,1 млн.

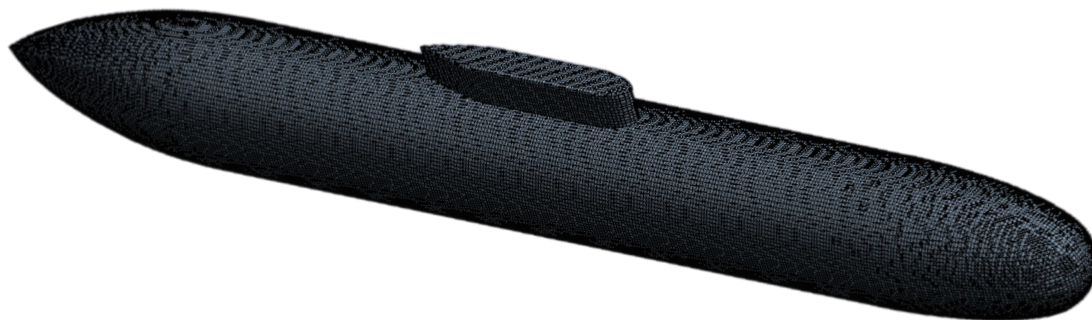


Рисунок 3. Дискретизация корпуса модели № 2

Расчеты выполнялись в стационарном решателе *stationary* с применением моделей *Volume of Fluid* и $k-\epsilon$ – модели турбулентности [15]. Нижняя зона расчётной 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. На рис. 4 представлена схема проведения численных расчетов и граничные условия модели движения тела.

Численная модель повторяла условия и параметры модельных экспериментов в опытовом бассейне после пересчета данных на натуру в соответствии с масштабом моделирования 1:120.

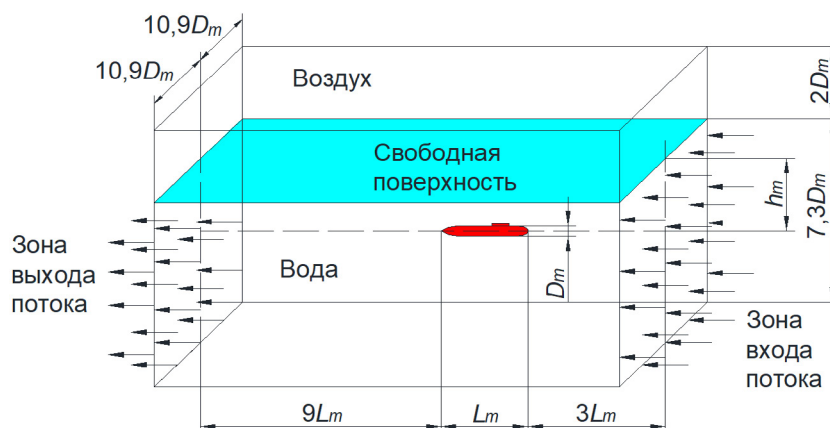


Рисунок 4. Граничные условия модели движения тела

В ходе расчета определялись величина гидростатического и гидродинамического давления при заглублении моделей h_m , полное сопротивление R_T и подъемная сила F_z . Для построения зависимостей использовались безразмерные коэффициенты давления $C_p = \frac{P - P_\infty}{0,5\rho u^2}$ (где ρ – плотность жидкости), сопротивления $C_T = \frac{R_T}{0,5\rho u^2 S}$ и силы $C_F = \frac{F_z}{0,5\rho u^2 S}$ (где S – площадь смоченной поверхности тела).

За положительное значение принималась подъемная сила, притягивающая тело к поверхности воды, а за отрицательное – сила, отталкивающая его вниз. Предварительные численные расчеты показали, что при $Fr \rightarrow 0$ значение C_F стремилось к ненулевому значению C_{F0} , что согласуется с результатами работы [16]. Поэтому зависимости коэффициента подъемной силы строились как $(C_F - C_{F0})$.

Основные результаты модельных и численных экспериментов и их обсуждение

На первом этапе исследования экспериментально была определена величина относительного вертикального перемещения h_m/h (рис. 5). На основе полученных данных выполнены серии численных расчетов.

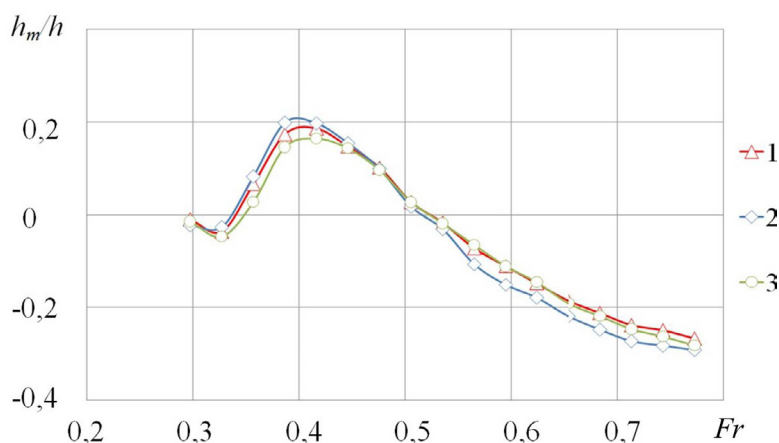


Рисунок 5. Экспериментальные зависимости h_m/h от числа Fr : 1 – модель № 1 [5]; 2 – модель № 2; 3 – модель № 3

Численное моделирование показало, что с ростом значения Fr происходило изменение поля давления вокруг модели погруженного тела. Наличие рубки приводило к скачкообразному изменению области гидростатического давления в месте ее расположения. Причем положение рубки оказывало влияние на величину коэффициента C_p и, если максимумы значений для всех рассмотренных случаев были практически одинаковые, то величина C_p и характер ее изменения для областей перед и за рубкой имели более сложные зависимости (рис. 6).

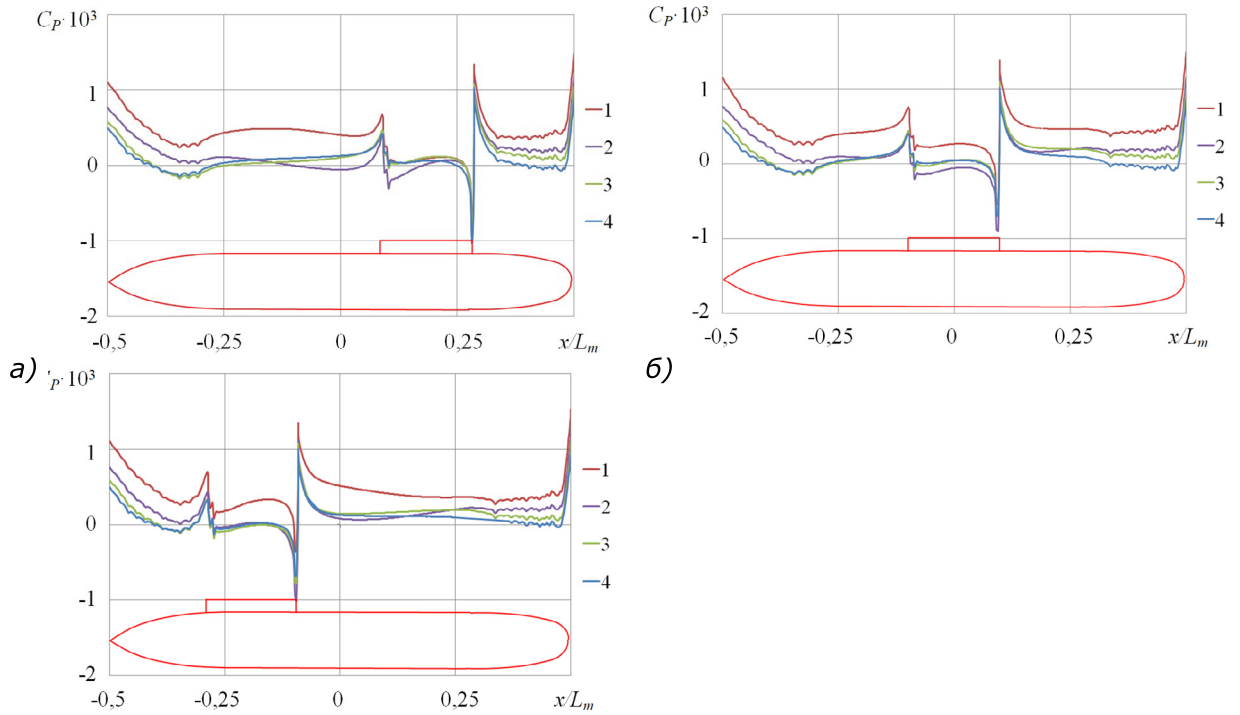


Рисунок 6. Сопоставление между численными значениями коэффициента гидростатического давления C_p для различных чисел Fr (а – модель № 1 [5]; б – модель № 2; в – модель № 3): (1) – $Fr = 0,3$; (2) – $Fr = 0,39$; (3) – $Fr = 0,51$; (4) – $Fr = 0,71$

Примеры распределения гидродинамического давления от движения моделей № 1 – 3, а также изополя взволнованной поверхности жидкости показаны на рис. 7 – 10. С ростом числа Fr происходило смещение положения максимума впадины гравитационной волны относительно погруженного тела, которая достигала мидель-шпангоута при $Fr \approx 0,39$ (рис. 7), смещаясь в район кормовой оконечности при $Fr > 0,5$ из-за смещения области повышенного давления в корму (рис. 8).

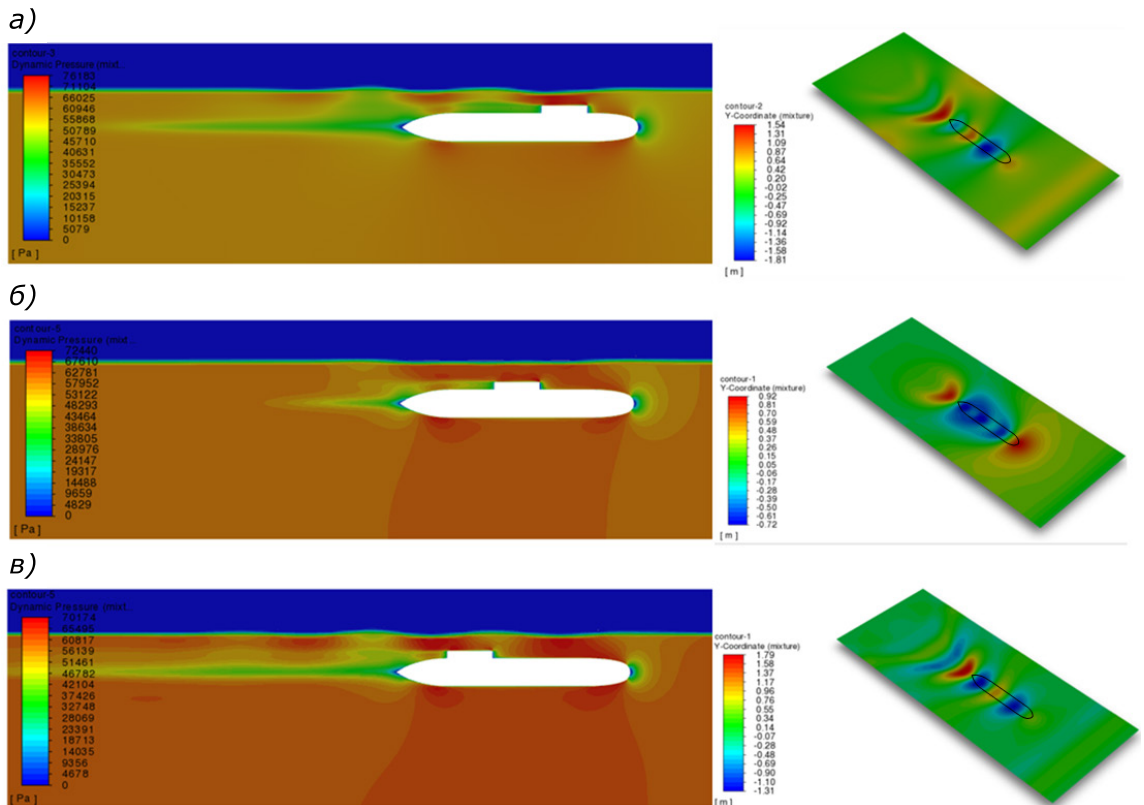


Рисунок 7. Распределение гидродинамического давления от движения модели и изополя взволнованной поверхности жидкости при $Fr = 0,3$: а – модель № 1; б – модель № 2; в – модель № 3

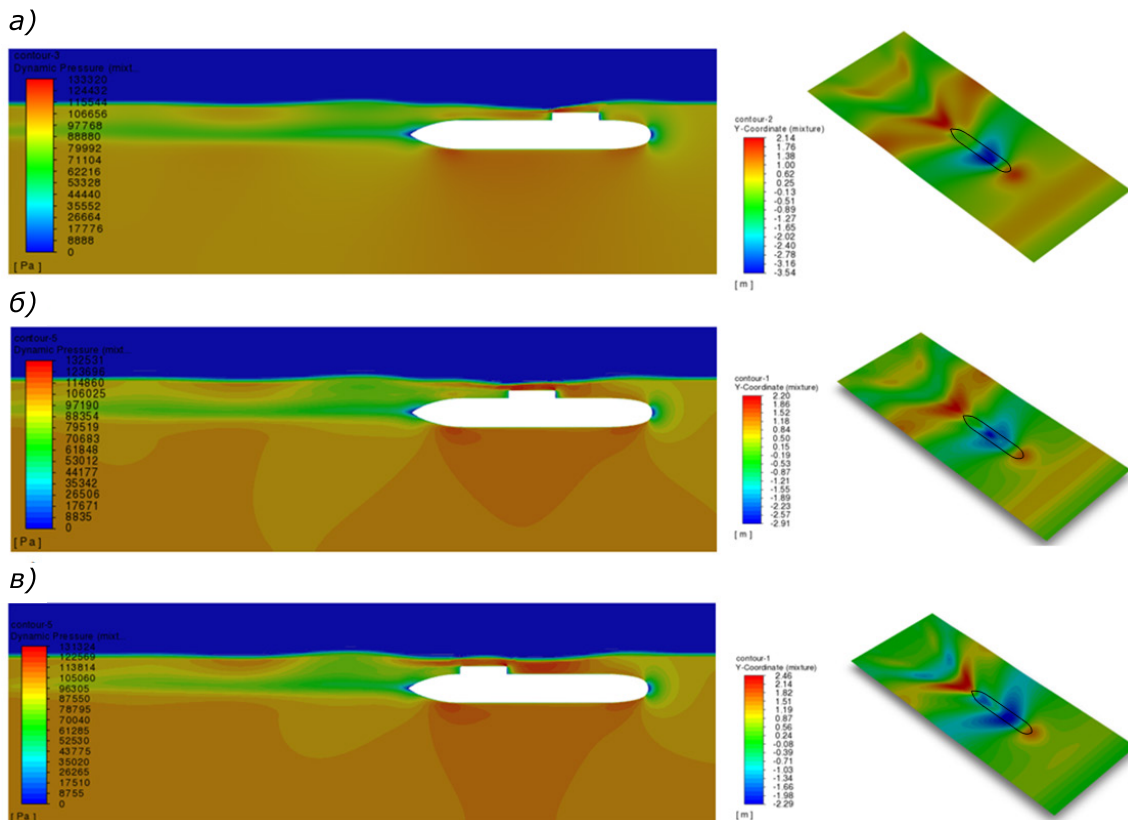


Рисунок 8. Распределение гидродинамического давления от движения модели и изополя взволнованной поверхности жидкости при $Fr = 0,39$: а – модель № 1; б – модель № 2; в – модель № 3

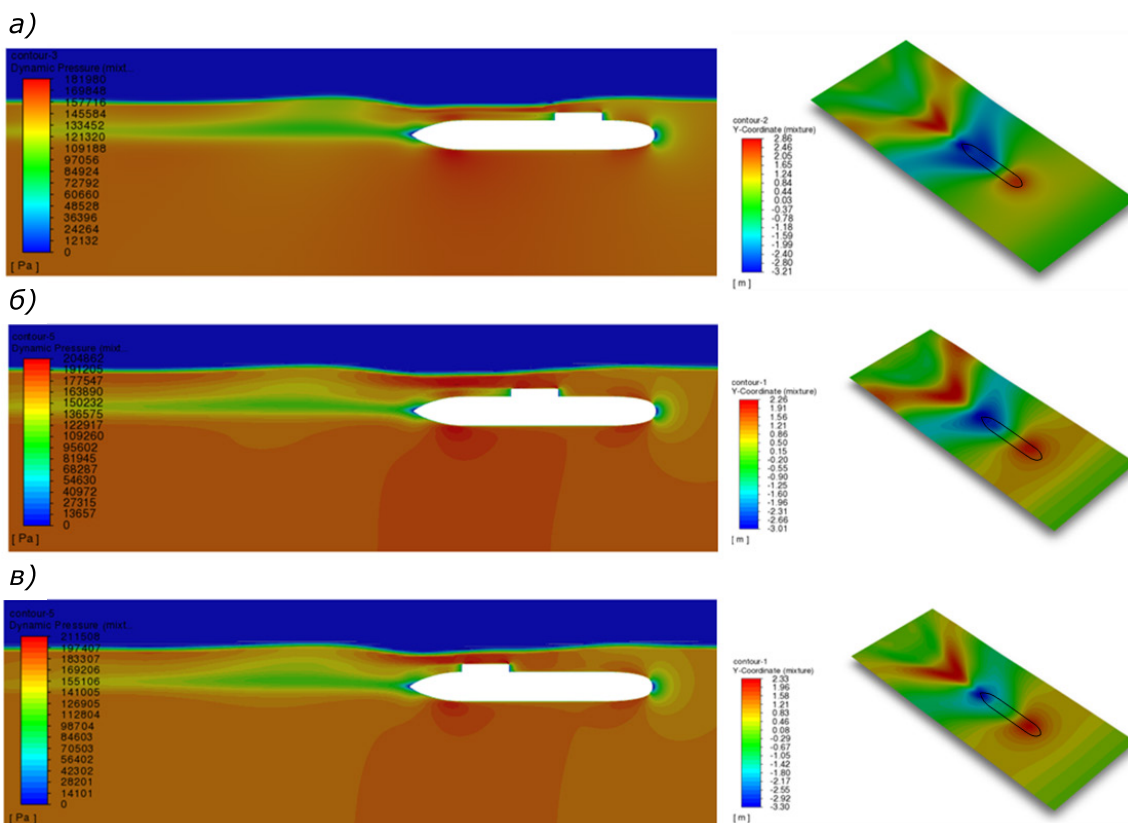


Рисунок 9. Распределение гидродинамического давления от движения модели и изополя взволнованной поверхности жидкости при $Fr = 0,51$: а – модель № 1; б – модель № 2; в – модель № 3

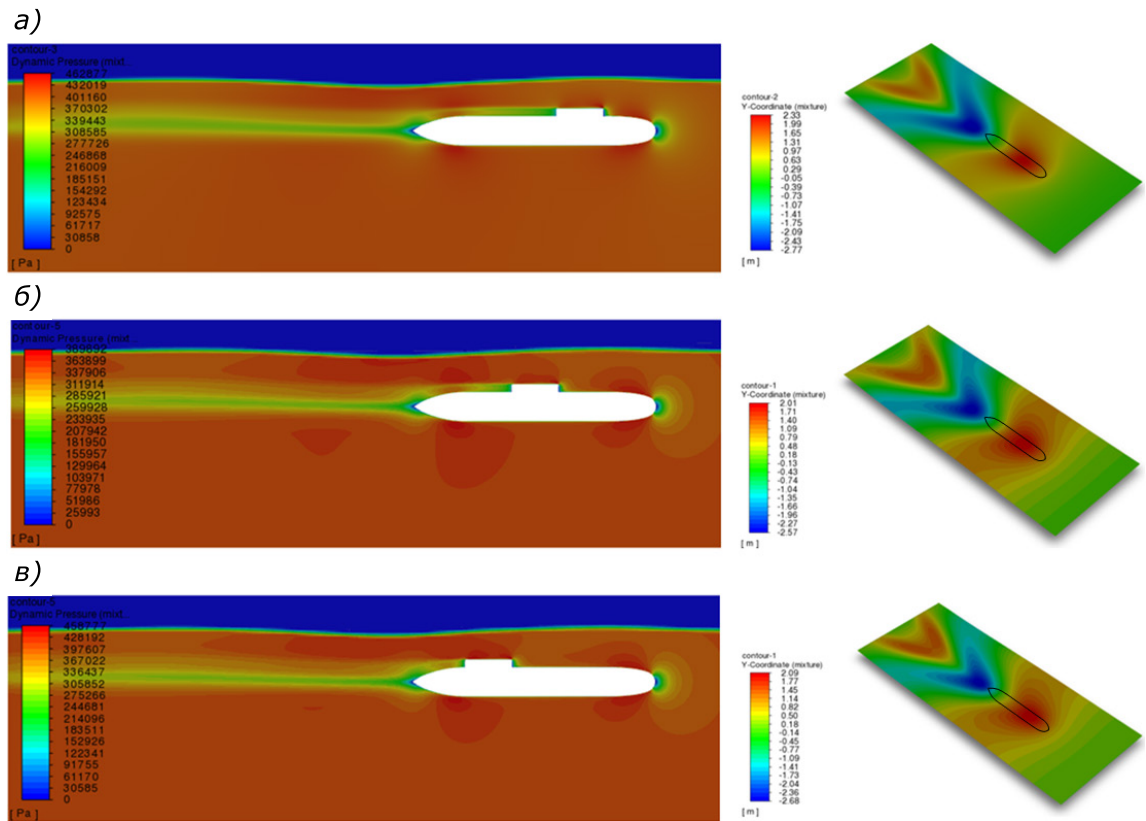


Рисунок 10. Распределение гидродинамического давления от движения модели и изополя взволнованной поверхности жидкости при $Fr = 0,71$: а – модель № 1; б – модель № 2; в – модель № 3

Анализ рисунков показывает, что положение рубки приводило к существенному изменению процесса формирования волн на поверхности воды. Так при $Fr = 0,3$ генерируемая от движения модели № 1 волна, имела три вершины и две подошвы. Причем в области расположения рубки давление и величина прогиба имели максимальные значения (рис. 7а). Высота генерируемой волны была наибольшей, как и величина подъемной силы (рис. 11). Расположение рубки в средней части модели, приводило к интерференции волновых систем. В результате обширная область над рубкой практически не имела взволнованной поверхности. Высота волны уменьшалась более чем в два раза. Волнообразование в кормовой оконечности также было незначительным (рис. 7б). Подъемная сила приобретала минимальное значение (рис. 11).

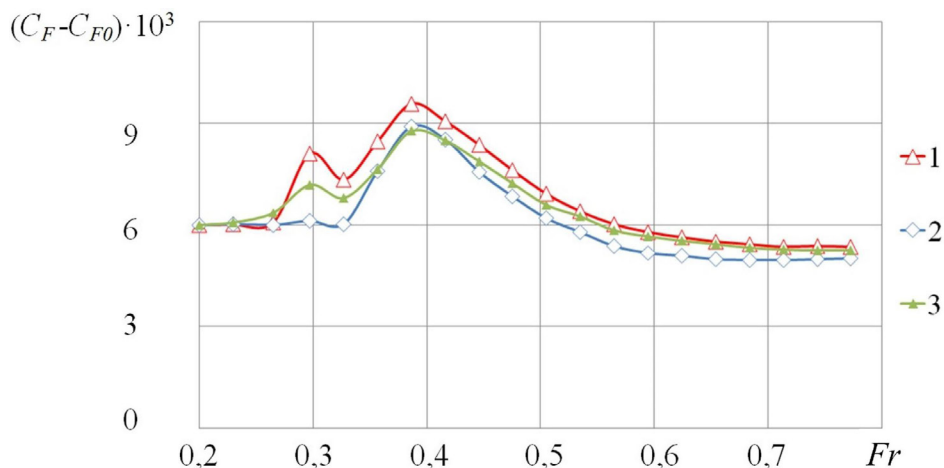


Рисунок 11. Теоретические зависимости $(C_F - C_{F0})$ от числа Fr : (1) – модель № 1 [5]; (2) – модель № 2; (3) – модель № 3

Расположение рубки в корме у модели № 3, в отличие от модели № 1, приводило к формированию в районе цилиндрической вставки обширной области повышенного гидродинамического давления. Подошва волны имела значительную длину, в отли-

чие от небольшой области вершины волны в носовой оконечности. Далее в районе переднего среза рубки формировалась волна наибольшей высоты среди трех моделей, а в районе кормовой оконечности и заднего среза рубки незначительная по объему, но максимальная по значениям область повышенного давления с максимальным значением прогиба. За моделью фиксировался обширный волновой след (рис. 7в).

С ростом значения Fr характер волнообразования менялся (рис. 8). Подошва волны смещалась в район мидель-шпангоута. Гравитационная волна для моделей № 1 – 2 имела две выраженные вершины, особенно обширную в районе за кормовой оконечностью и одну менее значительную подошву, форма которой зависела от положения рубки. При $Fr = 0,39$ подъемная сила приобретала максимальные значения (рис. 11). Величина заглупления была минимальной (рис. 6) и практически одинаковой для всех трех моделей. Рубки у моделей № 1 и 2 практически контактировали с границей раздела вода – воздух (рис. 8а, 8б). Модель № 3 вновь вносила значительные изменения в характер волнообразования. Передний срез рубки, попадая в среднюю часть подошвы волны, генерировал дополнительную волновую систему. В итоге практически над всей поверхностью модели формировалась обширная область повышенного гидродинамического давления (рис. 8в). Однако высота волны была минимальной. Максимальные значения фиксировались от движения модели № 1. Значительной разницы между значениями относительного вертикального перемещения h_m/h не фиксировалось, что очевидно связано с минимальным зазором между верхней поверхностью рубки и подошвой волны (рис. 8). Тем не менее стоит отметить, что h_m/h для модели № 2 была наименьшей, очевидно это связано с формированием обширной зоны повышенного гидродинамического давления под подошвой волны из-за расположения рубки в районе мидель-шпангоута (рис. 8б).

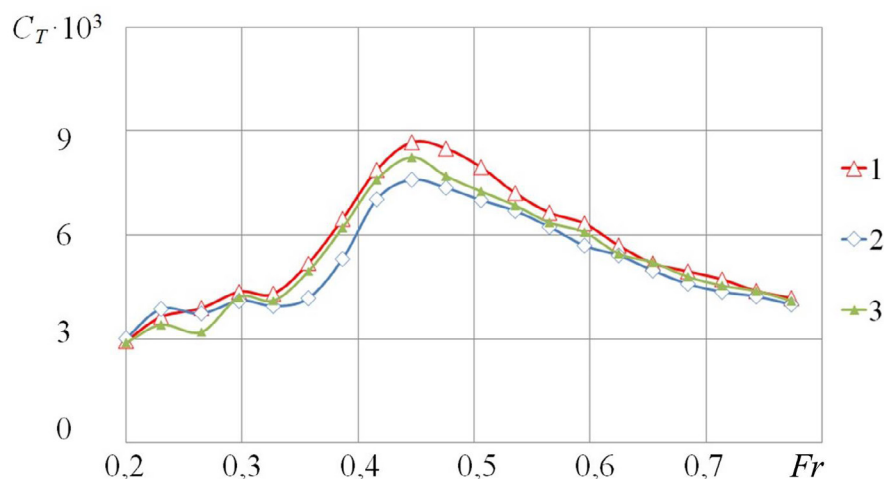


Рисунок 12. Теоретические зависимости C_T от числа Fr : (1) – модель № 1 [5]; (2) – модель № 2; (3) – модель № 3

При $Fr = 0,51$ величина заглупления h_m становилась равной значению h . С ростом числа Fr наибольшее волнообразование, как и величина подъемной силы, фиксировалась от движения модели № 1. Положение рубки в средней части снижало величину исследуемых параметров. Также это характерно и для полного сопротивления, наименьшие значения которого фиксировались у модели № 2 (рис. 12). В диапазоне $Fr = 0,36 - 0,54$ значения C_T для модели № 1 возрастали на 13 – 21 % по сравнению с моделью № 2. Заглупление для модели № 2, как и величина подъемной силы, были максимальными.

Выводы

Для определения характера волнообразования и гидродинамических характеристик погруженного тела заданной формы предложена численная модель, разработанная на базе ПК *ANSYS 19 R2 Academic Research*. Модель позволяет определять величину гидростатического и гидродинамического давления, полное сопротивление и подъемную силу, действующую на погруженное тело со стороны жидкости. Расчеты проводятся с учетом заданного значения скорости движения модели и величины заглупления h_m , определяемой экспериментально.

Для определения h_m ранее авторами разработана методика проведения модельных экспериментов. Значения вертикального перемещения погруженного тела с учетом расположения на его корпусе рубки получены впервые.

Наличие рубки приводило к скачкообразному изменению области гидростатического давления в месте ее расположения, характер изменения кривых C_p для областей перед и за рубкой имел сложные зависимости.

При движении модели № 2 с относительной скоростью $Fr = 0,3 - 0,5$ за счет интерференции волновых систем происходит существенное снижение характера волнообразования и полного сопротивления.

С ростом значения Fr характер волнообразования менялся в результате смещения подошвы волны в район мидель-шпангоута. Взволнованная поверхность для моделей № 1 – 2 имела две выраженные вершины, особенно обширную в районе за кормовой оконечностью и одну менее значительную подошву, форма которой зависела от положения рубки.

Наибольшие значения во всем скоростном диапазоне для исследуемых параметров фиксировались от движения модели № 1. По итогам исследования можно сделать вывод, что расположение рубки на поверхности подводного аппарата в районе мидель-шпангоута является наиболее оптимальным с точки зрения наименьшего сопротивления при движении, снижения высоты генерируемых волн и воздействия подъемной силы.

Список литературы:

1. Стурова И.В., Ткачева Л.А. Поведение плавающего ледяного покрова под действием внешних нагрузок (обзор) // Прикладная механика и техническая физика. 2025. № 3 (391). С. 3–55. <http://dx.doi.org/10.15372/PMTF202415617>
2. 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: Thesis ... Master of Philosophy. University of Tasmania. Hobart. 2014. 214 p.
3. Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1973. 211 с.
4. 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apor.2017.07.001>
5. Земляк В.Л., Козин В.М., Васильев А.С. Влияние формы рубки погруженного тела на его движение при малом заглублении // Труды Крыловского государственного научного центра. 2025. № 1 (411). С. 24–31.
6. 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. P. 499–511. <http://dx.doi.org/10.1007/s40722-022-00261-y>
7. Anderson B., Chapuis M., Erm L., Fureby C., Giacobello M., Henbest S., Jones D., Jones M., Kumar C., Liefvendahl M., et al. Experimental and computational investigation of a generic conventional submarine hull form. In: 29th Symposium on naval hydrodynamics, Gothenburg, Sweden, 26–31 August 2012.
8. Divsalar K. Improving the hydrodynamic performance of the SUBOFF bare hull model: a CFD approach. Acta Mechanica Sinica. 2020. Vol. 36. P. 44–56. <https://doi.org/10.1007/s10409-019-00913-7>
9. Bai T., Xu J., Wang G., Yu K., Hu X. 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 (in Chinese). <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01975>
10. 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. <https://doi.org/10.1007/s11804-015-1319-5>
11. 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. <https://doi.org/10.5957/jsr.1987.31.4.227>
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. <https://doi.org/10.1063/1.1722760>
13. Земляк В.Л., Козин В.М. Ледовый бассейн лаборатории ледотехники // Вестник Приамурского гос. ун-та им. Шолом-Алейхема. 2021. № 1(42). С. 19–31. <https://doi.org/10.24412/2227-1384-2021-142-19-31>
14. Zemlyak V.L., Kozin V.M., Vasilyev A.S. Influence of the cross-sectional shape of a submerged body on its hydrodynamic characteristics in free water surface movement. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy. 2024. Vol. 10. № 3. P. 671–689. <https://doi.org/10.1007/s40722-024-00333-1>

15. Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений. Учеб. пособие. СПб.: Изд-во. Политехн. ун-та, 2009. 143 с.
16. Sturova I.V. The effect of a crack in an ice sheet on the hydrodynamic characteristics of a submerged oscillating cylinder. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2015. Vol. 79. P. 170–178. <https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2015.07.008>

References:

1. Sturova IV, Tkacheva LA. Behavior of a floating ice cover under external loads (review). *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2025;3(391):3–55. <http://dx.doi.org/10.15372/PMTF202415617>
2. 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: Thesis ... Master of Philosophy. University of Tasmania, Hobart. 2014;214 p.
3. Pantov EN, Makhin NN, Sheremetov BB. Fundamentals of the theory of propulsion of underwater vehicles. Leningrad: Sudostroenie, 1973;211 p. (In Russ.).
4. Shariati S, Mousavizadegan S. The effect of appendages on the hydrodynamic characteristics of an underwater vehicle near the free surface. *Applied Ocean Research*. 2017; 67:31–43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apor.2017.07.001>
5. Zemlyak VL, Kozin VM, Vasilyev AS. Sail effect upon submerged body movement at small depth. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2025;1(411):24–31. (In Russ.).
6. Toxopeus S, Kerkvliet M, Vogels R, Quadvlieg F, Nienhuis B. Submarine hydrodynamics for off-design conditions. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*. 2022;8: 499–511. <http://dx.doi.org/10.1007/s40722-022-00261-y>
7. Anderson B, Chapuis M, Erm L, Fureby C, Giacobello M, Henbest S, Jones D, Jones M, Kumar C, Liefvendahl M, et al. Experimental and computational investigation of a generic conventional submarine hull form. In: 29th Symposium on naval hydrodynamics, Gothenburg, Sweden, 26–31 August 2012.
8. Divsalar K. Improving the hydrodynamic performance of the SUBOFF bare hull model: a CFD approach. *Acta Mechanica Sinica*. 2020;36(1):44–56. <https://doi.org/10.1007/s10409-019-00913-7>
9. Bai T, Xu J, Wang G, Yu K, Hu X. Analysis of resistance and flow field of submarine sailing near the ice surface. *Chinese Journal of Ship Research*. 2021;16(2):36–48 (in Chinese). <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01975>
10. Gourlay T, Dawson E. A havelock source panel method for near-surface submarines. *Journal of Marine Science and Application*. 2015;14:215–224. <https://doi.org/10.1007/s11804-015-1319-5>
11. Doctors L, Beck R. Convergence properties of the Neumann-Kelvin problem for a submerged body. *Journal of Ship Research*. 1987;31:227–234. <https://doi.org/10.5957/jsr.1987.31.4.227>
12. Hama FR, Long JD, Hegarty JC. On transition from laminar to turbulent flow. *Journal of Applied Physics*. 1957; 28:388–394. <https://doi.org/10.1063/1.1722760>
13. Zemlyak VL, Kozin VM. Ice tank of Ice Technology Laboratory. *Transactions of Sholom-Aleihem Amur State University*. 2021;1(42):19–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2227-1384-2021-142-19-31>
14. Zemlyak VL, Kozin VM, Vasilyev AS. Influence of the cross-sectional shape of a submerged body on its hydrodynamic characteristics in free water surface movement. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*. 2024;10(3):671–689. <https://doi.org/10.1007/s40722-024-00333-1>
15. Snegiryov AYu. High-performance computing in technical physics. Numerical modeling of turbulent flows. Textbook. St. Petersburg: Publishing house. Polytechnic University. 2009;143 p. (In Russ.).
16. Sturova IV. The effect of a crack in an ice sheet on the hydrodynamic characteristics of a submerged oscillating cylinder. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2015; 79:170–178. <https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2015.07.008>