

**Теория корабля и строительная механика**

Научная статья

УДК 532.3; 532.5; 629.585

DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-3/3-14>

В.Л. Земляк, А.С. Васильев, В.М. Козин, Е.Г. Бабичева

ЗЕМЛЯК ВИТАЛИЙ ЛЕОНИДОВИЧ – к.ф.-м.н., доцент, заведующий лабораторией ледотехники, vellkom@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3218-5738>

ВАСИЛЬЕВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой технических дисциплин, vasil-grunt@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7783-0000>

Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема  
Биробиджан, Россия

КОЗИН ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий, vellkom@list.ru  
Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН

БАБИЧЕВА ЕЛЕНА ГРИГОРЬЕВНА – к.т.н., доцент, декан факультета информационных технологий, математики и физики, steinbockh@mail.ru  
Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет  
Комсомольск-на-Амуре, Россия

## **Влияние горизонтальных и вертикальных рулей на характер движения погруженного тела в приповерхностной водной среде**

**Аннотация.** В работе выполнен экспериментально-теоретический анализ влияния выступающих частей в виде расположенного в горизонтальной и вертикальной плоскости кормового оперения на характер движения погруженного тела в приповерхностной водной среде и его гидродинамические характеристики. Впервые экспериментально на базе опытового бассейна получены зависимости вертикального перемещения тела, возникающего под воздействием подъемной силы, и определены углы дифферента модели при ее движении с различной скоростью. Предложен численный метод расчета, разработанный на базе программного комплекса (ПК) ANSYS 19 R2 Academic Research, позволяющий определять характер волнообразования на поверхности воды, силы и гидродинамический момент, действующие на тело с установленными в кормовой оконечности рулями со стороны жидкости при его движении в приповерхностной водной среде с различной скоростью. Выполнено сопоставление полученных результатов с данными для аналогичной модели тела, без оперения. Установлено существенное влияние на зависимости исследуемых параметров выступающих частей. Наличие рулей приводило к росту сопротивления трения и полного сопротивления. Также наблюдался рост подъемной силы, действующей на тело, в результате чего модель сильнее притягивалась к поверхности воды при  $F_r \approx 0,42$ , а при больших относительных скоростях движения сильнее отталкивалась от поверхности, чем модель без оперения. Существенное влияние наличие рулей оказывало на угол дифферента модели и на значения гидродинамического момента.

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

**Для цитирования:** 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.

© Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М., Бабичева Е.Г., 2023

Статья поступила: 11.07.2023; рецензия: 07.08.2023; финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00118).

## Введение

Для определения гидродинамических характеристик движущегося в жидкости погруженного тела его форма обычно моделируется в виде тела вращения с различным относительным удлинением  $L^* = L/D$  (где  $L$  – длина тела,  $D$  – диаметр тела) [7, 9, 12]. Однако корпус современного автономного подводного аппарата (АПА) имеет значительно более сложную геометрию. Форма поперечного сечения погруженного тела, отличная от круговой, может оказывать значительное влияние на волнообразование при малом заглублении [11]. Кроме сложной геометрии на корпусе АПА обычно устанавливаются элементы, отвечающие за обеспечение его маневренности в виде горизонтальных и вертикальных рулей. Также на корпусе может располагаться ограждение выдвигаемых устройств в виде рубок различного типа [12].

Для решения задачи движения погруженного тела сложной геометрической формы все чаще используются различные программные пакеты, в том числе ПК ANSYS с применением методов вычислительной гидродинамики.

Так была выполнена оценка влияния на гидродинамические характеристики тела формы его носовой и кормовой оконечности [8], рассчитаны спектры волн, генерируемых корпусами некоторых подводных лодок, в сравнении их со спектрами поверхностных волн от движения китов вблизи свободной поверхности воды [13]. Показано влияние выступающих частей на составляющие сопротивления и волнообразования от движения субмарины DARPPA SUBOFF на малом заглублении [14]. Выполнен детальный анализ влияния на гидродинамические характеристики и ходкость геометрически сложной формы корпуса подводной лодки проекта Joubert BB2 [8]. На поверхности корпуса также были смоделированы рубка, оснащенная рубочными горизонтальными рулями, хвостовое оперение и вращающийся винт. Для этой же модели субмарины исследовано влияние на ее гидродинамические характеристики формы геометрии носовой оконечности и положения рубки относительно мидель-шпангоута [16]. Изучено влияние волнения на процесс всплытия субмарины [6, 17]

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. Экспериментальное измерение этих параметров с помощью традиционного метода буксировки моделей на вертикально или горизонтально расположенном пилоне и жестко закрепленном на буксировочной тележке не реализуемо.

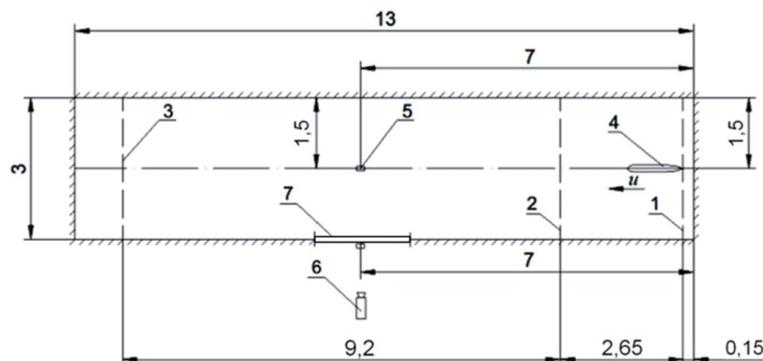
Цель работы – исследовать влияние горизонтальных и вертикальных рулей, расположенных в кормовой оконечности тела, на параметры его движения и гидродинамические характеристики.

## Подготовка к проведению модельных и численных экспериментов

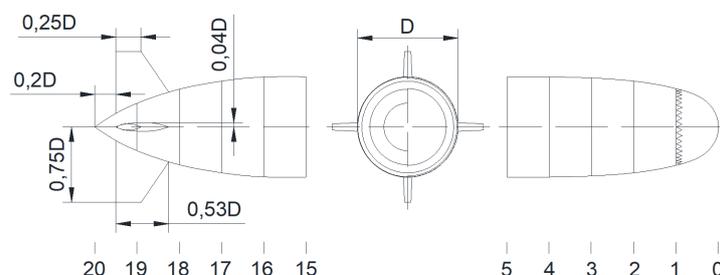
Для оценки влияния оперения на параметры движения модели при малом заглублении была проведена серия модельных экспериментов на базе опытового бассейна лаборатории ледотехники Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема (г. Биробиджан) в ноябре-декабре 2022 г. (рис. 1) [3].

Для экспериментов использовалась модель погруженного тела ассиметричной формы круглого сечения с цилиндрической вставкой и относительным удлинением  $L^* = 8,4$  при  $L = 1,154$  м. Модель в кормовой оконечности имела рули, расположенные в горизонтальной и вертикальной плоскостях, и была изготовлена с помощью послойной печати на принтере Raise3D с разрешением 0,01 мм. Наличие рулей приводило к увеличению площади смоченной поверхности тела  $S$  на 4,5% по сравнению с корпусом, не имеющим оперения. Теоретический чертеж погруженного тела выполнен в AutoCAD 2019 (рис. 2). Моделирование турбулентного режима течения в пограничном слое осуществлялось с помощью искусственного турбулизатора в виде полосы Napa [10], расположенной на расстоянии  $0,05L$  от носового перпендикуляра. С учетом длины модели, особенностей ее изготовления и требуемой высоты турбулизатора полоса Napa оказалась оптимальным решением, обеспечивающим достаточный уровень

устойчивого турбулентного потока при минимальном увеличении сопротивления по сравнению с эквивалентными ей проволочными турбулизаторами. Коэффициент полноты мидельшпангоута равнялся  $\beta = 0,785$ , коэффициент общей полноты –  $\delta = 0,673$ .



**Рис. 1. Схема 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 (вид сверху)

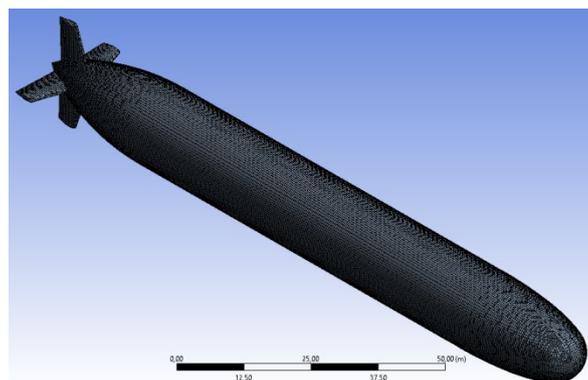


**Рис. 2. Теоретический чертеж модели № 1.1 погруженного тела (здесь и далее иллюстрации В.Л. Земляка)**

Ранее авторами показаны особенности и методика 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  $\gamma$ ; выполнена оценка сопоставления полученных результатов с данными известных исследований [4].

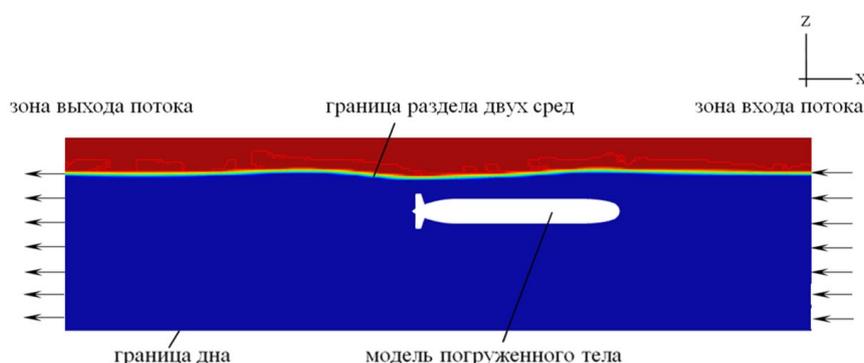
Тестовые прогоны показали, что с учетом габаритов модели погруженного тела оптимальной величиной первоначально заданного заглубления является значение  $h = 1,45D$ . Относительная скорость движения составила  $Fr = \frac{u}{\sqrt{gL}} = 0,3 - 0,72$  (где  $u$  – скорость движения,  $g$  – ускорение свободного падения).

Численное моделирование движения тела в приповерхностной водной среде осуществлялось с помощью математической модели, разработанной авторами в ПК ANSYS 19 R2 AcademicResearch и подробно описанной в работе [1]. Для решения поставленных в исследовании задач модель была доработана: на поверхности погруженного тела в его кормовой оконечности были смоделированы вертикально и горизонтально расположенные рули (рис. 3). По своим параметрам тело полностью повторяло модель, использованную в модельных экспериментах. Сетка накладывалась с учетом пристеночных слоев, с использованием сеточной функции inflation. Построение сетки осуществлялось алгоритмом CutCell. Модель расчётной области состояла из ячеек в форме гексаэдра.



**Рис. 3. Дискретная модель объекта в водной среде**

Расчеты выполнялись в стационарном решателе stationary с применением моделей Volume of Fluid и k-ε – модели турбулентности. Нижняя граница расчётной области, характеризующая дно, имела тип wall. В верхней части расчетной области находилась воздушная среда, а под ней – водная среда (рис. 4), каждая из которых имела соответствующие свойства – плотность и вязкость. Скорость тела задавалась при помощи расхода воды Mass-flow-inlet.



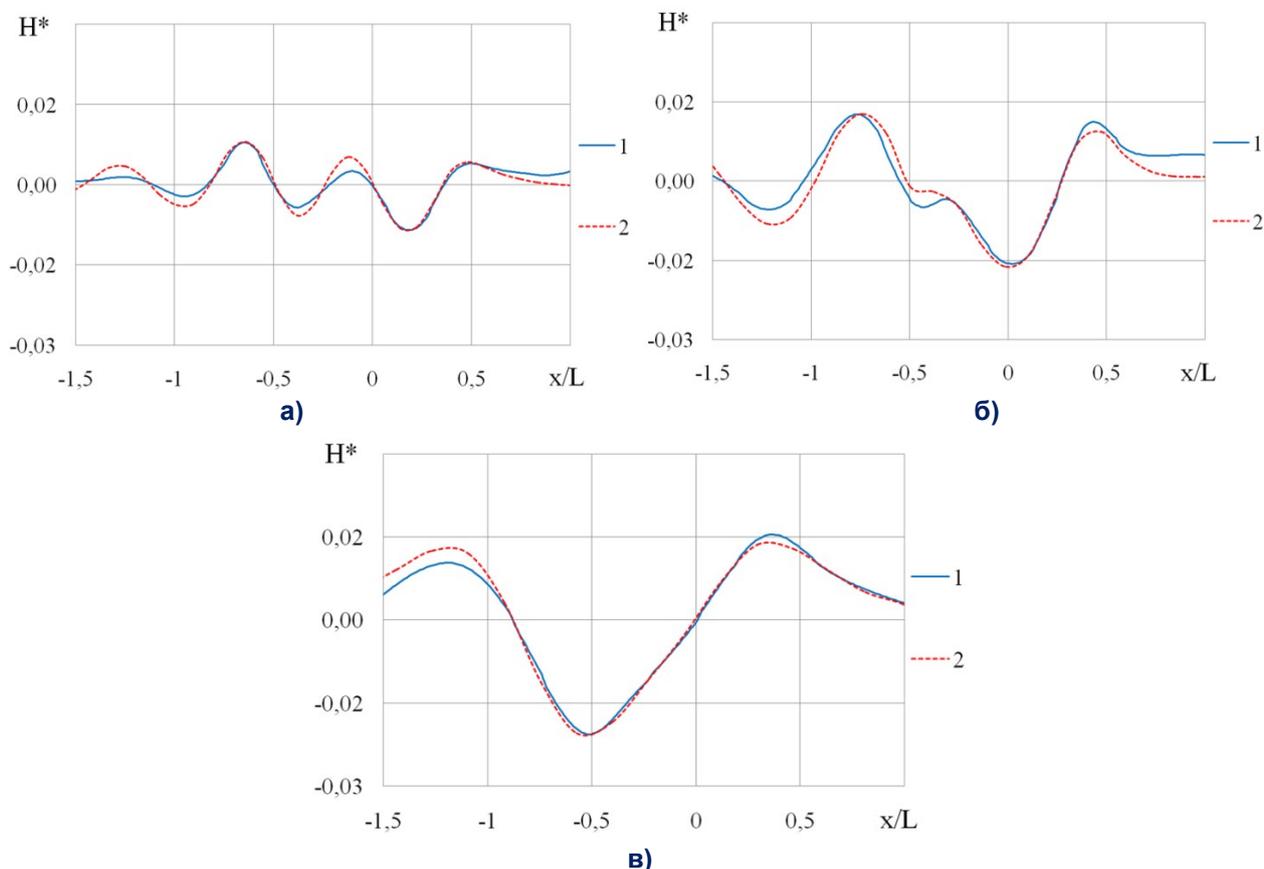
**Рис. 4. Граничные условия модели движения тела**

Численная модель полностью повторяла параметры модельного эксперимента, в том числе габариты опытового бассейна. Предложенный алгоритм позволял моделировать волнообразование на свободной поверхности жидкости от движения погруженного тела, определять давление  $P$ , полное сопротивление  $R_T = R_F + R_P$  (где  $R_F$  – сопротивление трения,  $R_P$  – сопротивление давления), 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  $\rho$  – плотность жидкости), зависимости коэффициента полного сопротивления  $C_T = \frac{R_T}{0,5\rho u^2 S}$  (где  $S$  – площадь смоченной поверхности), коэффициента подъемной силы  $C_Y = \frac{F_Z}{0,5\rho u^2 S}$  и коэффициента 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

На первом этапе исследования с целью проверки работоспособности предложенного математического алгоритма полученные в численных экспериментах профили гравитационных волн сравнивались с профилями, записанными датчиком вертикальных перемещений в ходе

проведения модельных экспериментов (рис. 5), приведены примеры профилей для различных относительных скоростей движения. Сопоставление полученных результатов показывает достаточно хорошую сходимость между данными как по относительной высоте  $H^* = H/L$  ( $H$  – высота волны) и длине гравитационных волн, так и по расположению локальных максимумов и минимумов зависимостей.

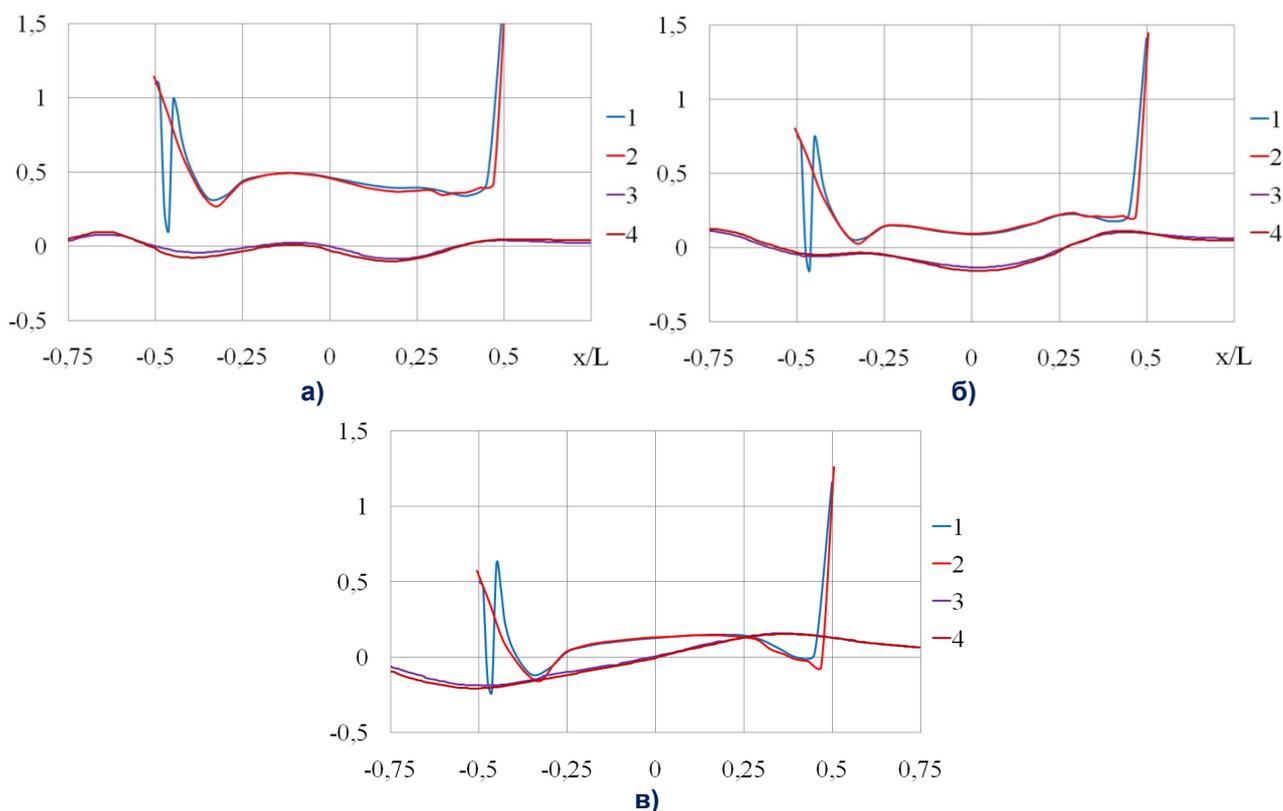


**Рис. 5. Сопоставление профилей гравитационных волн от движения модели № 1.1 (а –  $Fr = 0,3$ ; б –  $Fr = 0,39$ ; в –  $Fr = 0,62$ ): 1 – теоретический расчет; 2 – эксперимент**

Чтобы оценить влияние наличия горизонтальных и вертикальных рулей (модель № 1.1) на характер движения погруженного тела, полученные данные сравнивались с результатами для аналогичного по форме корпуса и параметрами тела, не имеющего кормового оперения (модель № 1.2) [2].

Рост относительной скорости движения погруженного тела приводил к изменению поля давления вокруг него, соответственно менялся и характер волнообразования на свободной поверхности воды. Наличие рулей оказывало влияние на значения вертикальной составляющей распределения давления  $P$  вдоль нижней поверхности тела, особенно это проявлялось в кормовой оконечности модели в месте расположения оперения. Значение, равное 0, соответствовало положению мидель-шпангоута модели, а 0,5 и  $-0,5$  – положению носового и кормового перпендикуляров. Кривые распределения коэффициента  $C_p$  для модели № 1.1 строились в плоскости вдоль профиля вертикальных рулей. Сопоставление профилей гравитационных волн также показало влияние горизонтального и вертикального оперений на относительную высоту волн.

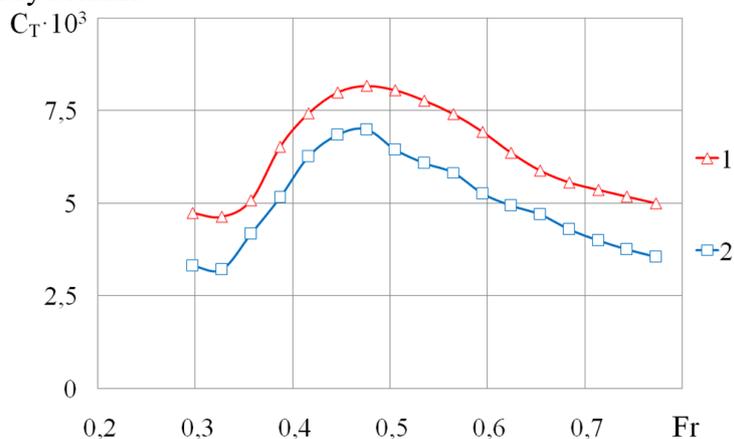
С ростом числа  $Fr$  происходило смещение положения максимума впадины гравитационной волны относительно погруженного тела, которая достигала мидель-шпангоута при  $Fr \approx 0,39$ , смещаясь за кормовую оконечность при  $Fr > 0,62$  из-за смещения области пониженного давления в корму (рис. бв).



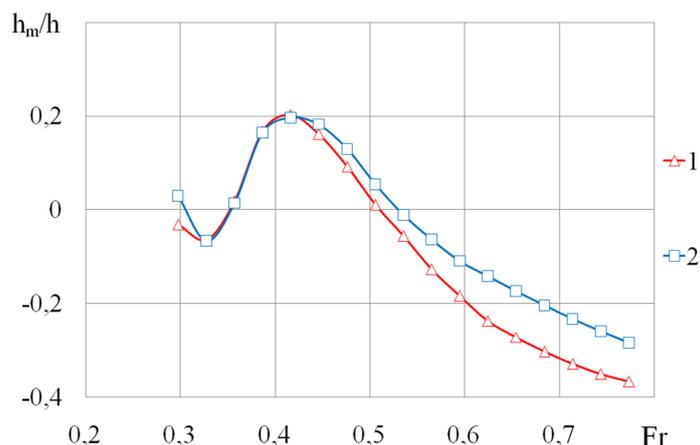
**Рис. 6. Сопоставление значений  $C_p$  и  $H^*$  моделей № 1.1 и № 1.2 (а –  $Fr = 0,3$ ; б –  $Fr = 0,39$ ; в –  $Fr = 0,62$ ): 1 –  $C_{p1.1}$ ; 2 –  $C_{p1.2}$  [2]; 3 –  $10H_{1.1}^*$ ; 4 –  $10H_{1.2}^*$  [2]**

Наличие рулей приводило к росту области низкого давления в кормовой оконечности модели № 1.1 по сравнению с моделью № 1.2 (рис. 6). В результате составляющая  $R_V$  сопротивления тела возрастала примерно на 6%. Отметим, что аналогичные результаты были получены при увеличении площади смоченной поверхности тела на 4,3% за счет моделирования рубки и рулей в корме [17], что также приводило к росту  $R_V$  примерно на 6% по сравнению с корпусом, не имеющим выступающих частей. Значения полного сопротивления  $R_T$  и коэффициента  $C_T$  возрастали в среднем на 25%, что несколько больше, чем результаты работы, где рост  $R_T$  составил в среднем 16% [14] (рис. 7).

Кривые зависимостей относительной величины вертикального перемещения моделей  $h_m/h$  (рис. 8), возникающего под воздействием подъемной силы  $F_Z$ , сравнивались с теоретическими зависимостями коэффициента  $C_Y$ . Случай  $h_m/h = 0$  соответствовал первоначально заданной величине заглубления.

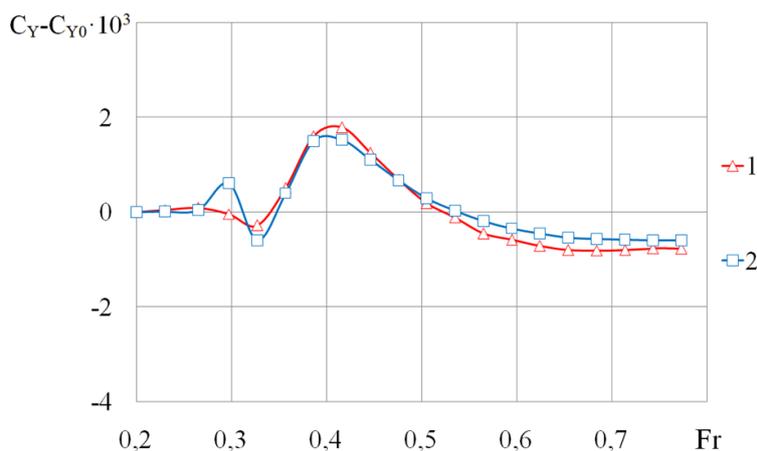


**Рис. 7. Зависимости  $C_T$  от  $Fr$ : 1 – модель № 1.1; 2 – модель № 1.2**



**Рис. 8. Зависимости  $h_m/h$  от  $Fr$ :  
1 – модель № 1.1; 2 – модель № 1.2 [2]**

Предварительные расчеты показали, что при малой скорости движения тела  $u \rightarrow 0$ , значение  $C_Y$  стремилось к ненулевому значению  $C_{Y0}$ , что согласуется с результатами движения сферы в жидкости вблизи свободной поверхности воды или под слоем битого льда [15]. При малой скорости движения модели величина  $h_m$  практически не изменялась относительно значения  $h$ , поэтому при сопоставлении зависимостей  $h_m/h$  брались кривые  $C_Y$  за вычетом значения  $C_{Y0}$  (рис. 9).

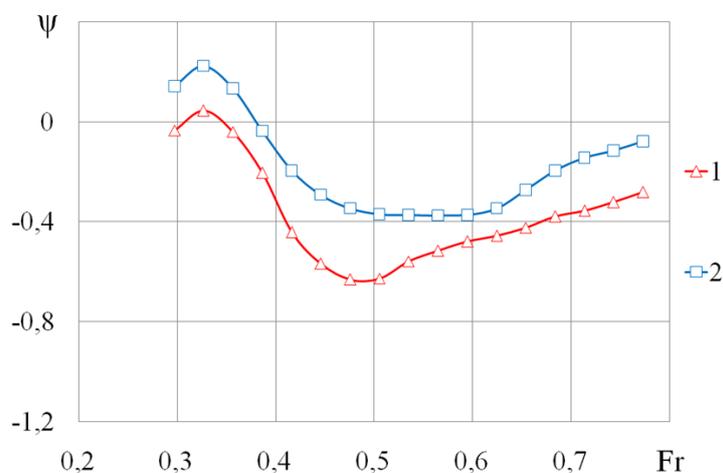


**Рис. 9. Зависимости  $C_Y - C_{Y0}$  от  $Fr$ :  
1 – модель № 1.1; 2 – модель № 1.2**

Полученные кривые имели сложный характер. При  $Fr > 0,3$  для модели № 1.2 наблюдался первый локальный максимум значений  $h_m/h$  и  $C_Y - C_{Y0}$ , который отсутствовал при движении модели № 1.1. В результате модель № 1.2 сильнее притягивалась к поверхности, что также приводило к генерации гравитационных волн с большей амплитудой (см. рис. 6а). 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  $Fr \approx 0,42$ . Из графиков видно, что наличие оперения в кормовой оконечности модели № 1.1 приводило к росту подъемной силы  $F_Z$ . В результате модель № 1.1 сильнее притягивалась к поверхности воды, чем модель № 1.2. Расстояние между моделью и поверхностью было минимальным. При  $Fr > 0,42$  подъемная сила начинала отталкивать тело вниз. Наличие рулей, увеличивавших площадь смоченной поверхности тела, приводило к значительно большему воздействию  $F_Z$  на модель № 1.1. Относительное перемещение  $h_m/h$ , как и значения  $C_Y - C_{Y0}$ , возрастали по сравнению с моделью № 1.2. Значение  $h_m$  ста-

новилось 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  $C_Y - C_{Y0}$ . Стоит отметить, что кривые, показанные на рис. 8, 9, полностью совпадали как по характеру, так и по расположению локальных максимумов.

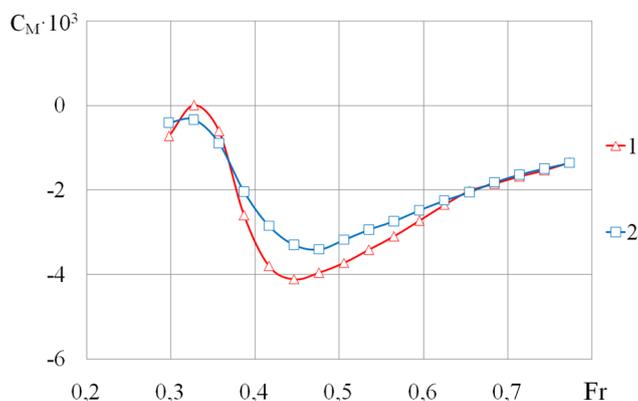
Также при движении моделей наблюдался дифферент, возникший от воздействия гидродинамического момента, угол  $\psi$  которого менялся в зависимости от числа  $Fr$  (рис. 10). Для модели № 1.2 в диапазоне  $0,3 < Fr < 0,39$  фиксировался дифферент на корму. При  $Fr > 0,39$  модель двигалась с дифферентом на нос. Максимальные значения  $\psi$  фиксировались при  $Fr \approx 0,51$ . Наличие рулей у модели № 1.1 приводило к росту угла  $\psi$  (рис. 10) по сравнению с моделью № 1.2. Дифферент на корму модель № 1.1 приобретала только при  $Fr = 0,33$ . При всех остальных значениях  $Fr$  модель испытывала дифферент на нос. Максимальные значения угол  $\psi$  приобретал при  $Fr = 0,48$ . В целом зависимости полностью повторяли характер друг друга со значительным ростом значений  $\psi$  у модели № 1.1.



**Рис. 10. Зависимости  $\psi$  от  $Fr$ :  
1 – модель № 1.1; 2 – модель № 1.2**

При движении модели № 1.1 существенно возрастали и значения гидродинамического момента, особенно в диапазоне  $0,39 < Fr < 0,6$  (рис. 11), что также хорошо согласуется с результатами рис. 10.

При движении с относительной скоростью  $Fr > 0,6$  существенной разницы между значениями  $C_M$  не наблюдалось. Максимум коэффициента  $C_M$  фиксировался при меньших числах  $Fr$ , чем максимум угла дифферента  $\psi$ , и для модели № 1.1 составил  $Fr = 0,45$ , а для модели № 1.2 –  $Fr = 0,48$ .



**Рис. 11. Зависимости  $C_M$  от  $Fr$ :  
1 – модель № 1.1; 2 – модель № 1.2 [2]**

## Заключение

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 выступающие части в виде горизонтальных и вертикальных рулей в кормовой оконечности при его движении вблизи свободной поверхности воды с различной скоростью.

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

Путем сопоставления полученных данных с ранее опубликованными авторами результатами для аналогичной модели тела без выступающих частей показано существенное влияние рулей на исследуемые параметры. Установлено, что наличие оперения приводило к росту области низкого давления в кормовой оконечности модели № 1.1, в результате чего сопротивление трения  $R_V$  возрастало на 6%, а значения полного сопротивления  $R_T$  возрастали в среднем на 25%. Также наблюдался рост  $F_Z$ , в результате чего модель № 1.1 сильнее притягивалась к поверхности воды при  $Fr \approx 0,42$ , а при больших относительных скоростях движения сильнее отталкивалась от поверхности, чем модель № 1.2. Существенное влияние наличие рулей оказывало и на угол дифферента модели при ее движении, и на значения гидродинамического момента.

## Финансирование

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

Заявленный вклад авторов: Земляк В.Л. – подготовка рукописи, проведение модельных исследований; Васильев А.С. – разработка численной модели и проведение численного моделирования; Козин В.М. – организация модельного эксперимента; Бабичева Е.Г. – обработка результатов экспериментов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М. Движение погруженного тела вблизи свободной поверхности жидкости // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2020. № 4(45). С. 16–25. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-4-2
2. Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М., Чингалаев С.А. Движение погруженного тела в приповерхностной водной среде при малой глубине дна // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2022. № 4(53). С. 13–22. DOI: 10.24866/2227-6858/2022-4/13-22
3. 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
4. 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
5. Carrica P., Kim Y., Martin J. Near-surface self propulsion of a generic submarine in calm water and waves. *Ocean Engineering*. 2019;(183):87–105. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.04.082
6. Chen Q., Li H., Zhang S., Wang J., Pang Y., Wang Q. Effect of Waves on the Behavior of Emergent Buoyantly Rising Submarines Using CFD. *Applied Sciences*. 2020;10(23):8403. DOI: 10.3390/app10238403.
7. Dawson E. An investigation into the effects of submergence depth, speed and hull length-to-diameter ratio on the near-surface operation of conventional submarines. PhD thesis, University of Tasmania, Hobart, Australia, 2014, 214 p. URL: <https://eprints.utas.edu.au/22368/1/Whole-Dawson-thesis.pdf> – 21.05.2023.
8. Divsalar K. Improving the hydrodynamic performance of the SUBOFF bare hull model: a CFD approach. *Acta Mechanica Sinica*. 2020;36(1):44–56. DOI: 10.1007/s10409-019-00913-7

9. Gertler M. Resistance Experiments on a Systematic Series of Streamlined Bodies of Revolution – For Application to the Design of High-Speed Submarines. Washington D.C.: Navy Department: The David W. Taylor Model Basin, 1950, 144 p.
10. Hama F., Long J., Hegarty J. On Transition from Laminar to Turbulent Flow. *Journal of Applied Physics*, 1957;(28):388–394. DOI: 10.1063/1.1722760
11. Klamo J., Yeager K., Cool C., Turner T., Kwon Y. The Effects of Cross-Sectional Geometry on Wave-Induced Loads for Underwater Vehicles. *IEEE Journal Ocean Engineering*. 2021;(46):765–784. DOI: 10.1109/JOE.2020.3023320
12. Kormilitsin Y., Khalizev O. Theory of Submarine Design. Saint-Petersburg, Russia, Saint-Petersburg State Maritime Technical University. 2001. 335 p. URL: <https://ru.scribd.com/doc/86467251/Theory-of-Submarine-Design> – 21.05.2023.
13. Liu T.-L., Guo Z.-M. Analysis of wave spectrum for submerged bodies moving near the free surface. *Ocean Engineering*. 2013;(58):239–251. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2012.10.003
14. Shariati S., Mousavizadegan H. The effect of appendages on the hydrodynamic characteristics of an underwater vehicle near the free surface. *Applied Ocean Research*. 2017;(67):31–43. DOI: 10.1016/j.apor.2017.07.001
15. Sturova I. Unsteady three-dimensional sources in deep water with an elastic cover and their applications. *Journal Fluid Mechanics*. 2013;(730):392–418. DOI: 10.1017/jfm.2013.303
16. 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. DOI: 10.1007/s40722-022-00261-y
17. Zhang Z., Guo L., Wei P., Wang X., Feng D. Numerical Simulation of Submarine Surfacing Motion in Regular Waves. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. 2020;(44):359–372. DOI: 10.1007/s40997-018-0259-5

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2023. N 3/56

*Theory of the Ship and Construction Mechanics*

[www.dvfu.ru/en/vestnikis](http://www.dvfu.ru/en/vestnikis)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-3/3-14>

Zemlyak V., Vasilyev A., Kozin V., Babicheva E.

VITALIY L. ZEMLYAK, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Ice technology Laboratory, [vellkom@list.ru](mailto:vellkom@list.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3218-5738>  
 ALEXEY S. VASILYEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technical Disciplines, [vasil-grunt@mail.ru](mailto:vasil-grunt@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7783-0000>  
*Sholom-Aleichem Priamursky State University*  
 Birobidzhan, Russia

VICTOR M. KOZIN, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Researcher of the Laboratory for Problems of Creation and Processing of Materials and Products, [vellkom@list.ru](mailto:vellkom@list.ru)  
*Institute of Machine Science and Metallurgy FEB RAS*

ELENA G. BABICHEVA, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Information Technology, Mathematics and Physics  
[steinbockh@mail.ru](mailto:steinbockh@mail.ru)

*Amur Humanitarian Pedagogical State University*  
 Komsomolsk-on-Amur, Russia

### **Influence of horizontal and vertical rudders on the nature of the movement of a submerged body in a near-surface water environment**

**Abstract.** The study carried out an experimental and theoretical analysis of the influence of protruding parts in the form of aft plumage located in the horizontal and vertical planes on the nature of the movement of a submerged body in the near-surface aquatic environment and its hydrodynamic characteristics. For the first time, experimentally on the basis of the experimental tank, the dependences of the vertical displacement of the

body arising under the influence of the lifting force were obtained, and the trim angles of the model were determined when it moved at different speeds. A numerical calculation method is proposed, developed on the basis of the ANSYS 19 R2 Academic Research software package (PC), which makes it possible to determine the nature of wave formation on the water surface, the forces and hydrodynamic moment acting on a body with rudders installed in the aft end from the liquid side when it moves in near-surface water environment at different speeds. The obtained results were compared with the data for a similar body model, without plumage. A significant influence on the dependences of the parameters of the protruding parts under study has been established. The presence of rudders led to an increase in frictional resistance and total drag. An increase in the lifting force acting on the body was also observed, as a result of which the model was more strongly attracted to the water surface at  $Fr \approx 0.42$ , and at high relative speeds of movement, it was stronger repelled from the surface than the model without plumage. The presence of rudders had a significant effect on the trim angle of the model, and on the values of the hydrodynamic moment.

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

**For citation:** 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;(3):3–14. (In Russ.).

Contribution of the authors: Zemlyak V.L. – preparation of the manuscript, conducting model studies; Vasiliev A.S. – development of a numerical model and carrying out numerical simulations; Kozin V.M. – organization of a model experiment; Babicheva E.G. – processing of experimental results. The authors declare no conflict of interests.

## REFERENCES

1. 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;(4):16–25. (In Russ.). DOI: 10.24866/2227-6858/2020-4-2
2. Zemlyak V., Vasilyev A., Kozin V., Chingalaev S. Movement of an immersed body in a near-surface water environment at a shallow bottom. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):13–22. (In Russ.). DOI: 10.24866/2227-6858/2022-4/13-22
3. Zemlyak V., Kozin V. Ice tank of laboratory ice technology. *Vestnik Quart. Journal of Amur State University after Sholom-Aleichem*. 2021;(42):19–31. (In Russ.). DOI: 10.24412/2227-1384-2021-142-19-31
4. Zemlyak V., Kozin V., Vasilyev A. Effect of submerged body shape upon its movement pattern near free surface. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2021;(4):35–42. (In Russ.). DOI: 10.24937/2542-2324-2021-4-398-35-42
5. Carrica P., Kim Y., Martin J. Near-surface self propulsion of a generic submarine in calm water and waves. *Ocean Engineering*. 2019;(183):87–105. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.04.082
6. Chen Q., Li H., Zhang S., Wang J., Pang Y., Wang Q. Effect of Waves on the Behavior of Emergent Buoyantly Rising Submarines Using CFD. *Applied Sciences*. 2020;10(23):8403. DOI: 10.3390/app10238403
7. Dawson E. An investigation into the effects of submergence depth, speed and hull length-to-diameter ratio on the near-surface operation of conventional submarines. PhD thesis, University of Tasmania, Hobart, Australia, 2014, 214 p. URL: <https://eprints.utas.edu.au/22368/1/Whole-Dawson-thesis.pdf> – 21.05.2023.
8. Divsalar K. Improving the hydrodynamic performance of the SUBOFF bare hull model: a CFD approach. *Acta Mechanica Sinica*. 2020;36(1):44–56 DOI: 10.1007/s10409-019-00913-7
9. Gertler M. Resistance Experiments on a Systematic Series of Streamlined Bodies of Revolution – For Application to the Design of High-Speed Submarines. Washington D.C.: Navy Department: The David W. Taylor Model Basin, 1950, 144 p.
10. Hama F., Long J., Hegarty J. On Transition from Laminar to Turbulent Flow. *Journal of Applied Physics*, 1957;(28):388–394. DOI: 10.1063/1.1722760
11. Klamo J., Yeager K., Cool C., Turner T., Kwon Y. The Effects of Cross-Sectional Geometry on Wave-Induced Loads for Underwater Vehicles. *IEEE Journal Ocean Engineering*. 2021;(46):765–784. DOI: 10.1109/JOE.2020.3023320

12. Kormilitsin Y., Khalizev O. *Theory of Submarine Design*. Saint-Petersburg, Russia, Saint-Petersburg State Maritime Technical University. 2001. 335 p. URL: <https://ru.scribd.com/doc/86467251/Theory-of-Submarine-Design> – 21.05.2023.
13. Liu T.-L., Guo Z.-M. Analysis of wave spectrum for submerged bodies moving near the free surface. *Ocean Engineering*. 2013;(58):239–251. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2012.10.003
14. Shariati S., Mousavizadegan H. The effect of appendages on the hydrodynamic characteristics of an underwater vehicle near the free surface. *Applied Ocean Research*. 2017;(67):31–43. DOI: 10.1016/j.apor.2017.07.001
15. Sturova I. Unsteady three-dimensional sources in deep water with an elastic cover and their applications. *Journal Fluid Mechanics*. 2013;(730):392–418. DOI: 10.1017/jfm.2013.303
16. 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. DOI: 10.1007/s40722-022-00261-y
17. Zhang Z., Guo L., Wei P., Wang X., Feng D. Numerical Simulation of Submarine Surfacing Motion in Regular Waves. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. 2020;(44):359–372. DOI: 10.1007/s40997-018-0259-5