

Теория корабля и строительная механика

Научная статья

УДК 532.3; 532.5; 629.585

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/13-22>

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

ЗЕМЛЯК ВИТАЛИЙ ЛЕОНИДОВИЧ – к.ф.-м.н., доцент, vellkom@list.ru,

<http://orcid.org/0000-0002-3218-5738>

ВАСИЛЬЕВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ – к.т.н., доцент, vasil-grunt@mail.ru,

<http://orcid.org/0000-0001-7783-0000>

ЧИНГАЛАЕВ СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ – аспирант, vellkom@list.ru,

Кафедра технических дисциплин

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*

Комсомольск-на-Амуре, Россия

Движение погруженного тела в приповерхностной водной среде при малой глубине дна

Аннотация. Силы и моменты, действующие на погруженное тело со стороны жидкости, существенно влияют на характер его движения. Значительное влияние на рассматриваемые параметры может оказывать глубина акватории, в которой перемещается тело. Несмотря на важность исследования этих параметров, отвечающих за безопасность и маневренность подводного аппарата, теоретических и особенно экспериментальных работ по данной тематике практически не встречается. В данной статье авторами предложен алгоритм, разработанный на базе программного комплекса ANSYS 19 R2 Academic Research, который позволяет определять силы и моменты, действующие на погруженное тело асимметричной формы во время его движения в приповерхностной водной среде с различной скоростью при ограниченной глубине дна. Выполнено сопоставление полученных результатов с данными модельных экспериментов. Установлено влияние глубины акватории на зависимости исследуемых параметров.

Ключевые слова: погруженное тело, подъемная сила, гидродинамический момент, свободная поверхность, глубина дна

Для цитирования: Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М., Чингалаев С.А. Движение погруженного тела в приповерхностной водной среде при малой глубине дна. 2022. № 4(53). С. 13–22.

Введение

В последние годы растет интерес к исследованиям, связанным с движением погруженных тел вблизи свободной поверхности жидкости. Это обусловлено как расширением числа тактических задач и маневров, выполняемых подводными аппаратами, так и ростом скорости их движения на малых заглублениях. Известно, что при движении погруженного тела на малой глубине в результате перераспределения давления вдоль его корпуса на поверхности жидкости генерируются гравитационные волны [10]. Генерация поверхностных волн приводит к росту силы сопротивления, испытываемого телом [9, 13]. Однако помимо волнового сопротивления

R_x на подводный аппарат, движущийся вблизи свободной поверхности, действуют также подъемная сила F_z и гидродинамический момент M_y . В связи с этим все большее внимание уделяется оценке влияния различных факторов на гидродинамику погруженного тела. С помощью математических методов было исследовано влияние заглубления, скорости движения, относительного удлинения и коэффициента продольной полноты на силы и моменты, действующие на погруженное тело [4, 8, 11, 12, 14]. К. Divsalar [6] выполнил оценку влияния формы носовой и кормовой оконечности тела на исследуемые параметры. Особый интерес представляет работа Dawson [5], где в ходе экспериментального и численного моделирования показано, что сопротивление, подъемная сила и гидродинамический момент изменяются в зависимости от числа Фруда $Fr = \frac{u}{\sqrt{gL}}$ (где u – скорость движения, g – ускорение свободного падения, L – длина погруженного тела) и напрямую зависят от длины гравитационных волн, генерируемых на свободной поверхности жидкости от движения погруженного тела. Dawson установил, что при движении влияние волнового сопротивления вторично, а наибольшее эксплуатационное значение приобретают подъемная сила и гидродинамический момент, вызывающий дифферент судна. Очевидно, что значения сил и моментов уменьшаются с ростом заглубления тела, однако вопрос влияния глубины акватории на исследуемые параметры остается открытым.

Целью работы было экспериментально-теоретическое исследование зависимости R_x , F_z и M_y погруженного тела от глубины акватории.

Подготовка к проведению модельных и численных экспериментов

Модельные эксперименты проводились на базе опытового бассейна лаборатории ледотехники (Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, г. Биробиджан) [3] в январе–феврале 2022 г. Для экспериментов использовалась модель погруженного тела ассиметричной формы круглого сечения с цилиндрической вставкой и относительным удлинением $L^* = L/D = 8,4$ при $L = 1,154$ м (где D – диаметр). Модель была изготовлена посредством послойной печати на принтере Raise3D. Теоретический чертеж погруженного тела выполнен в AutoCAD 2019 (рис. 1). Моделирование турбулентного режима течения в пограничном слое осуществлялось с помощью искусственного турбулизатора в виде полосы Нама [7], расположенной на расстоянии $0,05L$ от носового перпендикуляра. С учетом длины модели особенностями ее изготовления и требуемой высотой турбулизатора полоса Нама оказалась оптимальным решением, обеспечивающим достаточный уровень устойчивого турбулентного потока при минимальном увеличении сопротивления по сравнению с эквивалентными ей проволоочными турбулизаторами. Коэффициент полноты мидель-шпангоута для модели равнялся $\beta = 0,785$, коэффициент общей полноты – $\delta = 0,673$.

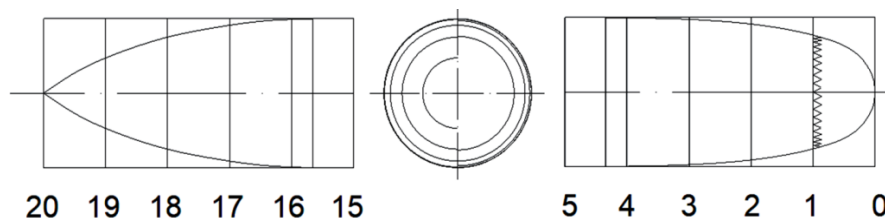


Рис. 1. Теоретический чертеж модели погруженного тела
Здесь и далее иллюстрации В.Л. Земляка

Геометрическая форма и размеры модели тела полностью соответствовали модели, использованной в работе [1]; там же описаны особенности и методика проведения модельных экспериментов для определения относительного вертикального перемещения тела $h^* = (h_b - h)/h$ (где h_b – отклонение модели от первоначально заданного заглубления h) под воздействием подъемной силы F_z . Выполнена оценка сопоставления полученных результатов с данными известных исследований для случая глубокой воды.

Для проведения настоящего исследования в бассейне дополнительно на специальных вертикальных подъемниках были установлены четыре секции подвешного дна, которые моделировали заданную глубину акватории $H_b=2,9D$. Схема проведения эксперимента показана на рис. 2, размеры указаны в метрах. Величина первоначально заданного заглубления моделей равнялась $h_1=1,16D$ и $h_2=1,45D$, скорость движения – $Fr=0,3-0,77$.

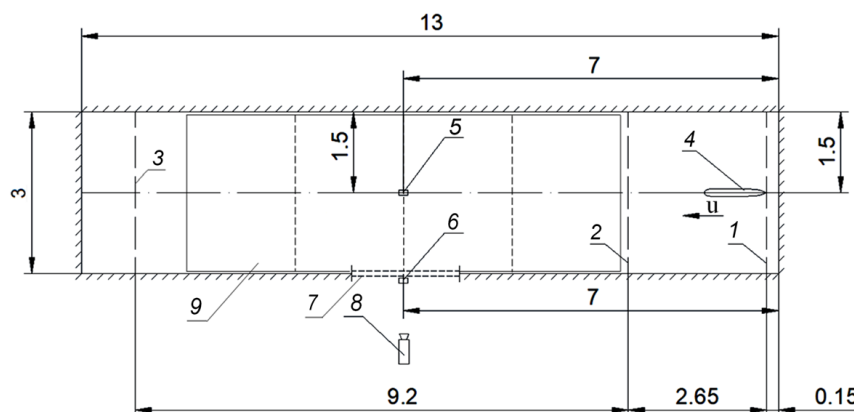


Рис. 2. Схема проведения эксперимента (вид сверху):

- 1 – линия начала движения модели; 2 – линия окончания разгонного участка;**
- 3 – линия окончания стационарного участка движения; 4 – модель погруженного тела;**
- 5 – датчик перемещений; 6 – датчик скорости; 7 – водонепроницаемое окно;**
- 8 – камера высокого разрешения; 9 – секции двойного дна**

Численное моделирование движения тела в условиях ограниченной глубины акватории осуществлялось с помощью математической модели, разработанной авторами в программном комплексе ANSYS 19 R2 Academic Research и подробно описанной в работе [2]. В целях решения поставленных в исследовании задач модель была доработана для учета глубины дна и его влияния на результаты гидродинамических расчётов. На рис. 3 показана дискретизация модели объекта в водной среде. 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.

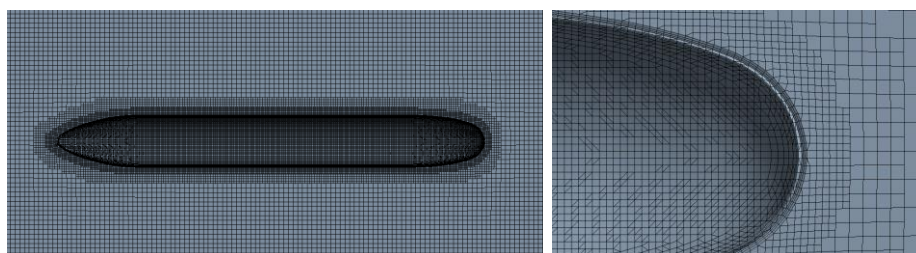


Рис. 3. Дискретная модель объекта в водной среде

Расчеты выполнялись в стационарном решателе stationary с применением моделей Volume of Fluid и k-ε – модели турбулентности. На рис. 4 представлена граница раздела сред. Нижняя зона расчётной области, характеризующая дно, имела тип wall. Скорость судна задавалась при помощи расхода воды Mass-flow-inlet. В верхней расчетной области находилась воздушная среда, в нижней – водная среда. Каждой среде задавались соответствующие свойства: плотность и вязкость.

Численная модель полностью повторяла параметры модельного эксперимента. Предложенный алгоритм позволял моделировать волнообразование на свободной поверхности жидкости от движения погруженного тела. Определялись давление P , полное сопротивление, из которого находились R_x , значение подъемной силы F_z и гидродинамический момент M_y . На основе полученных значений строилась зависимость вертикальной составляющей

распределения давления вдоль нижней поверхности погруженного тела в виде коэффициента $C_p = \frac{P-P_\infty}{0,5\rho u^2}$ (где ρ – плотность жидкости), зависимость коэффициента волнового сопротивления $C_w = \frac{R_w}{0,5\rho u^2 S}$ (где ρ – плотность-жидкости, S – площадь смоченной поверхности), зависимость коэффициента подъемной силы $C_F = \frac{F_z}{0,5\rho u^2 S}$ и коэффициента гидродинамического момента $C_M = \frac{M_y}{0,5\rho u^2 S L}$. 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.

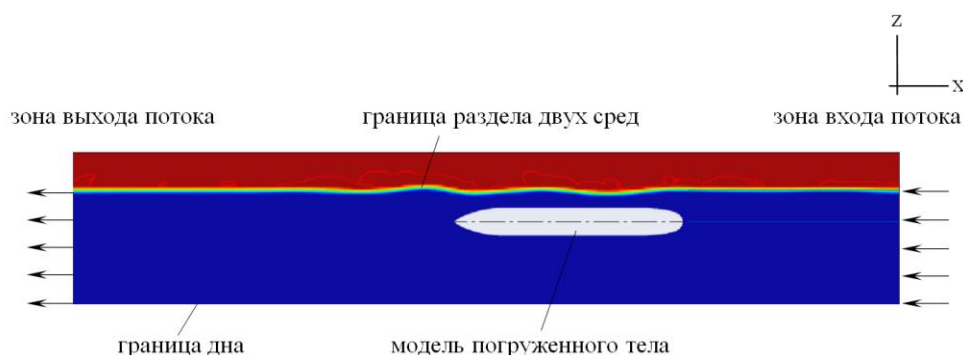


Рис. 4. Граничные условия модели

Основные результаты модельных и численных экспериментов

На первом этапе исследования для оценки работоспособности предложенного численного алгоритма было выполнено сопоставление полученных результатов модельных экспериментов и теоретических расчетов значений относительной величины максимальной высоты поверхностных волн H/L (рис. 5). Из рисунка следует, что для обоих выбранных заглублений получена достаточно хорошая сходимость. Расхождения между значениями не превышали 5%. Максимальное значение H/L принимало при скорости движения тела $Fr=0,46$.

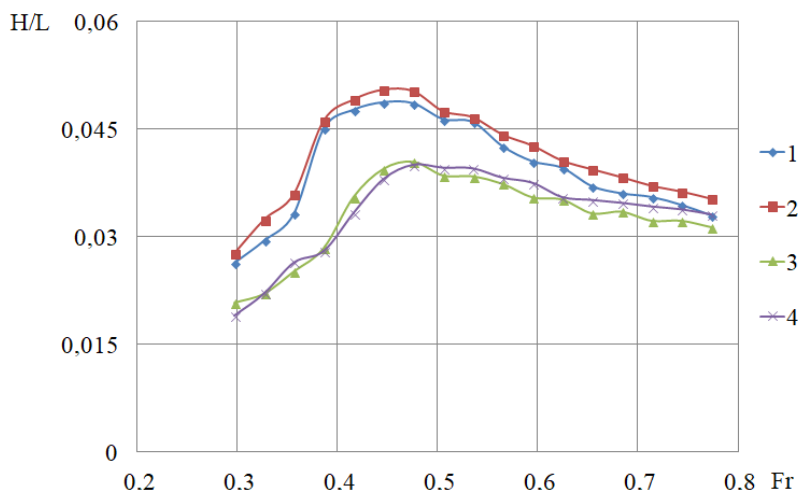


Рис. 5. Зависимости максимальных значений H/L от скорости движения погруженного тела: 1 – $h_1=1,16D$ (эксперимент); 2 – $h_1=1,16D$ (численный расчет); 3 – $h_2=1,45D$ (эксперимент); 4 – $h_2=1,45D$ (численный расчет)

Рост скорости движения приводил к изменению поля давления, окружающего тело. В результате форма профилей генерируемых поверхностных волн существенно изменялась (рис. 6). Стоит отметить, что при $0,3 < Fr < 0,51$ разница между значениями H/L и C_p для h_1 и h_2

возрастала (рис. 6 а, б). При $Fr > 0,51$ разница начинала снижаться, а второй гребень гравитационной волны значительно смещался за кормовую оконечность погруженного тела (рис. 6 в). Чаша прогиба с ростом числа Fr смещалась от мидель-шпангоута при $Fr = 0,36$ до кормового перпендикуляра при $Fr = 0,6$, в кормовую оконечность при более высоких скоростях. Разница между значениями H/L и C_p для h_1 и h_2 при $Fr > 0,65$ становилась крайне незначительной (рис. 6 г). Смещение фазы гравитационной волны происходило в результате смещения области пониженного давления в корму тела (рис. 6).

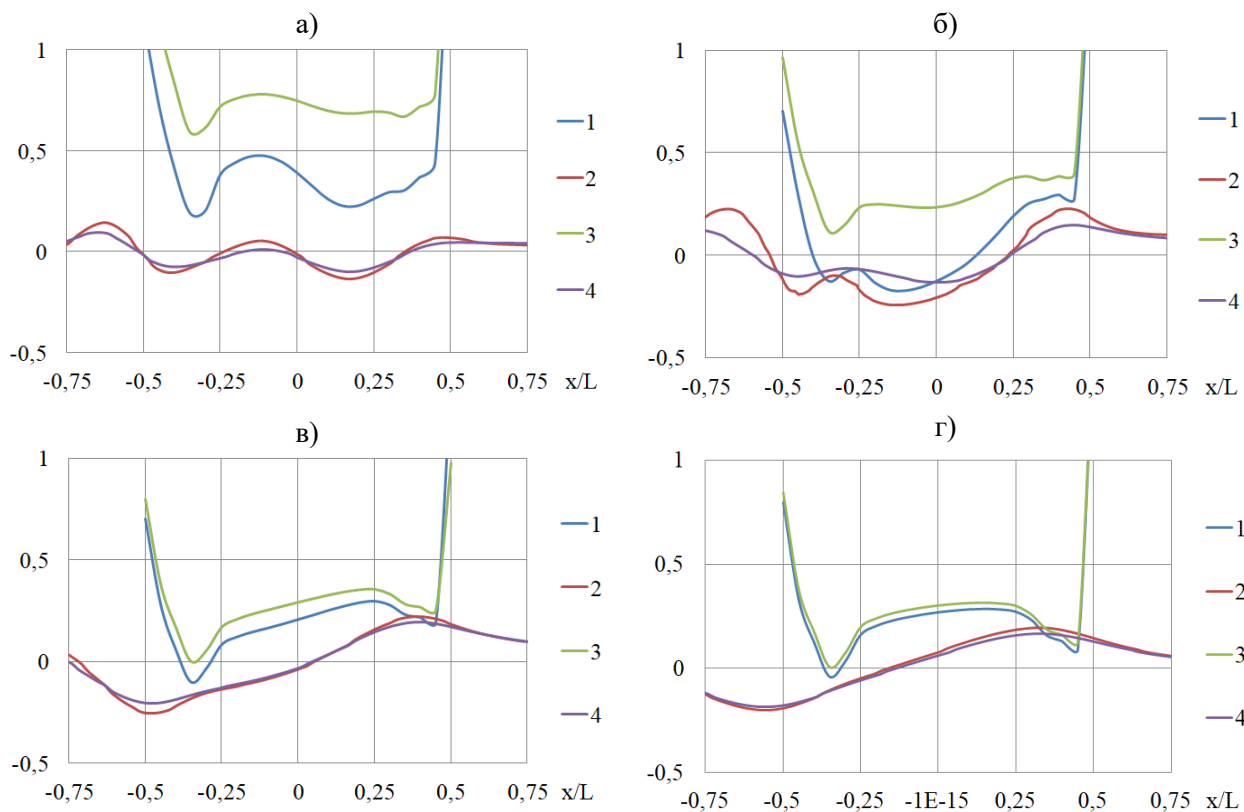


Рис. 6. Сопоставление значений коэффициента C_p и профилей гравитационных волн для различных скоростей движения модели (а – $Fr=0,3$; б – $Fr=0,39$; в – $Fr=0,51$; г – $Fr=0,65$): 1 – C_p ($h_1=1,16D$); 2 – $H/L \cdot 10$ ($h_1=1,16D$); 3 – C_p ($h_2=1,45D$); 4 – $H/L \cdot 10$ ($h_2=1,45D$)

Результаты численного моделирования показали, что движение в условиях малой глубины акватории ($H_b=2,9D$) приводило к значительному росту значения коэффициента волнового сопротивления C_w по сравнению с данными для глубокой воды ($H_b=7,5D$), особенно это было заметно в диапазоне скоростей $0,33 < Fr < 0,51$ (рис. 7). Изменялся характер волнообразования, а значение критической скорости волнового сопротивления, то есть скорости, при которой C_w приобретало максимальные значения, сдвигалось в область меньших скоростей $Fr=0,42$ при $h_1=1,16D$ и $Fr=0,45$ при $h_2=1,45D$ по сравнению со случаем большой глубины дна $Fr=0,45$ и $Fr=0,48$ соответственно.

Неравномерное распределение давления по верхней и нижней поверхностям погруженного тела приводило к возникновению вертикальной подъемной силы F_z , которая оказывала значительное влияние на характер движения тела. Численные эксперименты показали, что при скорости движения погруженного тела $u \rightarrow 0$ значение C_F стремится к ненулевому значению C_{F0} , что согласуется с результатами работы [15]. Поэтому на рис. 8 изображены зависимости коэффициента C_F за вычетом значения C_{F0} , а также приведены значения для случая $H_b=7,5D$.

Как и для коэффициента волнового сопротивления, наблюдалось резкое увеличение значений $C_F - C_{F0}$ ($H_b=2,9D$) в области локального максимума при $Fr=0,39$ по сравнению с $C_F - C_{F0}$ ($H_b=7,5D$) при $h_1=1,16D$ (рис. 8). В случае малой глубины дна подъемная сила действовала

значительно сильнее, что также подтверждается экспериментальными зависимостями относительного перемещения h^* модели тела при движении с различной скоростью (рис. 9). При $h_2=1,45D$ значения C_F-C_{F0} при скоростях $0,3 < Fr < 0,39$ для всех случаев различались незначительно. При $0,39 < Fr < 0,77$, когда погруженное тело начинало смещаться вниз от поверхности жидкости, наличие дна оказывало существенное влияние на величины C_F-C_{F0} и h^* . Значения исследуемых параметров возрастали.

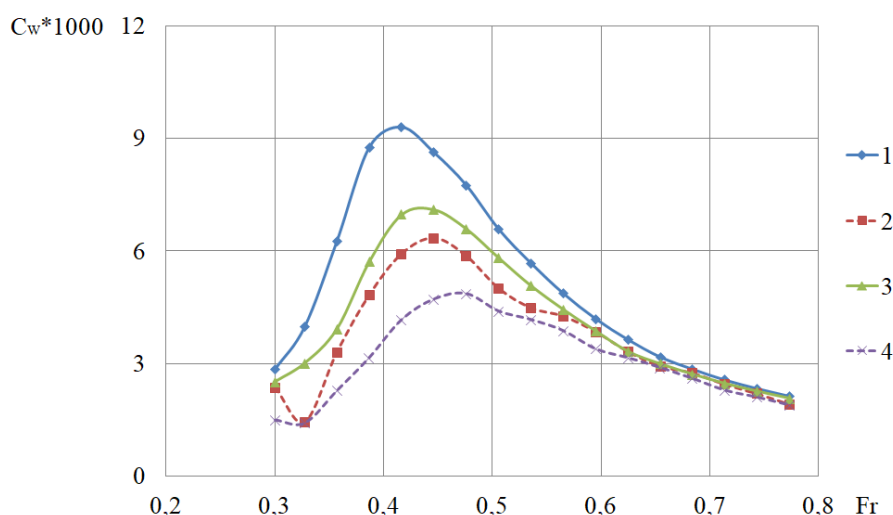


Рис. 7. Зависимости коэффициента волнового сопротивления от скорости движения погруженного тела:
 1 – C_w при $h_1=1,16D$ ($H_b=2,9D$); 2 – C_w при $h_1=1,16D$ ($H_b=7,5D$); 3 – C_w при $h_2=1,45D$ ($H_b=2,9D$);
 4 – C_w при $h_2=1,45D$ ($H_b=7,5D$)

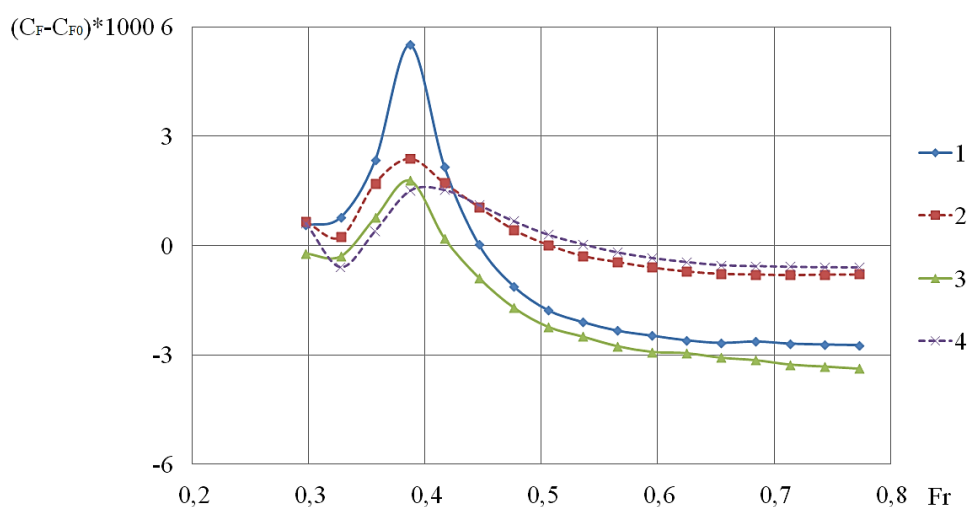


Рис. 8. Зависимости коэффициента подъемной силы от скорости движения погруженного тела:
 1 – C_F-C_{F0} при $h_1=1,16D$ ($H_b=2,9D$); 2 – C_F-C_{F0} при $h_1=1,16D$ ($H_b=7,5D$);
 3 – C_F-C_{F0} при $h_2=1,45D$ ($H_b=2,9D$); 4 – C_F-C_{F0} при $h_2=1,45D$ ($H_b=7,5D$)

Анализ кривых показал, что при $Fr \approx 0,38$ положение локального максимума C_F-C_{F0} соответствовало максимальному значению h^* . В этом случае расстояние между моделью и свободной поверхностью воды было минимальным, кормовая оконечность погруженного тела практически контактировала с поверхностью воды, проявлялся дифферент на носовую оконечность. Значение $h^*=0$ соответствовало первоначально заданной величине заглубления модели. Из полученных результатов видно, что изменение подъемной силы и относительного заглубления в момент ее воздействия при движении тела с различной скоростью имело сложный характер и достигало значительных величин.

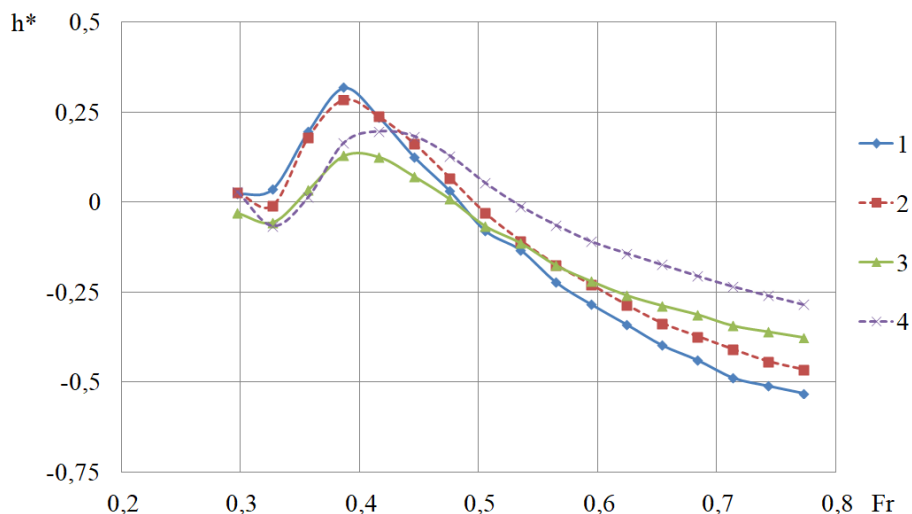


Рис. 9. Зависимости относительного вертикального перемещения модели погруженного тела от скорости движения:
 1 – h^* при $h_1=1,16D$ ($H_b=2,9D$); 2 – h^* при $h_1=1,16D$ ($H_b=7,5D$); 3 – h^* при $h_2=1,45D$ ($H_b=2,9D$);
 4 – h^* при $h_2=1,45D$ ($H_b=7,5D$)

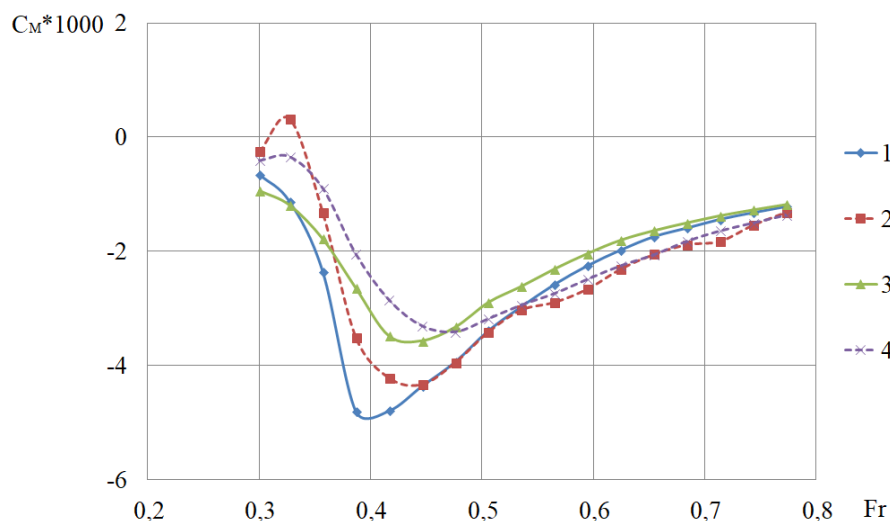


Рис. 10. Зависимости коэффициента гидродинамического момента модели погруженного тела от скорости движения:
 1 – C_M при $h_1=1,16D$ ($H_b=2,9D$); 2 – C_M при $h_1=1,16D$ ($H_b=7,5D$); 3 – C_M при $h_2=1,45D$ ($H_b=2,9D$);
 4 – C_M при $h_2=1,45D$ ($H_b=7,5D$)

С ростом скорости движения тела менялся и гидродинамический момент M_y . На рис. 10 показан сложный характер зависимостей коэффициента C_M . Локальный максимум, который виден для глубины дна $H_b=7,5D$ при $Fr=0,33$, для случая $H_b=2,9D$ не наблюдался, очевидно, смещаясь в сторону меньших значений Fr . По этой же причине в экспериментах дифферент судна на корму фиксировался только для $H_b=7,5D$. При $H_b=2,9D$ значения M_y приобретали отрицательный знак уже при $Fr=0,3$. Для обоих заглублений наблюдалось движение модели тела с дифферентом на нос. Максимальные отрицательные значения C_M для малой глубины дна фиксировались при скоростях движения $Fr=0,39$ ($h_1=1,16D$) и $Fr=0,45$ ($h_2=1,45D$), а для $H_b=7,5D$ – при $Fr=0,45$ и $Fr=0,48$ соответственно. При $Fr>0,6$ характер кривых и значения C_M практически совпадали (рис. 10).

Заключение

Предложено численное решение, разработанное на базе программного комплекса ANSYS 19 R2 Academic Research, позволяющее определять силы и моменты действующей на

погруженное тело ассиметричной формы круглого сечения с цилиндрической вставкой и относительным удлинением $L^*=8,4$ при его движении вблизи свободной поверхности жидкости с различной скоростью при ограниченной глубине дна. Работоспособность алгоритма проверена путем сопоставления полученных результатов с данными модельных экспериментов.

Получены зависимости коэффициентов волнового сопротивления, подъемной силы и гидродинамического момента от скорости движения и заглубления погруженного тела для малой глубины акватории $H_b=2,9D$. Экспериментально определена величина относительного перемещения тела, возникающего под воздействием F_z . Определено влияние глубины дна на характер полученных зависимостей, выполнено сопоставление результатов с данными для глубокой воды $H_b=7,5D$. Показано, что максимальные значения C_w , C_F-C_{F0} и C_M существенно увеличиваются при движении тела в условиях малой глубины, а их пики смещаются в сторону меньших скоростей.

Дальнейшим направлением исследования является определение влияния на исследуемые параметры сил и моментов наличия сплошного ледяного покрова на поверхности воды при движении тела с различной скоростью в условиях ограниченной глубины акватории.

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

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М. Влияние подъемной силы на характер движения погруженного тела в приповерхностной водной среде // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 2(47). С. 3–12. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-2-12
2. Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М. Движение погруженного тела вблизи свободной поверхности жидкости // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 4(45). С. 16–25. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-4-2
3. Земляк В.Л., Козин В.М. Ледовый бассейн лаборатории ледотехники // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2021. № 1(42). С. 19–31. DOI: 10.24412/2227-1384-2021-142-19-31
4. Broglia R., Di Mascio A., Muscari R. Numerical study of confined water effects on self-propelled submarine in steady manoeuvres. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. 2007;17(2):89–96.
5. 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. Ph.D. Thesis. University of Tasmania, Hobart, Australia, 2014. 214 p. URL: <https://eprints.utas.edu.au/22368/1/Whole-Dawson-thesis.pdf> – 26.07.2022.
6. 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
7. Hama F.R., Long J.D., Hegarty J.C. On transition from laminar to turbulent flow. *Journal of Applied Physics*. 1957;28(4):388–394. DOI: 10.1063/1.1722760
8. Jagadeesh P., Murali K. RANS predictions of free surface effects on axisymmetric underwater body. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2010;4(2):301–313. DOI: 10.1080/19942060.2010.11015318
9. Lighthill J.M. *Waves in Fluids*. Cambridge University Press, 1978. 504 p.
10. Maali M.A., Esperança P.T., Vitola M.A. et al. How does the free surface affect the hydrodynamics of a shallowly submerged submarine? *Applied Ocean Research*. 2018;76:34–50. DOI: 10.1016/j.apor.2018.04.008
11. Mansoorzadeh S., Javanmard E. An investigation of free surface effects on drag and lift coefficients of an autonomous underwater vehicle (AUV) using computational and experimental fluid dynamics methods. *Journal of Fluids and Structures*. 2014;51:161–171. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2014.09.001
12. Nematollahi A., Dadvand A., Dawoodian M. An axisymmetric underwater vehicle free surface interaction: a numerical study. *Ocean Engineering*. 2015;96:205–214. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.12.028

13. Raphaël E., De Gennes P.-G. Capillary gravity waves caused by a moving disturbance: wave resistance. *Physical Review E*. 1996;53(4):3448. DOI: 10.1103/PhysRevE.53.3448
14. Salari M., Rava A. Numerical investigation of hydrodynamic flow over an AUV moving in the water-surface vicinity considering the laminar-turbulent transition. *Journal of Marine Science and Application*. 2017;16(3):298–304. DOI: 10.1007/S11804-017-1422-X
15. 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;(79):170–178. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2015.07.008

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2022. N 4/53
Theory of the Ship and Construction Mechanics

www.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/13-22>

Zemlyak V., Vasilyev A., Kozin V., Chingalae V.

VITALIY L. ZEMLYAK, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, vellkom@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3218-5738>

ALEXEY S. VASILYEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, vasil-grunt@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7783-0000>

SERGEY A. CHINGALAEV, Postgraduate Student, vellkom@list.ru

Department of Technical Disciplines

Sholom-Aleichem Priamursky State University

Birobidzhan, Russia

VICTOR M. KOZIN, Doctor of Engineering Sciences, Professor, vellkom@list.ru

Chief Researcher of the Laboratory for Problems of Creation
and Processing of Materials and Products

Institute of Machine Science and Metallurgy FEB RAS

Komsomolsk-on-Amur, Russia

Movement of an immersed body in a near-surface water environment at a shallow bottom

Abstract. The forces and moments, acting on an immersed body from the side of the liquid, have a significant effect on the nature of its motion. The depth of the water area, in which the body moves, can have a significant influence on the parameters under consideration. Despite the importance of studying these parameters, which are responsible for the safety and maneuverability of an underwater vehicle, there are practically no theoretical and especially experimental works on this topic. In this article, the authors propose an algorithm developed on the basis of the ANSYS 19 R2 Academic Research software package, which allows determining the forces and moments acting on an immersed body asymmetric shape when it moves in a near-surface aquatic environment at different speeds with a limited bottom depth. The obtained results are compared with the data of model experiments. The influence of the depth of the water area on the dependences of the studied parameters has been established.

Keywords: immersed body, lifting force, hydrodynamic moment, free surface, bottom depth

For citation: Zemlyak V., Vasilyev A., Kozin V., Chingalae V. 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.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Zemlyak V.L., Vasilyev A.S., Kozin V.M. Influence of lifting force on the nature of motion of a submerged body in a near-surface water environment. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2021;(2):3–12. (In Russ.). DOI: 10.24866/2227-6858/2021-2-1

2. Zemlyak V.L., Vasilyev A.S., Kozin V.M. The movement of a 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
3. Zemlyak V.L., Kozin V.M. Ice tank of ice technology laboratory. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. SHolom-Alejhema*. 2021;(1):19–31. (In Russ.). DOI: 10.24412/2227-1384-2021-142-19-31
4. Broglia R., Di Mascio A., Muscari R. Numerical study of confined water effects on self-propelled submarine in steady manoeuvres. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. 2007;17(2):89–96.
5. 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. Ph.D. Thesis. University of Tasmania, Hobart, Australia, 2014. 214 p. URL: <https://eprints.utas.edu.au/22368/1/Whole-Dawson-thesis.pdf> – 26.07.2022.
6. 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
7. Hama F.R., Long J.D., Hegarty J.C. On transition from laminar to turbulent flow. *Journal of Applied Physics*. 1957;28(4):388–394. DOI: 10.1063/1.1722760
8. Jagadeesh P., Murali K. RANS predictions of free surface effects on axisymmetric underwater body. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2010;4(2):301–313. DOI: 10.1080/19942060.2010.11015318
9. Lighthill J.M. *Waves in Fluids*. Cambridge University Press, 1978. 504 p.
10. Maali M.A., Esperança P.T., Vitola M.A. et al. How does the free surface affect the hydrodynamics of a shallowly submerged submarine? *Applied Ocean Research*. 2018;76:34–50. DOI: 10.1016/j.apor.2018.04.008
11. Mansoorzadeh S., Javanmard E. An investigation of free surface effects on drag and lift coefficients of an autonomous underwater vehicle (AUV) using computational and experimental fluid dynamics methods. *Journal of Fluids and Structures*. 2014;51:161–171. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2014.09.001
12. Nematollahi A., Dadvand A., Dawoodian M. An axisymmetric underwater vehicle free surface interaction: a numerical study. *Ocean Engineering*. 2015;96:205–214. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.12.028
13. Raphaël E., De Gennes P.-G. Capillary gravity waves caused by a moving disturbance: wave resistance. *Physical Review E*. 1996;53(4):3448. DOI: 10.1103/PhysRevE.53.3448
14. Salari M., Rava A. Numerical investigation of hydrodynamic flow over an AUV moving in the water-surface vicinity considering the laminar-turbulent transition. *Journal of Marine Science and Application*. 2017;16(3):298–304. DOI: 10.1007/S11804-017-1422-X
15. 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;(79):170–178. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2015