

## Теория корабля и строительная механика

Научная статья

УДК 532.3; 532.5; 629.585

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-1/30-37>

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

ЗЕМЛЯК ВИТАЛИЙ ЛЕОНИДОВИЧ – к.ф.-м.н., доцент, [vellkom@list.ru](mailto:vellkom@list.ru),

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

ВАСИЛЬЕВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ – к.т.н., доцент, [vasil-grunt@mail.ru](mailto:vasil-grunt@mail.ru),

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

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](mailto:vellkom@list.ru)

*Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН*

Комсомольск-на-Амуре, Россия

## Определение подъемной силы и гидродинамического момента при движении погруженного тела вблизи свободной поверхности жидкости

**Аннотация:** Силы и моменты, действующие на погруженное тело со стороны жидкости, могут оказывать существенное влияние на характер его движения при малом заглублении. Несмотря на важность исследования этих параметров, влияющих на обеспечение безопасности и маневренности подводного аппарата, встречается не так много теоретических и особенно экспериментальных работ по данной тематике. Авторами статьи на базе опытового бассейна впервые экспериментально определены углы дифферента модели погруженного тела, возникающие при движении в приповерхностной водной среде. С помощью программного комплекса ANSYS 19 R2 Academic Research численно определены силы и моменты, действующие на тело заданной геометрии при его движении вблизи свободной поверхности жидкости с различной скоростью. Установлено влияние на исследуемые параметры особенностей формы корпуса моделей, а именно коэффициента полноты мидель-шпангоута и коэффициента общей полноты.

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

**Для цитирования:** Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М. Определение подъемной силы и гидродинамического момента при движении погруженного тела вблизи свободной поверхности жидкости // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 1(50). С. 30–37. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-1/30-37>

### Введение

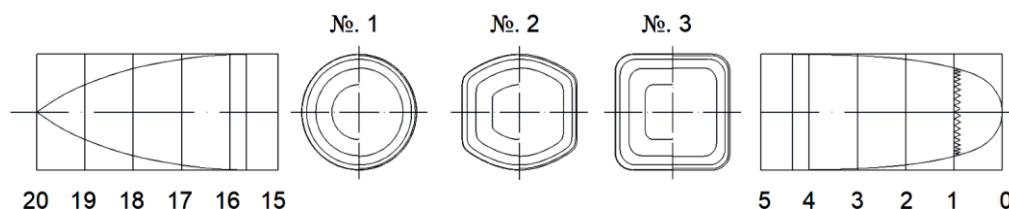
Эффективная и безопасная эксплуатация современного подводного аппарата вблизи свободной поверхности воды является сложной технической задачей. По этой причине важно иметь экспериментально подтвержденную математическую модель движения погруженного тела в приповерхностной водной среде, которая могла бы достаточно точно определять действующие на него гидродинамические силы и моменты. Реальное перемещение погруженного тела в жидкости не является поступательным, так как даже движение с постоянно заданным курсом на заданном заглублении приводит к его вращению с угловой скоростью. Ориентация

вектора скорости тела достаточно близко совпадает с направлением продольной оси, отличаюсь от него на углы атаки и дрейфа, имеющие, как правило, небольшие значения – 5–10°. При движении тела только в продольной плоскости на него действуют сила сопротивления  $R_x$ , нормальная сила  $F_z$  и гидродинамический момент  $M_y$ . В работе [4] показано, что величины  $F_z$  и  $M_y$  играют для подводных аппаратов важную роль, что имеет подтверждение и в экспериментально-теоретическом исследовании [6]. Dawson, учитывая заглубление и скорости движения современных субмарин при приповерхностной эксплуатации, установил, что при движении тела влияние волнового сопротивления вторично, а наибольшее эксплуатационное значение приобретают подъемная сила и гидродинамический момент, вызывающий дифферент судна. Тем не менее, несмотря на то что в последнее время опубликовано много исследований, посвященных определению сил, действующих на погруженное тело со стороны жидкости [8, 10, 11], работ по определению гидродинамического момента практически не встречается. Кроме экспериментально-теоретического исследования [6] известен ряд теоретических работ, посвященных данной тематике [5, 7]. Авторы используют численный метод Неймана-Кельвина для решения задачи обтекания жидкостью сфероида и асимметричного тела с различным относительным удлинением при их движении на малом заглублении. Однако современные подводные суда имеют форму поперечного сечения, которая может существенно отличаться от круговой. В работе [1] экспериментально и численно выполнен анализ характера волнообразования на поверхности воды от движения моделей погруженных тел с различными значениями коэффициента полноты мидель-шпангоута  $\beta$  и коэффициента общей полноты  $\delta$ . Экспериментально измерена величина вертикального перемещения тела от воздействия подъемной силы, определена зависимость коэффициента волнового сопротивления для моделей с заданными характеристиками.

Целью нашей работы является экспериментально-теоретическое исследование влияния подъемной силы и гидродинамического момента на характер движения погруженного тела с различной формой поперечного сечения вблизи свободной поверхности жидкости.

### Подготовка к проведению модельных и численных экспериментов

Модельные эксперименты проходили в августе–октябре 2021 г. на базе опытового бассейна лаборатории ледотехники (ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема», г. Биробиджан) [3]. Для экспериментов использовались три модели тел асимметричной формы с цилиндрической вставкой и относительным удлинением  $L^* = L_m/D_m = 8,4$  (где  $L_m$  – длина модели, равная 1,154 м;  $D_m$  – ширина модели). Модели изготавливались с помощью послойной печати на принтере Raise3D (рис. 1). В связи с тем, что буксировочная система не позволяла испытывать модели значительной длины на основании работы [9], для моделирования турбулентного режима течения в пограничном слое с учетом  $L_m$  были использованы искусственные турбулизаторы в виде полос Нама. Коэффициент полноты мидель-шпангоута для модели № 1 равнялся  $\beta_1 = 0,785$ , для модели № 2 –  $\beta_2 = 0,867$ , для модели № 3 –  $\beta_3 = 0,984$ . Коэффициент общей полноты соответственно  $\delta_1 = 0,673$ ,  $\delta_2 = 0,726$ ,  $\delta_3 = 0,821$ .



**Рис. 1. Теоретические чертежи моделей погруженных тел, выполненные в AutoCAD 2019**  
Здесь и далее иллюстрации В.Л. Земляка

Характеристики погруженных тел и их геометрическая форма полностью соответствовали моделям, использованным в работе [2], где подробно описаны параметры бассейна и методика проведения модельных экспериментов, выполнена оценка сопоставления полученных ре-

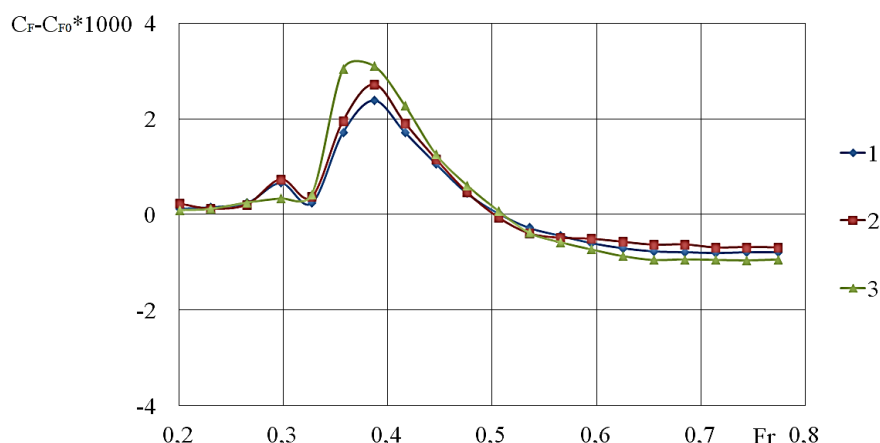


- Численные эксперименты осуществлялись с помощью математического алгоритма, разработанного авторами на базе программного комплекса ANSYS 19 R2 Academic Research [2]. Численная модель полностью повторяла параметры модельного эксперимента. Предложенный алгоритм позволял моделировать волнообразование на свободной поверхности жидкости от движения погруженного тела заданной геометрии, определять силу  $F_z$  и момент  $M_y$ .

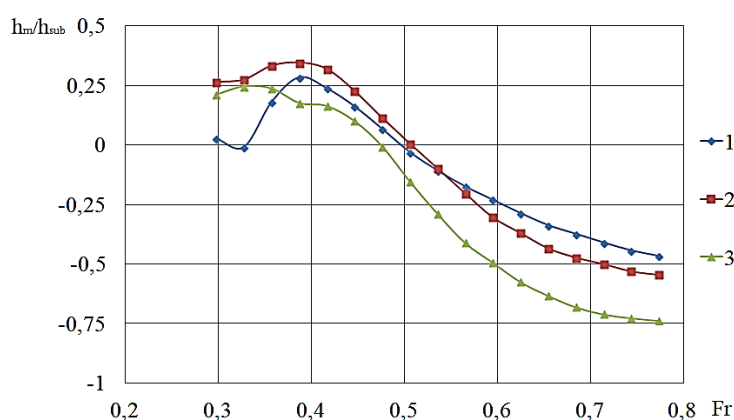
## Основные результаты модельных и численных экспериментов

Предварительно проведенные численные расчеты показали, что при скорости движения тела  $u \rightarrow 0$  значение коэффициента подъемной силы стремится к ненулевому значению  $C_{F0}$ . Этот результат согласуется с результатами работы [12] для стационарного движения сферы в глубокой жидкости под поверхностью чистой воды или под слоем битого льда. Поэтому на рис. 3 изображены зависимости коэффициента  $C_F$  за вычетом значения  $C_{F0}$ .

Кривые  $C_F$ - $C_{F0}$  имели два локальных максимума, первый из которых наблюдался при  $Fr = 0,3$ . Второй максимум для моделей № 1–2 был зафиксирован при  $Fr = 0,38$ , а для модели № 3 он имел смещения до  $Fr = 0,36$ . Для оценки действия подъемной силы на тело полученные результаты сопоставлялись с данными работы [2], в которой экспериментально измерено относительное вертикальное перемещение  $h_m/h_{sub}$  (где  $h_m$  – отклонение модели от  $h_{sub}$  при заданной скорости движения) аналогичных моделей погруженных тел под воздействием  $F_z$  (рис. 4).

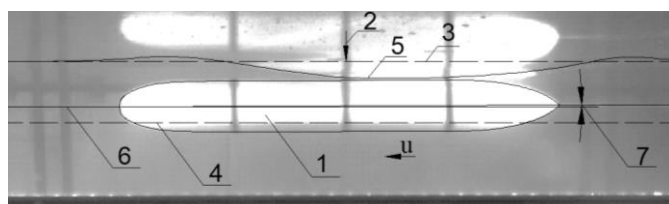


**Рис. 3. Зависимости коэффициента  $C_F - C_{F0}$  от скорости движения погруженного тела:**  
1 – модель № 1; 2 – модель № 2; 3 – модель № 3



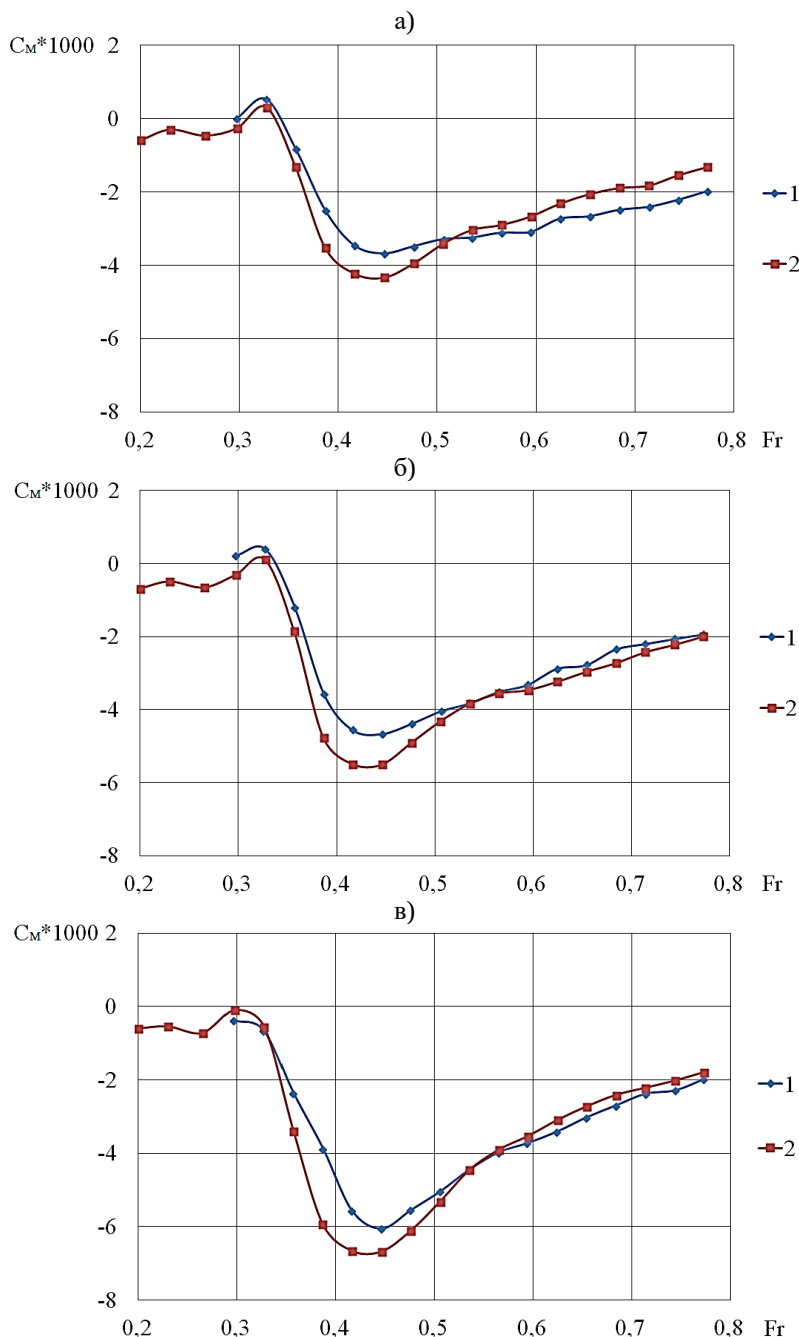
**Рис. 4. Зависимости  $h_m/h_{sub}$  от скорости движения моделей погруженных тел:**  
1 – модель № 1; 2 – модель № 2; 3 – модель № 3 [2]

Анализ кривых показал, что положение второго локального максимума  $C_F - C_{F0}$  соответствовало максимальному значению относительного вертикального перемещения, при котором расстояние между моделью тела и свободной поверхностью воды было минимальным. Далее подъемная сила уменьшалась, переходя в силу, отталкивающую тело от поверхности жидкости. Отметим, что теоретические и экспериментальные кривые имеют качественное сходство между полученными результатами. Значение  $h_m/h_{sub} = 0$  соответствовало первоначально заданной величине заглубления моделей. Из полученных результатов видно, что изменение подъемной силы и относительного заглубления при ее воздействии при движении моделей с различной скоростью имело сложный характер и достигало значительных величин. При скорости движения  $Fr \approx 0,38$  кормовая оконечность моделей практически контактировала со свободной поверхностью жидкости (рис. 5), начинал проявляться дифферент модели на носовую оконечность.



**Рис. 5. Движение модели № 2 со скоростью  $Fr = 0,38$ :**  
1 – модель погруженного тела; 2 – положение датчика вертикальных перемещений; 3 – линия свободной поверхности воды; 4 – линия первоначального заглубления модели  $H^* = 1,16$ ; 5 – линия взволнованной поверхности; 6 – линия заглубления модели в момент движения; 7 – угол дифферента модели

Использованная авторами тросовая буксировочная система и разработанная методика проведения эксперимента [2] позволили впервые измерить угол дифферента моделей погруженных тел при их движении вблизи свободной поверхности жидкости. Далее по приближенным формулам согласно работе [4] определялись величина гидродинамического момента  $M_y$  и коэффициент  $C_M$ . Показано сопоставление между полученными экспериментально и численно зависимостями  $C_M$  (рис. 6).



**Рис. 6. Экспериментальные (1) и численные (2) зависимости коэффициента  $C_M$ :  
а – модель № 1; б – модель № 2; в – модель № 3**

Анализ кривых показывает, что дифферент моделей периодически менялся при различной скорости их движения и имел сложную зависимость. Локальный максимум  $C_M$  для моделей № 1 и № 2 наблюдался при скорости движения  $Fr = 0,33$ . В этом случае фиксировалось движение с дифферентом на корму. Для модели № 3 локальный максимум  $C_M$  наблюдался при  $Fr = 0,3$ . Далее гидродинамический момент приобретал отрицательный знак, и для всех моделей происходило движение с дифферентом на нос. Изменение знака гидродинамического

момента объясняется изменением длины гравитационных волн, генерируемых телом на поверхности жидкости, и влиянием, которое они оказывают на поле давления, окружающее погруженное тело. Поскольку длина поверхностных волн и амплитуда колебаний волновой системы меняются с ростом скорости, результирующий центр давления, действующего на тело, смещается относительно центра тяжести, что приводит к изменению направления и величины гидродинамического момента. Максимальные отрицательные значения  $C_M$  для моделей № 1 и № 2 наблюдались при скорости движения  $Fr = 0,45$ , для модели № 3 – при  $Fr = 0,43$ . Стоит отметить качественное совпадение экспериментальных и теоретических зависимостей  $C_M$ , а также низкое расхождение между полученными значениями, которое в среднем составило менее 10%. Для отдельных точек вблизи отрицательного максимума зависимостей погрешность составила до 30%, что объясняется масштабным эффектом, сложностью проведения эксперимента при больших углах крена, а также использованием приближенных формул для расчета экспериментально полученного значения гидродинамического момента.

При скорости  $Fr = 0,5$  заглубление при движении моделей соответствовало  $h_{sub}$ . С дальнейшим ростом скорости  $h_m$  увеличивалось, а угол дифферента снижался, как и величина момента.

Максимальные значения коэффициентов  $C_F$  и  $C_M$  наблюдались при движении модели № 3, имеющей наибольшие значения  $\beta$  и  $\delta$ . Это говорит о том, что силы и моменты, действующие на тело при его движении вблизи свободной поверхности жидкости, сильно зависят от его объема и формы поперечного сечения для исследуемого диапазона скоростей. Также для модели № 3 наблюдалось смещение локальных максимумов зависимостей исследуемых параметров в сторону меньших чисел  $Fr$ .

### Заключение

Использовано численное решение, разработанное на базе программного комплекса ANSYS 19 R2 Academic Research, позволяющее определять силы и моменты, действующие на погруженное тело заданной формы при его движении вблизи свободной поверхности жидкости с различной скоростью. Работоспособность алгоритма проверена путем сопоставления полученных результатов с данными модельных экспериментов.

Впервые экспериментально определены углы дифферента, возникающие при движении модели в приповерхностной водной среде. Рассчитаны значения величины подъемной силы и гидродинамического момента, на основе которых построены зависимости  $C_F$  и  $C_M$ . Установлено, что максимальные значения гидродинамический момент и соответственно угол дифферента приобретают при скорости движения  $Fr = 0,45$ . Показано влияние особенностей формы корпуса моделей на значения исследуемых параметров, а именно значения  $\beta$  и  $\delta$ .

Дополнительных исследований требует определение влияния на силы и моменты, действующие на погруженное тело при его движении с различной скоростью на малом заглублении, наличия сплошного ледяного покрова на поверхности воды.

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

Вклад авторов: Земляк В.Л. – подготовка и проведение модельных экспериментов, анализ полученных результатов; Васильев А.С. – разработка численной математической модели; Козин В.М. – разработка методики проведения эксперимента, анализ полученных результатов. Конфликт интересов отсутствует.

### 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 Дальневост. федерал. ун-та. 2021. № 2(47). С. 3–12. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-2-1
2. Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М. Движение погруженного тела вблизи свободной поверхности жидкости // Вестник Инженерной школы Дальневост. федерал. ун-та. 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 Приамурск. гос. ун-та им. Шолом-Алейхема. 2021. № 1(42). С. 19–31. DOI: 10.24412/2227-1384-2021-142-19-31
4. Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. Ленинград: Судостроение, 1973. 211 с.
5. Crook T.P. An Initial Assessment of Free Surface Effects on Submerged Bodies. MSc Mechanical Engineering, Naval Postgraduate College, USA, 1994. 110 p. URL: <https://archive.org/details/aninitialssessme1094542971/page/92/mode/2up> – 09.10.2021.
6. 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, Australi, 2014. 214 p. URL: <https://eprints.utas.edu.au/22368/1/Whole-Dawson-thesis.pdf> – 12.10.2021.
7. Doctors L., Beck R. Convergence Properties of the Neumann-Kelvin Problem for a Submerged Body. J. of Ship Research. 1987;(31):227-234. URL: <https://trid.trb.org/view/397172> – 11.10.2021.
8. Efremov D.V., Milanov E.M. Hydrodynamics of DARPA SUBOFF Submarine at Shallowly Immersion Conditions. The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2019;(13):337-342. DOI: /10.12716/1001.13.02.09
9. Hama F.R., Long J.D., Hegarty J.C. On Transition from Laminar to Turbulent Flow. J. of Applied Physics. 1957;(28):388-394. DOI: 10.1063/1.1722760
10. Khabakhpasheva T.I., Shishmarev K.A., Korobkin A.A. The response of ice cover to a load moving along a frozen channel. Applied Ocean Research. 2016;(59):313-326. DOI: 10.1016/j.apor.2019.01.020.
11. 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
12. Sturova I.V. Unsteady three-dimensional sources in deep water with an elastic cover and their applications. Journal of Fluid Mechanics. 2013;(730):392-418. DOI: 10.1017/jfm.2013.303

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2022. N 1/50

*Theory of the Ship and Construction Mechanics*[www.dvfu.ru/en/vestnikis](http://www.dvfu.ru/en/vestnikis)

Original article

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-1/30-37>

Zemlyak V., Vasilyev A., Kozin V.

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

Department of Technical Disciplines

ALEXEY S. VASILYEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,

vasil-grunt@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7783-0000>

Department of Technical Disciplines

*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

*Institute of Machine Science and Metallurgy FEB RAS*

Komsomolsk-on-Amur, Russia

### **Determination of the lifting force and hydrodynamic moment during the motion of a submerged body near the free surface of a liquid**

**Abstract:** Forces and moments on a submerged body by liquid can have a significant effect on the nature of its movement on a little depth. Although it is very important to study these parameters due to their effect on the safety and maneuverability of an underwater vehicle, there are not many theoretical and especially experimental research on this topic. For the first time the authors of the present work have experimentally determined the trim

angles of a submerged body model, moving in a near-surface water environment in the experimental basin. Using the ANSYS 19 R2 Academic Research software package, the forces and moments acting on a body of given geometry moving near the free surface of a liquid at different speeds were numerically determined. The influence of the models' shape, namely the coefficient of fineness of midship section and the block coefficient, on the investigated parameters has been determined.

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

**For citation:** Zemlyak V., Vasilyev A., Kozin V. Determination of the lifting force and hydrodynamic moment during the motion of a submerged body near the free surface of a liquid. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2022;(50):30-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-1/30-37>

Contribution of the authors: V.L. Zemlyak – planning and conducting the model experiments, analysis of the results; A.S. Vasilyev – development of a numerical mathematical model; V.M. Kozin – development of a methodology for conducting an experiment, analysis of the results.

The authors declare no conflicts 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(47):3-12. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-2-1
2. Zemlyak V.L., Vasilyev A.S., Kozin V.M. The movement of an submerged body near the free surface of a liquid. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2020;4(45):16-25. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-4-2
3. Zemlyak V.L., Kozin V.M. Ice tank of laboratory ice technology. Vestnik, Quart. J. of Amur State University after Sholom-Aleichem. 2021;(42):19-31. DOI: 10.24412/2227-1384-2021-142-19-31
4. Pantov E.N., Makhin N.N., Sheremetov B.B. Foundations of the theory of movement of underwater vehicles. Leningrad, Sudostroenie, 1973. 211 p.
5. Crook T.P. An Initial Assessment of Free Surface Effects on Submerged Bodies. MSc Mechanical Engineering, Naval Postgraduate College. USA, 1994. 110 p. URL: <https://archive.org/details/aninitialssessme1094542971/page/92/mode/2up> – 09.10.2021.
6. 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> – 12.10.2021.
7. Doctors L., Beck R. Convergence Properties of the Neumann-Kelvin Problem for a Submerged Body. Journal of Ship Research. 1987;(31):227-234. URL: <https://trid.trb.org/view/397172> – 11.10.2021
8. Efremov D.V., Milanov E.M. Hydrodynamics of DARPA SUBOFF Submarine at Shallowly Immersion Conditions. The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2019;(13):337-342. DOI: 10.12716/1001.13.02.09
9. Hama F.R., Long J.D., Hegarty J.C. On Transition from Laminar to Turbulent Flow. J. of Applied Physics. 1957;(28):388-394. DOI: 10.1063/1.1722760
10. Khabakhpasheva T.I., Shishmarev K.A., Korobkin A.A., The response of ice cover to a load moving along a frozen channel. Applied Ocean Research. 2016;(59):313–326. DOI: 10.1016/j.apor.2019.01.020
11. 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
12. Sturova I.V. Unsteady three-dimensional sources in deep water with an elastic cover and their applications. Journal of Fluid Mechanics. 2013;(730):392-418. DOI: 10.1017/jfm.2013.303