Теория корабля и строительная механика

DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-1>
УДК 532.3; 532.5; 629.585

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

ЗЕМЛЯК ВИТАЛИЙ ЛЕОНИДОВИЧ – к.ф.-м.н., доцент (автор, ответственный за переписку),
SPIN: 9172-5202, ResearcherID: Y-2761-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3218-5738>,
ScopusID: 36085759800, vellkom@list.ru

ВАСИЛЬЕВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ – к.т.н., доцент,
SPIN: 3401-1530, ResearcherID: Q-9416-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7783-0000>,
ScopusID: 57203895897, vasil-grunt@mail.ru

Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема
Биробиджан, Россия

КОЗИН ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник,
SPIN: 1265-7970, ResearcherID: S-6053-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2673-469X>,
ScopusID: 8548383800, vellkom@list.ru

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН
Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН
Комсомольск-на-Амуре, Россия

Влияние подъемной силы на характер движения погруженного тела в приповерхностной водной среде

Аннотация: Движение подводного объекта в приповерхностной водной среде имеет важное тактическое значение. Маневренность и управляемость объектом при его взаимодействии со свободной поверхностью воды становятся ключевыми факторами, обеспечивающими безопасность и эффективность проведения операций. В работе авторами на базе опытового бассейна впервые получены экспериментальные зависимости относительного вертикального перемещения погруженных тел различной формы под воздействием подъемной силы при движении вблизи свободной поверхности жидкости. Установлено влияние на величину вертикального перемещения особенностей формы корпуса моделей. Численно с помощью программного комплекса ANSYS 19 R2 Academic Research проанализировано влияние поля гидродинамического давления, формирующегося вокруг тела, на волновую картину при движении с различной скоростью; определена зависимость коэффициента волнового сопротивления для моделей с заданными параметрами.

Ключевые слова: погруженное тело, подъемная сила, свободная поверхность

Введение

При движении погруженного тела в приповерхностной водной среде формирующееся гидродинамическое давление приводит к образованию на свободной поверхности жидкости волновой системы. Возмущенная поверхность оказывает влияние на распределение гидростатического давления, окружающего погруженное тело, что вызывает появление подъемной силы F_z и дифференцирующего момента M_t , которые зависят от скорости движения тела и его заглубления [10]. В работах [5, 7] методами численного моделирования выполнен анализ сил и моментов, действующих на погруженный эллипсоид вращения. В результате было установлено, что при малых числах Фруда погруженное тело испытывает силу, которая притягивает его к свободной

© Земляк В.Л., Козин В.М., Васильев А.С., 2021

Статья: поступила: 12.05.2021; рецензия: 25.05.2021; финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00118).

поверхности жидкости, достигая пикового значения в области $Fr=0,40$, после чего F_z уменьшается и переходит в силу, отталкивающую тело. При $Fr<0,30$ взаимодействие между телом и свободной поверхностью приводит к перераспределению гидростатического давления и к появлению M , в результате чего кормовая оконечность тела начинает смещаться в направлении к свободной поверхности. По мере увеличения скорости направление момента меняется.

В работе [9] была проведена серия модельных и численных экспериментов по определению сопротивления, подъемной силы и дифференцирующего момента от движения погруженного тела с различной скоростью. Погруженное тело асимметричной формы имело различное относительное удлинение при сохранении постоянного диаметра корпуса. Результаты исследования показали, что силы, действующие на погруженное тело, зависят от длины гравитационных волн, генерируемых на поверхности жидкости при движении. С учетом глубины погружения и скоростей, с которыми движутся субмарины при приповерхностной эксплуатации, делается вывод: влияние волнового сопротивления является вторичным, а наибольшее эксплуатационное значение приобретает вертикальная подъемная сила.

Цель настоящей работы – определение относительного вертикального перемещения погруженных тел различной формы поперечного сечения под воздействием подъемной силы при движении вблизи свободной поверхности жидкости.

Подготовка к проведению модельных экспериментов

Экспериментальное определение сил и моментов, действующих на тело при его движении в жидкости, обычно осуществляется с помощью опытовых бассейнов, для чего используется буксировочная тележка с одной или двумя вертикальными стойками, на которые через специальную штангу крепится модель (рис. 1) [12]. Точность измерения динамометрами сопротивлений при таком расположении модели может достигать до 0,05 Н, а скорости движения – до 0,005 м/с. Однако главным недостатком традиционного метода буксировки погруженных тел является влияние вертикальных стоек на волновую систему в корме. Также сильное влияние оказывает наличие самой штанги, отношение ее размеров к диаметру корпуса и сокращение длины модели в кормовой оконечности, т.е. уменьшение площади смоченной поверхности и изменение поля давления. В работе [12] определены виды помех, создаваемых системой крепления модели к буксировочной тележке, на характер ее обтекания потоком набегающей жидкости и возникающее при этом поле давления, а также изменением формы корпуса в кормовой оконечности. Dawson в [6] экспериментально и теоретически показал, что влияние помех зависит от длины модели, глубины ее погружения и скорости движения. На основании полученных результатов делается вывод, что наличие системы крепления в кормовой оконечности модели снижает сопротивление формы на величину до 20%.

Рис. 1. Некоторые схемы испытаний погруженных тел в опытовых бассейнах:
а – Carderock Division Naval Surface Warfare Center [12]; б – Institute for Marine Dynamics,
St. John's, Newfoundland [12]. Здесь и далее иллюстрации В.Л. Земляка

Кроме того, сама конструкция и крепление модели должны быть достаточно жесткими для предотвращения рыскания в процессе буксировки, что исключает возможность определения величины вертикального перемещения тела под воздействием возникающей подъемной силы. Очевидно, что для стабилизации движения подводного объекта в горизонтальной плоскости необходимо дать количественную оценку величины вертикального перемещения.

Авторы настоящей статьи для проведения модельных экспериментов использовали опытовый бассейн лаборатории ледотехники Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхеа (г. Биробиджан) [4]. Испытания проходили в феврале 2021 г. Параметры бассейна составили: длина $L = 11,6 L_m$; ширина $B = 21,8 D_m$; глубина $T = 6,5 D_m$ (где L_m – длина и D_m – ширина модели). Характеристики бассейна соответствовали необходимым требованиям пренебрежимо малого влияния вертикальных стенок и глубины дна на исследуемые параметры и общую картину волнообразования [1], а также размерам аналогичных экспериментальных установок, на базе которых проводились схожие модельные эксперименты: Australian Maritime College Towing Tank – $L = 45,8 L_m$, $B = 15,4 D_m$, $T = 6,5 D_m$ [6]; Iowa Institute of Hydraulic Research – $L = 59,7 L_m$, $B = 10 D_m$, $T = 10 D_m$ [8].

Небольшая длина экспериментальной установки позволила для перемещения моделей использовать тросовую буксировочную систему, которая имеет определенные преимущества перед традиционным методом буксировки погруженных тел. Использование стального троса исключает влияние на картину волнообразования вертикальных стоек, соединяющих модель с буксировочной тележкой. Поскольку модель имеет нулевую плавучесть при заданном заглублении h_{sub} , то при буксировке со скоростью u_m под воздействием F_z появляется возможность измерить величину вертикального перемещения тела $h^* = h_{sub} + h_m$ (h_m – отклонение модели от h_{sub}) (рис. 2), что при традиционном способе буксировки нереализуемо. Определение данного параметра крайне затруднительно и теоретически, так как при численном решении задачи требует больших вычислительных мощностей.

Рис. 2. Схема определения вертикального перемещения модели погруженного тела ($Fr=0,624$): 1 – модель погруженного тела; 2 – положение датчика вертикальных перемещений; 3 – линия свободной поверхности воды; 4 – линия первоначального заглубления модели $h_{sub}=0,16$ м; 5 – линия взволнованной поверхности воды; 6 – линия заглубления модели в момент движения; 7 – угол дифферента модели

Буксировочная система была выполнена в виде двух рам, устанавливаемых по разные стороны чаши бассейна и оснащенных подвижными блоками проводки бесконечного буксировочного троса. Для буксировки моделей использовалась необитаемая буксировочная тележка, перемещающаяся с помощью сервопривода Servoline 130SPSM14 компании Zetek (Россия) по рельсовым направляющим.

На начальном этапе экспериментов производились тестовые измерения h_{sub} в точках начала, посередине и в конце траектории движения модели. Натяжение буксировочного троса при нулевой плавучести модели тела обеспечивало перемещение в вертикальном направлении посередине траектории движения на величину до $1,5 D_m$. Для определения отклонения модели от первоначально заданного заглубления использовался водонепроницаемый иллюминатор,

вмонтированный в боковую стенку чаши бассейна, напротив которого устанавливалась видеокамера машинного зрения VLXT-50M.I, осуществляющая видеосъемку с разрешением 2464×2056 пикселей и скоростью до 163 кадров/с. Камера фиксировала положение модели относительно свободной поверхности жидкости. Графическим методом с помощью полученного фотографического изображения высокого разрешения определялось изменение положения модели при ее движении относительно заданного заглубления в точке измерения.

Для экспериментов использовались три модели погруженных тел каплевидной формы с цилиндрической вставкой и относительным удлинением $L^* = L_m/D_m = 8,4$. Длина моделей составила 1,154 м. С учетом L_m на основании работы [11] для моделирования турбулентного режима течения в пограничном слое использовались искусственные турбулизаторы в виде полос Нэма, расположенных на расстоянии $0,05L_m$ от носового перпендикуляра и обеспечивающих достаточный уровень устойчивого турбулентного потока при минимальном увеличении сопротивления, по сравнению с эквивалентными им проволочными турбулизаторами. Модели изготавливались с помощью послойной печати на принтере Raise3D. Точность изготовления составила 0,01 мм. Схемы моделей, выполненные в AutoCAD 2019, представлены на рис. 3. Рисунок показывает, что модели отличались по форме поперечного сечения. Коэффициент полноты мидель-шпангоута для модели № 1 равнялся $\beta_1 = 0,785$, № 2 – $\beta_2 = 0,867$ и для модели № 3 – $\beta_3 = 0,984$. Коэффициент общей полноты соответственно $\delta_1 = 0,673$, $\delta_2 = 0,726$, $\delta_3 = 0,821$.

Рис. 3. Форма корпуса моделей погруженных тел, модели:
а – № 1; б – № 2; в – № 3

Первоначально заданное относительное заглубление моделей при проведении экспериментов составило $H^* = h_{sub}/D_m = 1,16$. Значения относительной скорости движения равнялись $Fr = 0,297-0,773$.

Проверка достоверности исследований

На первом этапе модельных экспериментов было выполнено сопоставление данных, полученных при буксировке модели № 1 на относительном заглублении $H^* = 1,16$, с известными результатами буксировки модели погруженного тела схожей геометрии вблизи свободной поверхности воды (рис. 4). Для сопоставления брались профили гравитационных волн (H_w – высота волны), опубликованные в работе Dawson [6], при буксировке модели с $L^* = 8,5$, $H^* = 1,02$, при $Fr = 0,5$ (рис. 4) [2].

Анализ профилей гравитационных волн показал достаточно хорошую качественную сходимость между данными экспериментов Dawson и модельных экспериментов, полученных в исследовании. Различие в высоте гравитационных волн можно объяснить разницей между H^* , характеристиками и формой обводов корпусов моделей. Также на кривой 2 рис. 4 заметно влияние, оказанное вертикальной стойкой крепления модели к буксировочной тележке на волновую картину, формировавшуюся в кормовой оконечности при движении.

Для оценки влияния буксировочного троса на волнообразование в работе [3] было выполнено сопоставление полученных экспериментальных профилей гравитационных волн от движения модели № 1 с результатами численного моделирования без наличия буксировочного троса и с учетом его присутствия для всего исследуемого скоростного диапазона. Расчеты выполнены с помощью численного алгоритма, разработанного авторами на базе программного комплекса ANSYS 19 R2 Academic Research [2]. Анализ результатов показал слабое влияние буксировочного троса на полученные данные. Для наименее благоприятных случаев разность в результатах не превышала 5%. Поэтому в дальнейшем при проведении численного моделирования использовалась модель подводного судна без буксировочного троса.

Рис. 4. Сопоставление профилей гравитационных волн, полученных при скорости движения модели погруженного тела $Fr = 0,5$: 1 – эксперимент [2]; 2 – эксперимент Dawson [6]

Рис. 5. Зависимости максимальных значений H_w/L_m от скорости движения моделей погруженных тел: 1 – модель № 1; 2 – модель № 2; 3 – модель № 3

Основные результаты модельных и численных экспериментов

Относительная величина максимальной высоты поверхностных волн H_w/L_m изменялась по зависимости, показанной на рис. 5, достигая максимума при скорости $Fr=0,45$. Характер расположения, форма гребней и впадин гравитационных волн практически не менялись относительно друг друга для испытываемых моделей. Только на малых скоростях движения $Fr=0,297÷0,386$ форма профиля волн, генерируемых от движения модели № 3, имела несколько иной характер, что, очевидно, связано с плохо обтекаемой формой корпуса. Также анализ данных показал, что H_w/L_m зависит от коэффициента общей полноты погруженного тела δ . С ростом δ величина H_w/L_m возрастала от 7 до 39% для модели № 2 и от 17 до 46% для модели № 3 по сравнению с моделью № 1 при разных скоростях движения.

Очевидно, что скорость движения тела влияет на волновую систему, генерируемую на поверхности жидкости, которая напрямую связана с полем гидродинамического давления, окружающим погруженное тело. На рис. 6 с помощью численного расчета для модели № 1 показано сопоставление между вертикальной составляющей распределения давления P вдоль нижней поверхности погруженного тела $C_{pz} = \frac{P-P_\infty}{0,5\rho u_m^2}$ (области относительного повышенного и пониженного давления) и профилями генерируемых гравитационных волн (гребни и впадины волны) для различных скоростей движения. Очевидно наличие хорошей корреляции между областями повышенного и пониженного давления и гребнями и впадинами поверхностных волн.

При скоростях движения $Fr>0,55$ второй гребень гравитационной волны начинал значительно смещаться за кормовую оконечность тела. Чаша прогиба также перемещалась с ростом скорости от средней части корпуса при $Fr=0,36$ до кормового перпендикуляра при $Fr=0,624$, значительно смещаясь за кормовую оконечность при более высоких скоростях. Смещение фазы гравитационной волны происходило в результате смещения области пониженного давления в кормовую оконечность с ростом скорости движения тела, что хорошо прослеживается на рис. 6.

Рис. 6. Сопоставление между областями давления и профилями гравитационных волн для различных скоростей движения модели № 1 (а – $Fr=0,297$; б – $Fr=0,356$; в – $Fr=0,416$; г – $Fr=0,594$): 1 – C_{pz} , 2 – $H_w/L_m \cdot 10$

Результаты численного моделирования показали, что при малом заглублении возникало значительное изменение распределения давления по верхней и нижней поверхности погруженного тела. Неравномерное распределение давления приводит к возникновению вертикальной подъемной силы F_z , которая оказывает значительное влияние на характер движения тела. Причина возникновения F_z , действующей на тело, подобна причине, в результате которой происходит изменение осадки надводного судна при движении на мелководье. Ускорение потока жидкости между судном и границей раздела приводит к снижению давления в этой области и к возникновению вертикальной силы, которая либо притягивает, либо отталкивает тело [5, 7].

График экспериментальных зависимостей относительного вертикального перемещения моделей погруженных тел от скорости их движения показан на рис. 7. Отметим, что $h_m/h_{sub}=1$ соответствовало первоначально заданной величине заглубления моделей.

Рис. 7. Зависимости h_m/h_{sub} от скорости движения моделей погруженных тел: 1 – модель № 1; 2 – модель № 2; 3 – модель № 3

Рис. 8. Зависимость коэффициента C_w от скорости движения: 1 – модель № 1 [2]; 2 – модель № 2; 3 – модель № 3

Из полученных зависимостей видно, что изменение относительного заглубления при движении моделей с различной скоростью имеет сложный характер и может достигать значительных величин по сравнению с первоначальным значением h_{sub} . При скоростях движения

$0,294 < Fr < 0,386$ модели испытывали подъемную силу, которая начинала притягивать их к свободной поверхности, уменьшая величину заглубления. Для моделей № 1 и № 2 максимальное значение F_z приобретала при $Fr = 0,386$, а для плохообтекаемой модели № 3 – при $Fr = 0,327$. В этих случаях расстояние h^* до свободной поверхности воды было минимальным. Затем вертикальная подъемная сила F_z переходила в силу, отталкивающую модели от свободной поверхности. Для моделей № 1 и № 2 при $Fr \approx 0,5$ заглубление моделей становилось равным h_{sub} . Для модели № 3 $h^* = h_{sub}$ при $Fr = 0,475$. При $0,5 < Fr < 0,6$ наблюдался значительный рост h_m/h_{sub} , при более высоких скоростях движения в диапазоне $0,6 < Fr < 0,773$ значения относительного заглубления моделей практически не увеличивались.

Кривые зависимостей h_m/h_{sub} для моделей № 1 и № 2 имели схожий характер с общей точкой пересечения при $Fr \approx 0,55$. Модель № 2, обладая большими значениями β и δ , испытывала более сильное воздействие от F_z . Зависимость h_m/h_{sub} для плохообтекаемой модели № 3 несколько отличалась: при максимальных значениях β и δ она испытывала значительно большее отталкивающее воздействие от F_z при скоростях выше $Fr = 0,386$, однако уменьшение h_{sub} в результате притягивания модели к поверхности жидкости при $Fr = 0,327$ было наименьшим. Данный факт объясняется тем, что, имея наибольшее значение δ и соответственно наибольшую глубину чаши прогиба взволнованной поверхности при движении, расстояние h^{**} от поверхности жидкости до поверхности корпуса модели № 3 было минимальным.

В ходе проведения экспериментов при скоростях движения $Fr = 0,297$ возникал дифферент на кормовую оконечность моделей. При скорости движения $Fr \approx 0,4$ модели испытывали дифферент на нос. При $Fr > 0,4$ вновь возникал момент, который приводил к появлению дифферента на корму.

С учетом полученных зависимостей изменения относительного заглубления моделей при их движении с различной скоростью были выполнены серии численных экспериментов с целью определения сопротивления, действующего на погруженное тело заданной формы со стороны жидкости. Во время расчетов определялись значения волнового сопротивления R_w . На рис. 8 представлены численные результаты зависимости коэффициента волнового сопротивления моделей погруженных тел $C_w = \frac{R_w}{0,5\rho u_m^2 S_m}$ (S_m – площадь смоченной поверхности модели тела) от скорости их движения.

Поскольку взаимодействие между волновыми компонентами приводит к интерференции поверхностных волн, которая зависит от скорости движения, длины и геометрии тела, в результате происходит либо увеличение волнового сопротивления, либо его уменьшение. Результаты численного моделирования показали, что для моделей № 1 и № 2 при скорости $Fr=0,297$ наблюдался первый локальный максимум коэффициента волнового сопротивления, затем происходило его снижение до минимального значения при $Fr \approx 0,32 \div 0,35$. Второй локальный максимум C_w , значительно превосходящий по значениям первый, наблюдался в диапазоне скоростей $Fr \approx 0,45 \div 0,5$. При более высоких скоростях движения формировались волны, длина которых была слишком велика, чтобы вызывать эффект интерференции. В результате значение коэффициента C_w уменьшалось. Наибольшее значение коэффициент C_w приобретал для модели № 3, форма корпуса которой была наименее обтекаемой, а значение δ максимальным. Отметим, что с уменьшением δ значения C_w ожидаемо уменьшались. Полученные данные согласуются с известными данными о волновом сопротивлении судов [1].

Заключение

Анализ полученных результатов модельных и численных экспериментов, а также сопоставление их с известными данными экспериментальных и теоретических работ показал, что предложенная методика моделирования, техника проведения модельных экспериментов и измерительное оборудование, а также численный алгоритм, разработанный на базе программного комплекса ANSYS 19 R2 Academic Research, позволяют достаточно точно выполнять ана-

лиз волнообразования при движении погруженного тела вблизи свободной поверхности жидкости, определить действие сил на погруженное тело при его движении в приповерхностной водной среде с различной скоростью, а также их влияние на характер его движения.

Впервые экспериментально получены зависимости относительного вертикального перемещения погруженных тел различной формы поперечного сечения под воздействием подъемной силы при движении вблизи свободной поверхности жидкости с различной скоростью. Установлено влияние особенностей формы корпуса моделей на величину вертикального перемещения.

Численно определены зависимость коэффициента волнового сопротивления для моделей с заданными характеристиками. Установлены скорости движения, при которых наблюдались локальные максимумы и минимум значений C_w .

Дальнейшим направлением исследования является определение влияния на исследуемые параметры относительного удлинения и заглубления моделей погруженных тел при их движении с различной скоростью.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов. Л.: Судостроение, 1988, 288 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001395848> (дата обращения: 09.03.2021).
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., Васильев А.С. Определение вертикального перемещения погруженного тела при движении вблизи свободной поверхности жидкости // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. № 4 (394). С. 43–52. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-4-394-43-52
4. 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
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> – 07.03.2021.
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> – 09.03.2020.
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> – 07.03.2021.
8. Farrell C., Güven O. On the Experimental Determination of the Resistance Components of a Submerged Spheroid. Journal of Ship Research, 1973;17:72–79. URL: <https://onepe-tro.org/JSR/article-abstract/17/02/72/175333/On-the-Experimental-Determination-of-the?redirectedFrom=fulltext> – 09.03.2021.
9. Gourlay T., Dawson E. Havelock Source Panel Method for Near-surface Submarines. J. of Marine Science and Application, 2015;(14):215–224. DOI: 10.1007/s11804-015-1319-5
10. Griffin M.J. Numerical Prediction of the Maneuvring Characteristics of Submarine Operating Near the Free Surface. PhD in Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2002, 136 p. URL: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/8327> – 07.03.2021.
11. 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
12. Mackay M.A. Review of sting support interference and some related issues for the marine dynamic test facility (MDTF). Defence Research Establishment, Atlantic, 1993, 59 p. URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA271806 – 08.03.2021.

DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-1>

Zemlyak V., Kozin V., Vasilyev A.

VITALIY ZEMLYAK, Candidate of Physico-Mathematical Sciences,
Associate Professor (Corresponding Author), ResearcherID: Y-2761-2018,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3218-5738>, ScopusID: 36085759800, vellkom@list.ru

ALEXEY VASILYEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
ResearcherID: Q-9416-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7783-0000>,
ScopusID: 57203895897, vasil-grunt@mail.ru

Sholom-Aleichem Priamursky State University
Birobidzhan, Russia

VICTOR KOZIN, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Researcher of the Laboratory
for Problems of Creation and Processing of Materials and Products, ResearcherID: S-6053-2016,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2673-469X>, ScopusID: 8548383800, vellkom@list.ru

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

Influence of lifting force on the nature of motion of a submerged body in a near-surface water environment

Abstract: Movement of a submarine in the near-surface water environment is of great tactical importance. Maneuverability and controllability of the vessel interacting with the free surface of water become key factors in ensuring safety and efficiency of operations. In this paper, on the basis of the experimental tank authors for the first time obtained the experimental dependences of relative vertical displacement of submerged bodies of various shapes under the influence of the lifting force when moving near the free surface of the liquid. Influence on the value of vertical displacement, features of the shape of body of the models, has been established. Numerically, using the ANSYS 19 R2 Academic Research software package, we analyzed the influence of the hydrodynamic pressure field formed around the body on the wave pattern when moving at different speeds, and determined the dependence of the wave resistance coefficient for models with given parameters.

Keywords: submerged body, lifting force, free surface

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

The authors declare no conflicts of interests.

REFERENCES

1. Voitkunsky Y.I. Resistance to ship traffic. Leningrad: Sudostroenie, 1988. 288 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001395848> – 09.03.2021.
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., Vasilyev A.S. Vertical shift of submerged body moving near the free surface. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020; 4(394): 43–52. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-4-394-43-52
4. 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
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> – 07.03.2021.
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> – 09.03.2020.
7. Doctors L., Beck R. 1987. 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> – 07.03.2021.
8. Farrell C., Güven O. On the Experimental Determination of the Resistance Components of a Submerged Spheroid. *Journal of Ship Research*, 1973;17:72–79. URL: <https://onepetro.org/-JSR/article-abstract/17/02/72/175333/On-the-Experimental-Determination-of-the?redirectedFrom=fulltext> – 09.03.2021.
9. Gourlay T., Dawson E. Havelock Source Panel Method for Near-surface Submarines. // *Journal of Marine Science and Application*, 2015;(14):215–224. DOI: 10.1007/s11804-015-1319-5
10. Griffin M.J. Numerical Prediction of the Maneuvring Characteristics of Submarine Operating Near the Free Surface. PhD in Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2002, 136 p. URL: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/8327> – 07.03.2021.
11. 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
12. Mackay M.A. Review of sting support interference and some related issues for the marine dynamic test facility (MDTF). Defence Research Establishment, Atlantic, 1993, 59 p. URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA271806 – 08.03.2021.