



УДК 532.5.011+629.5.018.1
EDN: DDTOEE

В.Л. Земляк¹ , В.М. Козин² , К.И. Ипатов¹, Л.А. Болтовский¹, Д.Э. Бабашов¹
¹ ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема», Биробиджан, Россия
² ФГБУН «Институт машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН», Комсомольск-на-Амуре, Россия

ТОРМОЖЕНИЕ ПОГРУЖЕННОГО ТЕЛА ПРИ ДВИЖЕНИИ НА МАЛОМ ЗАГЛУБЛЕНИИ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является процесс нестационарного движения модели погруженного тела в виде разгона с заданным ускорением, движением с постоянной скоростью и торможением до полной остановки на малом заглублении вблизи нижней поверхности ледяного покрова и свободной поверхности воды. Цель состоит в определении влияния торможения на характер движения погруженного тела, а именно на величину вертикального перемещения, возникающую под воздействием подъемной силы.

Материалы и методы. В исследовании применяются методика моделирования, технологии и результаты модельных экспериментов в опытовом бассейне.



Основные результаты. Экспериментально проанализировано движение тела под воздействием подъемной силы при его нестационарном движении на малом заглублении в условиях как чистой воды, так и воды, покрытой льдом. Показано, что характер вертикального перемещения тела может существенно изменяться от первоначальной скорости постоянного движения.

Заключение. Полученные результаты полезны для стабилизации движения погруженного тела в горизонтальной и вертикальной плоскостях при нестационарном движении на малом заглублении вблизи нижней поверхности ледяного покрова и в условиях свободной поверхности воды.

Ключевые слова: погруженное тело, торможение, заглубление, лед, свободная поверхность воды.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 532.5.011+629.5.018.1
EDN: DDTOEE

V.L. Zemlyak¹ , V.M. Kozin² , K.I. Ipatov¹, L.A. Boltovsky¹, D.E. Babashov¹
¹ Sholom-Aleihem Amur State University, Birobidzhan, Russia
² Institute of Machine Science and Metallurgy, Khabarovsk Federal Research Centre, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-on-Amur, Russia

DECELERATION OF A SUBMERGED BODY AT SHALLOW DEPTH

Object and purpose of research. The object of this study is unsteady motion of a submerged body model that gathers speed with a given acceleration, moves at a constant speed and decelerates until it is fully stops at shallow depth near ice cover or free water surface. The purpose of the study is to determine deceleration effects, specifically in terms of vertical displacement induced by lifting force.

Materials and methods. Modeling methods, technologies as well as model test data collected in the ice basin are used in the investigation.

Main results. Unsteady motion of the body under the action of lifting force is experimentally analyzed in shallow depth conditions under free surface and ice cover. It is shown that the vertical displacement of the body can be significantly different from that at the initial constant speed.

Для цитирования: Земляк В.Л., Козин В.М., Ипатов К.И., Болтовский Л.А., Бабашов Д.Э. Торможение погруженного тела при движении на малом заглублении. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 1(415): 37–44.

For citations: Zemlyak V.L., Kozin V.M., Ipatov K.I., Boltovsky L.A., Babashov D.E. Deceleration of a submerged body at shallow depth. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 1(415): 37–44 (in Russian).

Conclusion. The results obtained in the study can be useful for horizontal and vertical stabilization of unsteady body motion at shallow depth near ice cover or free water surface conditions.

Keywords: submerged body, deceleration, ice, free water surface.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Прогнозирование маневренных характеристик автономных подводных аппаратов (АПА) имеет большое значение для обеспечения динамической устойчивости устройства при его движении, оптимизации конструкции формы корпуса и средств управления. Прогнозирование маневренных характеристик АПА, как правило, осуществляется с помощью методов экспериментального моделирования, для чего используют опытовые бассейны. Модель нагрузки размещается на специальном пилоне, который с помощью одной или двух вертикальных стоек соединен с буксировочной тележкой. Различные способы крепления пилона к тележке позволяют моделировать движение модели по сложной траектории в вертикальном и горизонтальном направлениях с заданной скоростью или ускорением [1, 2]; движение с использованием вращающегося пилона для моделирования углов крена [3] и углов дифферента [4, 5].

Несмотря на разнообразие методов проведения модельных экспериментов, все они имеют схожие недостатки: неизбежность влияния вертикальных стоек на волновую систему, формирующуюся при движении за кормовой оконечностью модели; наличие самого пилона и уменьшение площади смоченной поверхности корпуса модели в кормовой оконечности; необходимость предотвращения рыскания модели в процессе ее буксировки, для чего вся конструкция должна быть достаточно жесткой [6, 7]. Кроме того, такая конструкция исключает возможность проведения испытаний в ледовых условиях.

Также в работе [7] на базе модельных и численных экспериментов выполнен анализ движения погруженного тела на малом заглублении в приповерхностной водной среде. С учетом глубины погружения и скоростей, с которыми движутся современные АПА при приповерхностной эксплуатации, делается вывод о том, что влияние волнового сопротивления является вторичным, а наибольшее эксплуатационное значение приобретает вертикальная подъемная сила F_z . В работе [8] показано, что влияние подъемной силы

приводит к возникновению значительного вертикального перемещения модели в зависимости от скорости ее движения на малом заглублении. Существенное влияние на эти процессы оказывает также наличие ледяного покрова на поверхности воды [9].

Кроме стационарного движения тела в жидкости под ледяным покровом, вызывают интерес нестационарные эффекты движения. В работах [10, 11] исследовалась нестационарная нелинейная задача о движении цилиндра под ледяным покровом. Получено решение для прогибов льда для малых значений времени и больших расстояний между телом и ледяным покровом. В работе [12] проведены теоретические исследования изменения подъемной силы при торможении тонкого тела длиной при движении в жидкости под ледяным покровом. Получено, что независимо от скорости стационарного движения, торможение тела до полной остановки приводит с течением времени к нулевому значению подъемной силы.

Однако для разных скоростей этот процесс происходит по-разному. При торможении от скоростей меньше критических подъемная сила начинает убывать, переходит через смену знака и затем через осцилляции стремится к нулю по мере того, как тело останавливается. Если скорость движения больше критической, то при торможении подъемная сила начинает возрастать и толкает тело вверх к поверхности. Затем, перейдя через точку максимума, подъемная сила начинает убывать, меняет знак и через колебательный режим стремится к нулю. Увеличение толщины ледяного покрова уменьшает амплитуду и количество колебаний коэффициента подъемной силы при торможении.

Цели данной работы:

- экспериментально проанализировать характер движения модели погруженного тела в условиях чистой воды и при наличии ледяного покрова в зависимости от длины тормозного участка и скорости торможения;
- получить экспериментальные зависимости относительного вертикального перемещения при торможении в рассматриваемых условиях.

Подготовка к проведению модельных экспериментов

Preparation of model experiments

Экспериментальные исследования были проведены в опытовом ледовом бассейне лаборатории ледотехники ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема» [13]. При проведении экспериментов использовалась модель погруженного тела, форма корпуса которого близка к геометрии модели Joubert BB2, описанной в научной литературе [14], отличаясь относительным удлинением, равным $L_m/D_m = 7,37$. Носовая оконечность модели имела форму эллипсоида, а кормовая – параболическую. В средней части располагалась цилиндрическая вставка диаметром $D_m = 0,137$ м. Модель изготавливались методом послойной печати на 3D-принтере Raise 3D. На рис. 1 показано трехмерное изображение погруженного тела.

Моделирование турбулентного режима течения в пограничном слое осуществлялось с помощью искусственного турбулизатора в виде полосы Ната [15], расположенной на расстоянии $0,05L_m$ от носового перпендикуляра. С учетом длины модели, способа ее изготовления и требуемой высоты турбулизатора полоса Ната оказалась оптимальным решением, обеспечивающим достаточный уровень устойчивого турбулентного потока при минимальном увеличении сопротивления по сравнению с эквивалентными ей проволоочными турбулизаторами.

Перед экспериментом производилась укладка твердого балласта в корпус, модель имела нулевую плавучесть на заданном заглублении $h_{sub} = 0,2$ м. Буксировки осуществлялись с помощью буксировочной тележки, к которой был прикреплен трос, способный перемещаться по системе блоков. Упряжка модели осуществлялась с помощью специальных карабинов и вертлюгов, компенсирующих вращение при движении погруженного тела. Использование буксировочного троса позволило

моделировать перемещение модели в вертикальном направлении h_z , возникающее под воздействием подъемной силы. Натяжение троса не оказывало влияния на величину вертикального перемещения и при положении тела в покое на середине траектории полного движения обеспечивало перемещение модели вдоль оси z на величину, равную до $2D_m$ в верхнем и нижнем направлениях (как показали последующие эксперименты, этого достаточно для моделирования процесса торможения тела). Для движения буксировочной тележки использовался сервопривод, режим работы которого задавался с помощью специализированного программного обеспечения.

Схема проведения модельных экспериментов показана на рис. 2 (см. вклейку). Габариты бассейна составили: длина $L_t = 14L_m$; ширина $B_t = 11,6D_m$; глубина $T_t = 7D_m$. На первом этапе движения происходил разгон модели на участке s_a с заданным ускорением, далее тело двигалось со стационарной скоростью u_m до точки Т1 – участок s_c . Скорость движения выбиралась в диапазоне $u_m = 1,0–2,6$ м/с с шагом $0,1$ м/с. Затем начиналось торможение до полной остановки модели в точке Т3 – участок s_d . Положение точки Т1 для всех экспериментов не менялось и находилось напротив края водонепроницаемого окна, через которое происходила видеосъемка процесса движения высокоскоростной камерой. В ходе экспериментов также фиксировалась точка Т2, равная 30 % преодоленного участка торможения. Скорость при торможении изменялась линейно от u_m до 0, ускорение при этом равнялось $0,5$ м/с². С ростом скорости u_m длина тормозного участка s_d возрастала. По этой причине при $u_m = 1,7–2,6$ м/с длина s_d составляла от 2,74 м до 6,17 м.

В результате зафиксировать положение модели во всех трех точках через водонепроницаемое окно при $u_m > 1,6$ м/с технически было нельзя. По этой причине после прогона модели во всем скоростном диапазоне и фиксации положения тела в точке Т1 участок разгона s_a и стационарного движения моде-

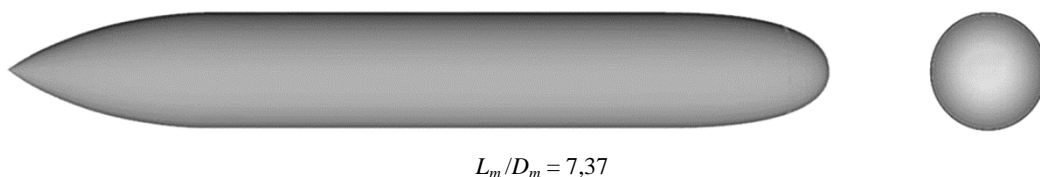


Рис. 1. 3D-модель погруженного тела, использованного в экспериментальных исследованиях

Fig. 1. 3D model of submerged body used in the experimental studies

лей s_c общей длиной 4,25 м был смещен в правую сторону так, чтобы в окно попадали точки Т2 и Т3 для скоростей движения $U = 1,7-2,6$ м/с. Начальная глубина погружения тела задавалась равной $h_{sub} = 0,2$ м. Далее, в зависимости от скорости движения, тело с течением времени под действием подъемной силы либо притягивалось к поверхности, либо отталкивалось от нее. Глубина погружения становилась переменной величиной h_z , зависящей от скорости u_m и от времени t_d .

Относительное вертикальное перемещение модели определялось графически. Напротив водонепроницаемого окна устанавливалась высокоскоростная видеокамера VLXT-50M.I, осуществлявшая съемку в разрешении 2464×2056 пикс. на скорости до 163 кадр./с. Далее производилась раскадровка, и на полученных кадрах измерялось расстояние h_z относительно величины h_{sub} . Проводилось измерение глубины погружения тела h_z в трех фиксированных точках: Т1, Т2, Т3. После прекращения горизонтального движения тело продолжало совершать колебательные вертикальные перемещения.

Таким образом, можно сказать, что точка Т1 соответствовала равномерному движению со скоростью u_m , точка Т2 – начальному этапу торможения, а точка Т3 – конечному этапу торможения. Положение точек Т2 и Т3 зависело от скорости u_m и последующей величины тормозного участка s_d и времени t_d . Дополнительно фиксировалось положение модели в точке Т2.1, равной минимальной глубине движения модели погруженного тела. Для каждого значения скорости u_m проводилось три прогона модели. В качестве экспериментального результата бралось среднее арифметическое значение величины h_z .

При моделировании торможения подо льдом пресноводный модельный лед без добавок намораживался в бассейне естественным холодом при температуре внутри помещения от -12 до -14 °С в зимний период (декабрь 2024 г. – январь 2025 г.). Толщина ледяного покрова равнялась $h_m = 0,002$ м; модуль упругости льда $E = 5 \cdot 10^9$ Па.

Возможность использовать пресноводную модель льда показана в работе Ногида [16]. По сравнению с требованиями теории моделирования естественный лед имеет повышенную прочность, поэтому широкое распространение получила версия о невозможности его использования в качестве модельного. Однако при использовании естественного льда компенсировать повышенную прочность можно, уменьшив его толщину.

Моделирование осуществлялось с частичным выполнением условий подобия [17]. Модель тела была геометрически подобна натурному аппарату. Толщина моделируемого ледяного покрова определялась с помощью зависимости:

$$h_n = h_m \lambda_l^{4/3} \left(\frac{[\sigma_u]_n}{[\sigma_u]_m} \right)^{-1/3}, \quad (1)$$

где $[\sigma_u]_n$ – предел прочности натурального льда на изгиб; $[\sigma_u]_m$ – предел прочности модельного льда на изгиб.

Изгибная прочность модельного льда определялась экспериментально испытанием консолей на плаву согласно рекомендациям работы [18].

В связи со сложностью проведения экспериментов, длительностью подготовки модельного поля льда и ограниченностью холодного периода года была выполнена предварительная серия тестовых прогонов модели с целью определения оптимальных параметров эксперимента: глубины погружения; скорости перемещения модели; длины разгонного участка; участка стационарного движения и времени торможения; толщины модельного льда.

Установлено, что наиболее значимые результаты следовало ожидать при относительном заглублении $h_{sub}/D_m = 1,45$ и относительной скорости стационарного движения $Fr = u_m^2/gL_m = 0,32-0,83$ (где g – ускорение свободного падения).

Основные результаты модельных экспериментов

Main results of model tests

На рис. 3–4 (см. вклейку) показаны примеры кривых относительного вертикального перемещения погруженного тела h_z/h_{sub} на этапе торможения под ледяным покровом $h_m = 0,002$ м в зависимости от длины участка торможения s_d и времени t_d для некоторых значений Fr . Расстояние s_d измерялось от точки Т1, время торможения t_d отсчитывалось от момента времени, соответствующего прохождению телом точки Т1.

Из рисунков видно, что кривые h_z/h_{sub} существенно меняли свой характер в зависимости от значения Fr . При $Fr = 0,32-0,44$, выйдя на стационарный режим движения, в результате воздействия подъемной силы F_z модель тела начинала притягиваться к поверхности. После прохождения точки Т1 и начала торможения глубина погружения плавно возрастала, тело погружалось и к моменту достижения точки Т3 заглубление модели становилось больше значения

$h_{sub} = 0,2$ м (рис. 3), что также видно на раскадровке видеоизображения движения модели (рис. 5а, см. вклейку).

При $Fr = 0,47$ характер кривой несколько менялся и глубина погружения после преодоления точки Т1 плавно уменьшалась, достигая минимума в районе точки Т2. Далее заглублиение росло, достигая максимума в Т3 (рис. 3). После прекращения горизонтального движения на тело продолжала действовать подъемная сила, которая имела колебательный характер в зависимости от времени, в результате тело совершало вертикальные колебания, что частично видно на рис. 4. Аналогичные результаты получены в теоретической работе [12].

С дальнейшим ростом u_m характер воздействия подъемной силы менялся. Для случая свободной поверхности воды максимум F_z в точке Т1 фиксировался при $Fr = 0,44$ (рис. 6, см. вклейку). Подъемная сила была меньше, модель слабее притягивалась к поверхности в районе точки Т1 при Fr до 0,61.

Далее с ростом величины Fr значения h_z/h_{sub} для обоих случаев практически не отличались. Наличие льда приводило к смещению максимума в сторону больших значений Fr (рис. 7, см. вклейку). Тело начинало двигаться с большим заглублиением на участке s_c причем h_z с ростом значений Fr также возрастало.

У кривых h_z/h_{sub} на участке торможения s_d при $Fr > 0,47$ начинал формироваться горб (рис. 3), т.е. заглублиение модели после преодоления точки Т1 уменьшалось, достигая минимума в Т2.1 (рис. 6–7). Очевидно, это связано с характером волнообразования от движения тела на участке s_c и последующим процессом распространения волнового фронта над моделью при ее торможении (рис. 5б–в). Особенно значительная разница между положениями модели в точках Т1, Т2, Т2.1 фиксировалась при $Fr > 0,44$ для движения в условиях чистой воды (рис. 6) и при $Fr > 0,51$ для движения в ледовых условиях (рис. 7), достигая максимума при наибольших значениях Fr . Далее тело уходило вниз, а величина h_z значительно превосходила h_{sub} в точке Т3.

В районе точки Т2 разница между значениями h_z/h_{sub} для случая свободной поверхности воды и воды, покрытой льдом, была наибольшей и фиксировалась во всем исследуемом диапазоне чисел Fr (рис. 6–7). Сравнение же кривых в точках Т1 и Т2, полученных при движении модели в условиях чистой воды, существенной разницы между значениями h_z/h_{sub} не показывает, в отличие от движения в ледовых условиях. К моменту остановки модели в точке Т3 разница между значениями h_z/h_{sub} прак-

тически не фиксировалась, т.е. наличие льда оказывало существенное влияние на характер движения модели при торможении тела только на определенном участке тормозного пути s_d .

Заключение

Conclusion

В ходе работы моделировалось движение модели погруженного тела на трех участках: разгон, выход на стационарное движение с заданным значением Fr и торможение до полной остановки. Проанализировано изменение величины относительного вертикального перемещения тела h_z/h_{sub} в зависимости от длины тормозного участка s_d и времени торможения t_d , которые зависели от скорости тела на стационарном участке движения.

Определен характер движения тела под воздействием подъемной силы при его нестационарном движении на малом заглублиении в условиях как чистой воды, так и воды, покрытой льдом.

При сравнении положения тела в различных точках траектории движения установлено, что в точках Т1 и Т2 модель слабо меняла глубину погружения во всем скоростном диапазоне для случая чистой воды и при $Fr = 0,31–0,54$ для случая движения вблизи нижней поверхности льда. При $Fr > 0,54$ наличие ледяного покрова сказывалось существенно, модель сильнее притягивалась к поверхности. Также наличие льда приводило к смещению локального максимума величины h_z/h_{sub} в сторону больших значений числа Fr . Стоит отметить и изменение характера кривых h_z/h_{sub} при торможении модели тела. В диапазоне $0,31 < Fr < 0,48$ тело плавно увеличивало глубину погружения в ходе торможения. При больших значениях Fr модель резко уходила вверх, уменьшая заглублиение и достигая минимального значения h_z/h_{sub} в точке Т2.1. Далее модель опускалась вниз до полной остановки, а после совершала колебательные движения в вертикальном направлении.

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

Список использованной литературы

1. Prediction of maneuverability of a submarine at surface condition by captive model test / C.S. Kwon, D.J. Kim, Y.Y. Lee [et al.] // Journal of the Society of Naval Archi-

- tests of Korea. 2022. Vol. 59, No. 6. P. 423–431. DOI: 10.3744/SNAK.2022.59.6.423.
- An experimental study on hydrodynamic coefficients of submerged body using planar motion mechanism and coning motion device / *K.P. Rhee, H.K. Yoon, Y.J. Sung* [et al.] // International workshop on ship maneuverability. Hamburg : HSVA, 2000. P. 1–21.
 - Feldman J.* Straightline and rotating arm captive-model experiments to investigate the stability and control characteristics of submarine and other submerged vehicles / David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center. Bethesda, 1987. 6, [2] p. (DTRC/SHD Report ; 0393-20).
 - Lewandowski E.* Tests of a submarine model in coning motion / Davidson laboratory. Hoboken , 1991. (DL TR ; 2660).
 - Study on coning motion test for submerged body / *J.Y. Park, N. Kim, K.P. Rhee* [et al.] // Journal of ocean engineering and technology. 2015. Vol. 29, No. 6. P. 436–444. DOI: 10.5574/KSOE.2015.29.6.436.
 - Mackay M.A.* Review of sting support interference and some related issues for the marine dynamic test facility (MDTF). Dartmouth : Defence Research Establishment Atlantic, 1993. 54 p. (DREA report ; 93/107).
 - Dawson E.* An investigation into the effects of submergence depth, speed and hull length-to-diameter ratio on the near-surface operation of conventional submarines : thesis ... Master of Philosophy / E. Dawson ; University of Tasmania. Hobart, 2014. XV, 198 p.
 - 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. Вып. 4(394). С. 43–52. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-4-394-43-52.
 - Zemlyak V.L., Pogorelova A.V., Kozin V.M.* Motion of a submerged body in a near-surface water environment // International journal of naval architecture and ocean engineering. 2022. Vol. 14. P. 100433. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2021.100433.
 - Коробкин А.А., Костиков В.К., Макаренко Н.И.* Движение эллиптического цилиндра под ледовым покровом // Вестник Новосибирского государственного ун-та. Серия: Математика, механика, информатика. 2012. Т. 12, № 4. С. 76–81.
 - Kostikov V.K., Makarenko N.I., Korobkin A.A.* Unsteady motion of circular cylinder under ice cover // IOP Conference series: Earth and environmental science. 2018. Vol. 193. P. 012036. DOI: 10.1088/1755-1315/193/1/012036.
 - Погорелова А.В., Земляк В.Л., Козин В.М.* Влияние торможения тонкого тела на его подъемную силу при движении под ледяным покровом // Труды Крыловского государственного научного центра. 2024. Спец. вып. 1 : доклады Всероссийской конференции с международным участием «Арктика: прикладные и фундаментальные задачи ледотехники». С. 140–146.
 - 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.
 - Experimental and computational investigation of a generic conventional submarine hull form / *B. Anderson, M. Chapuis, L. Erm* [et al.] // 29th Symposium on naval hydrodynamics. Gothenburg, 2012.
 - Hama F.R., Long J.D., Hegarty J.C.* On Transition from laminar to turbulent flow // Journal of applied physics. 1957. Vol. 28, No. 4. P. 388–394. DOI: 10.1063/1.1722760.
 - Ногид Л.М.* Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и в битых льдах // Труды ЛКИ. 1959. Вып. 28. С. 179–185.
 - Козин В.М.* Обоснование исходных данных для выбора основных параметров СВП, предназначенных для разрушения ледяного покрова резонансным способом: дис. ... канд. техн. наук. Горький, 1983. 314 с.
 - Степанюк А.И.* Технологии испытаний и моделирования морского льда. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 2001. 77 с.

References

- Prediction of maneuverability of a submarine at surface condition by captive model test / *C.S. Kwon, D.J. Kim, Y.Y. Lee* [et al.] // Journal of the Society of Naval Architects of Korea. 2022. Vol. 59, No. 6. P. 423–431. DOI: 10.3744/SNAK.2022.59.6.423.
- An experimental study on hydrodynamic coefficients of submerged body using planar motion mechanism and coning motion device / *K.P. Rhee, H.K. Yoon, Y.J. Sung* [et al.] // International workshop on ship maneuverability. Hamburg : HSVA, 2000. P. 1–21.
- Feldman J.* Straightline and rotating arm captive-model experiments to investigate the stability and control characteristics of submarine and other submerged vehicles / David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center. Bethesda, 1987. 6, [2] p. (DTRC/SHD Report ; 0393-20).
- Lewandowski E.* Tests of a submarine model in coning motion / Davidson laboratory. Hoboken, 1991. (DL TR ; 2660).
- Study on coning motion test for submerged body / *J.Y. Park, N. Kim, K.P. Rhee* [et al.] // Journal of ocean engineering and technology. 2015. Vol. 29, No. 6. P. 436–444. DOI: 10.5574/KSOE.2015.29.6.436.

6. Mackay M.A. Review of sting support interference and some related issues for the marine dynamic test facility (MDTF). Dartmouth : Defence Research Establishment Atlantic, 1993. 54 p. (DREA report ; 93/107).
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 : thesis ... Master of Philosophy / E. Dawson ; University of Tasmania. Hobart, 2014. XV, 198 p.
8. Zemlyak V.L., Kozin V.M., Vasiliev A.S. Vertical shift of submerged body moving near the free surface // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020. Vol. 4(394). P. 43–52. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-4-394-43-52 (in Russian).
9. Zemlyak V.L., Pogorelova A.V., Kozin V.M. Motion of a submerged body in a near-surface water environment // International journal of naval architecture and ocean engineering. 2022. Vol. 14. P. 100433. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2021.100433.
10. Korobkin A.A., Kostikov V.K., Makarenko N.I. Motion of an elliptical cylinder under ice cover // Vestnik NSU. Series: Mathematics, mechanics, informatics. 2012. Vol. 12, No. 4. P. 76–81 (in Russian).
11. Kostikov V.K., Makarenko N.I., Korobkin A.A. Unsteady motion of circular cylinder under ice cover // IOP Conference series: Earth and environmental science. 2018. Vol. 193. P. 012036. DOI: 10.1088/1755-1315/193/1/012036.
12. Pogorelova A.V., Zemlyak V.L., Kozin V.M. Effect of slender body deceleration on lifting force under ice cover // Transactions of Krylov State Research Centre. 2024. Special issue 1: Papers of All-Russian Conference with international participation “Arctics: Applied and fundamental tasks of ice technology”. P. 140–146 (in Russian).
13. Zemlyak V.L., Kozin V.M. Ice Basin of Ice Engineering Laboratory // Transactions of Sholom-Aleikhem Amur State University. 2021. No. 1(42). P. 19–31. DOI: 10.24412/2227-1384-2021-142-19-31 (in Russian).
14. Experimental and computational investigation of a generic conventional submarine hull form / B. Anderson, M. Chapuis, L. Erm [et al.] // 29th Symposium on naval hydrodynamics. Gothenburg, 2012.
15. Hama F.R., Long J.D., Hegarty J.C. On Transition from laminar to turbulent flow // Journal of applied physics. 1957. Vol. 28, No. 4. P. 388–394. DOI: 10.1063/1.1722760.
16. Nogid L.M. Simulation of ship movement in level and broken ice // Transactions of Leningrad Shipbuilding Institute (now SMTU). 1959. Vol. 28. P. 179–185 (in Russian).
17. Kozin V.M. Justification of inputs for selection of main parameters of ACV for resonance-based icebreaking operations : Cand. Sci. Theses / V.M. Kozin. Gorky, 1983. 314 p. (in Russian).
18. Stepanyuk A.I. Technologies of experiments and modeling of sea ice. St. Petersburg : Gidrometeoizdat, 2001. 77 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Земляк Виталий Леонидович, к.ф.-м.н., доцент, заведующий лабораторией ледотехники ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема». Адрес: 679015, Россия, Еврейская автономная область, Биробиджан, Широкая ул., д. 70а. E-mail: vellkom@list.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3218-5738>.

Козин Виктор Михайлович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий ФГБУН «Институт машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН». Адрес: 681005, Россия, Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, д. 1. E-mail: kozinvictor@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2673-469X>.

Ипатов Константин Игоревич, инженер-исследователь лаборатории ледотехники ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема». Адрес: 679015, Россия, Еврейская автономная область, Биробиджан, Широкая ул., д. 70а. E-mail: ipatov21@mail.ru.

Болтовский Лев Александрович, техник лаборатории ледотехники ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема». Адрес: 679015, Россия, Еврейская автономная область, Биробиджан, Широкая ул., д. 70а. E-mail: levboltovskiy@mail.ru.

Бабашов Даниэль Эльманович, техник лаборатории ледотехники ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема». Адрес: 679015, Россия, Еврейская автономная область, Биробиджан, Широкая ул., д. 70а. E-mail: daniel.babashov2020@mail.ru.

About authors

Vitaly L. Zemlyak, Cand. Sci. (Phys. & Math.), Associate Professor, Head of Ice Technology Laboratory of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sholom-Aleikhem Amur State University”. Address: 70a, Shirokaya st., Birobidzhan, Jewish Autonomous Region, Russia, post code 679015. E-mail: vellkom@list.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3218-5738>.

Viktor M. Kozin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Materials Creation and Processing Laboratory of the Federal Publicly Funded Institution of Science, Institute of Mechanical

Engineering and Metallurgy of the Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. Address: 1, Metallurgov st., Komsomolsk-on-Amur, Russia, post code 681005. E-mail: kozinvictor@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2673-469X>.

Konstantin I. Ipatov, Research Engineer of Ice Technology Laboratory of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sholom-Aleihem Amur State University”. Address: 70a, Shirokaya st., Birobidzhan, Jewish Autonomous Region, Russia, post code 679015. E-mail: ipatov21@mail.ru.

Lev A. Boltovsky, Technician of Ice Technology Laboratory of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sholom-Aleihem Amur State University”. Address: 70a, Shirokaya st., Birobidzhan, Jewish Autonomous Region, Russia, post code 679015. E-mail: levboltovsky@mail.ru.

Daniel E. Babashov, Technician of Ice Technology Laboratory of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sholom-Aleihem Amur State University”. Address: 70a, Shirokaya st., Birobidzhan, Jewish Autonomous Region, Russia, post code 679015. E-mail: daniel.babashov2020@mail.ru.

Поступила / Received: 09.08.25
Принята в печать / Accepted: 12.02.26
© Коллектив авторов, 2026

Рис. 2. Схема проведения модельного эксперимента (вид сверху): 1 – ледовый бассейн; 2 – модель тела; 3 – водонепроницаемое окно; 4 – высокоскоростная видеокамера; 5 – разгонный участок; 6 – стационарный участок движения; 7 – тормозной участок

Fig. 2. Setup of model experiment (top view): 1 – ice basin; 2 – body model; 3 – watertight window; 4 – high-speed camera; 5 – acceleration distance; 6 – constant speed distance; 7 – deceleration distance

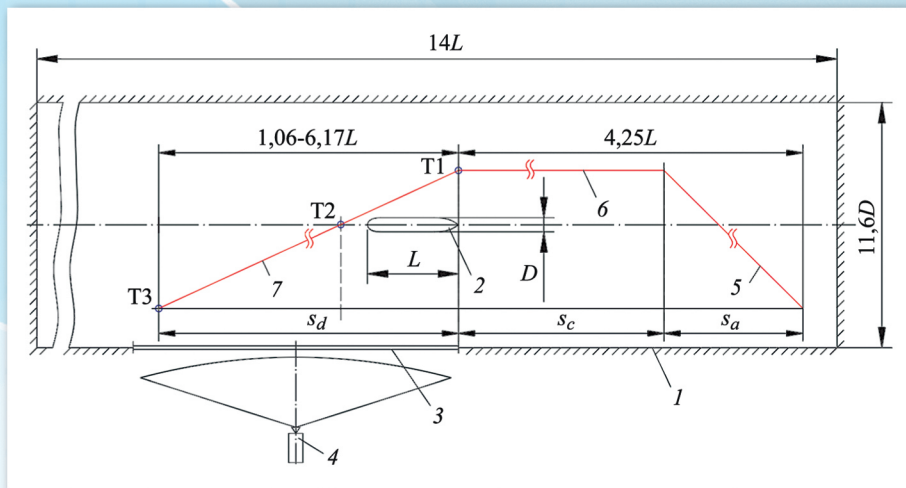


Рис. 3. Зависимости h_z/h_{sub} от длины тормозного участка s_d : 1 – Fr = 0,44; 2 – Fr = 0,48; 3 – Fr = 0,54; 4 – Fr = 0,61; 5 – Fr = 0,67; 6 – Fr = 0,73

Fig. 3. h_z/h_{sub} versus deceleration distance s_d : 1 – Fr = 0.44; 2 – Fr = 0.48; 3 – Fr = 0.54; 4 – Fr = 0.61; 5 – Fr = 0.67; 6 – Fr = 0.73

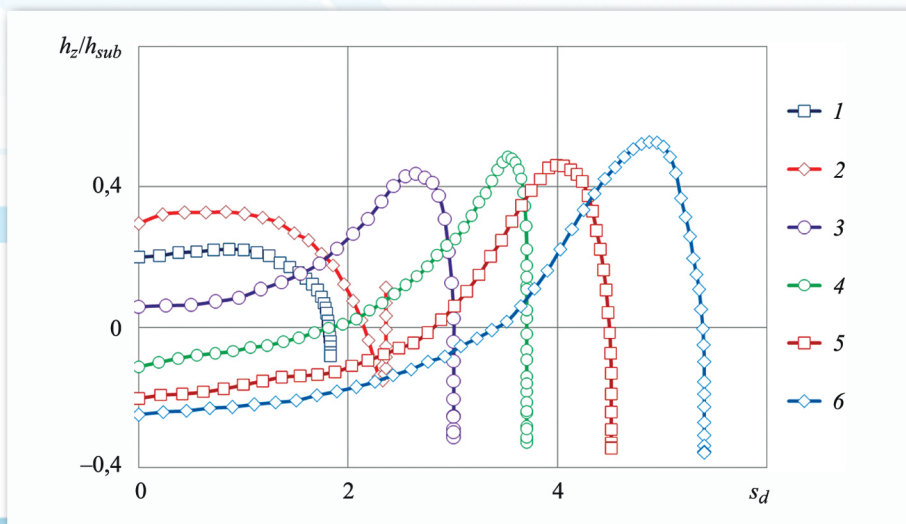
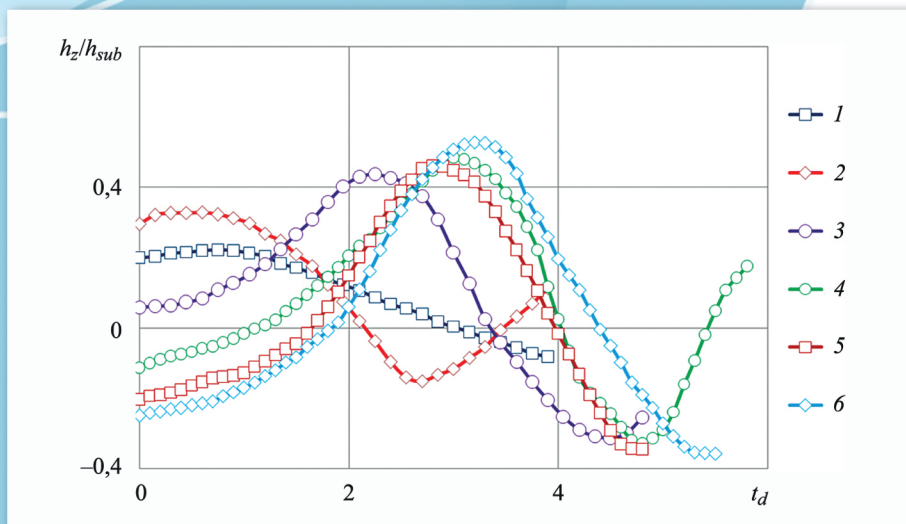


Рис. 4. Зависимости h_z/h_{sub} от времени торможения t_d : 1 – Fr = 0,44; 2 – Fr = 0,48; 3 – Fr = 0,54; 4 – Fr = 0,61; 5 – Fr = 0,67; 6 – Fr = 0,73

Fig. 4. h_z/h_{sub} versus deceleration time t_d : 1 – Fr = 0.44; 2 – Fr = 0.48; 3 – Fr = 0.54; 4 – Fr = 0.61; 5 – Fr = 0.67; 6 – Fr = 0.73



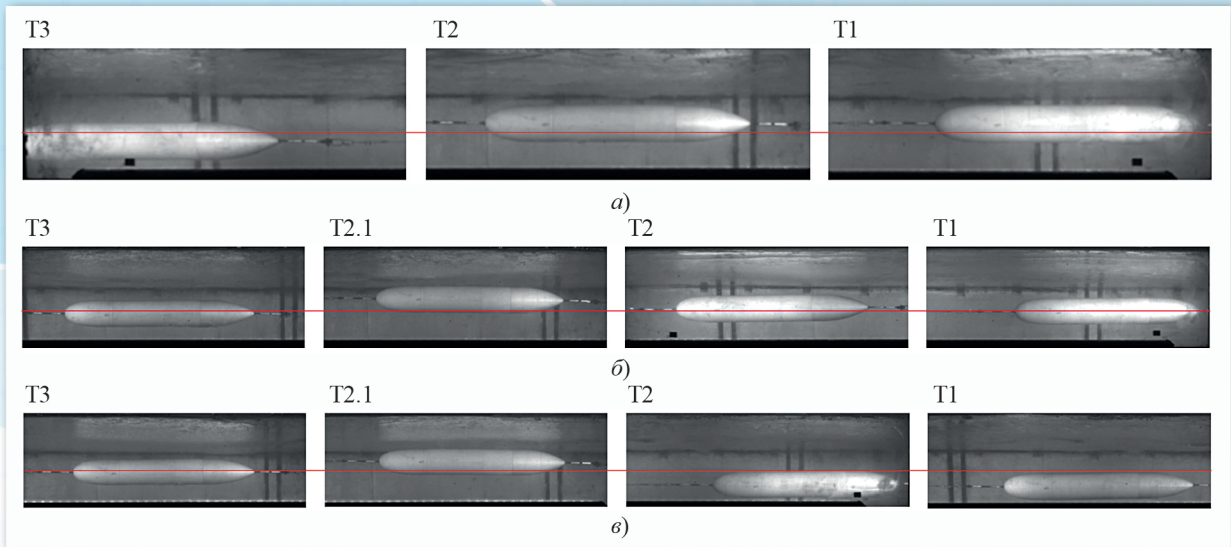


Рис. 5. Характер движения модели тела при торможении под ледяным покровом $h = 0,002$ м (красная линия соответствует значению $d = 0,2$ м): а) $Fr = 0,44$; б) $Fr = 0,54$; в) $Fr = 0,61$

Fig. 5. Motion of body model at deceleration under ice cover $h = 0.002$ m (red curve refers to $d = 0.2$ m): а) $Fr = 0.44$; б) $Fr = 0.54$; в) $Fr = 0.61$

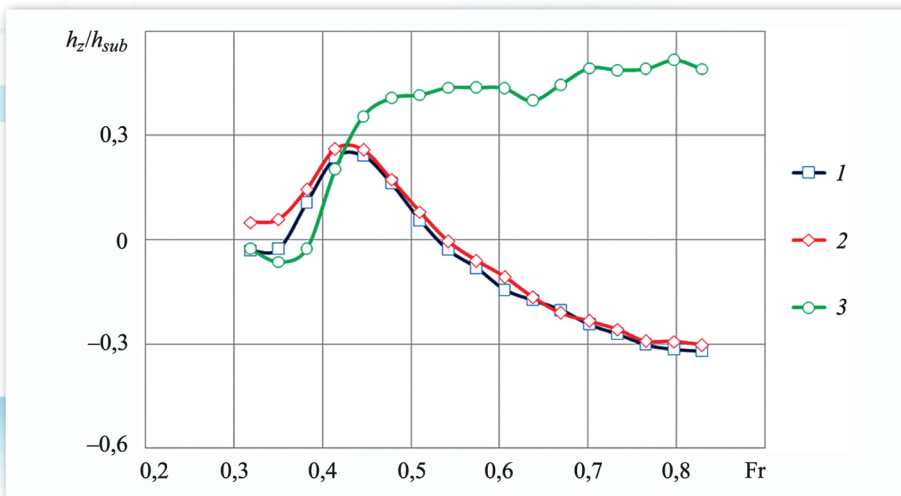


Рис. 6. Зависимости h_z/h_{sub} от Fr для случая движения модели подо льдом: 1 – T1; 2 – T2; 3 – T2.1

Fig. 6. h_z/h_{sub} versus Fr for body model under ice: 1 – T1; 2 – T2; 3 – T2.1

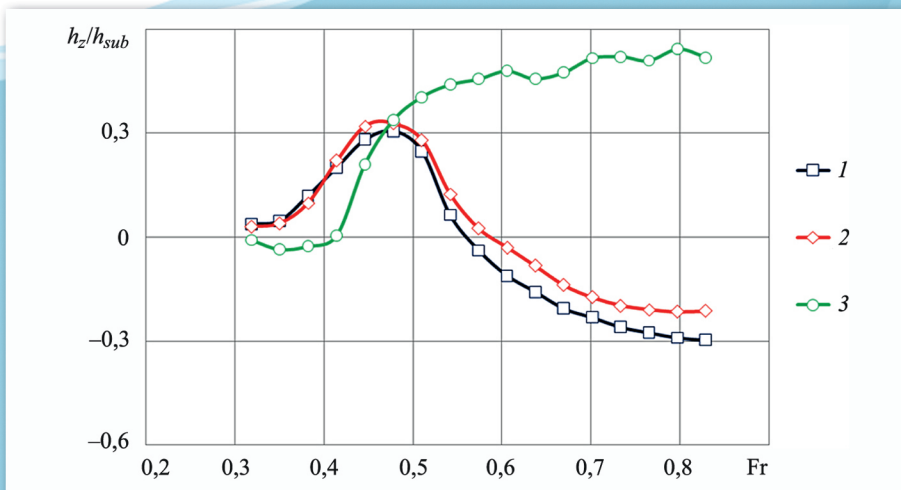


Рис. 7. Зависимости h_z/h_{sub} от Fr для случая движения модели вблизи свободной поверхности воды: 1 – T1; 2 – T2; 3 – T2.1

Fig. 7. h_z/h_{sub} versus Fr for body model near free water surface: 1 – T1; 2 – T2; 3 – T2.1