

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-48-59  
УДК 532.3+532.59

В.Л. Земляк<sup>1</sup> , В.М. Козин<sup>2</sup> , А.С. Васильев<sup>1</sup>, С.А. Чингалаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема», Биробиджан, Россия

<sup>2</sup> ФГБНУ «Институт машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН», Комсомольск-на-Амуре, Россия

## ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ АКВАТОРИИ НА ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ ПОГРУЖЕННОГО ТЕЛА ВБЛИЗИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ

**Объект и цель научной работы.** Объектом исследования является процесс движения погруженного тела заданной формы вблизи свободной поверхности жидкости в условиях ограниченной глубины акватории. Цель состоит в определении влияния глубины акватории на волновое сопротивление, вертикальную подъемную силу и гидродинамический момент, действующие на тело со стороны жидкости.

**Материалы и методы.** Материалом для проведения исследований является методика моделирования, технологии и результаты модельных экспериментов в опытовом бассейне. Численное моделирование выполнено с помощью программного комплекса ANSYS.

**Основные результаты.** Проведено экспериментально-теоретическое исследование влияния глубины акватории на волнообразование, волновое сопротивление, подъемную силу и гидродинамический момент, возникающие при движении погруженного тела в приповерхностной водной среде.

**Заключение.** Полученные результаты полезны для стабилизации движения погруженного тела в горизонтальной плоскости в зависимости от скорости его движения при различном заглублении в условиях ограниченной глубины акватории.

**Ключевые слова:** погруженное тело, свободная поверхность жидкости, глубина акватории.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-48-59  
UDC 532.3+532.59

V.L. Zemlyak<sup>1</sup> , V.M. Kozin<sup>2</sup> , A.S. Vasilyev<sup>1</sup>, S.A. Chingalaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sholom-Aleikhem Amur State University, Birobidzhan, Russia

<sup>2</sup> Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy, Khabarovsk Federal Research Centre, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-on-Amur, Russia

## WATER DEPTH EFFECT UPON MOTION PARAMETERS OF SUBMERGED BODY NEAR FREE SURFACE

**Object and purpose of research.** This paper discusses motion parameters of submerged body with given shape near the free surface at limited water depth. The purpose of this study was to determine the effect of water depth upon wave-making resistance, uplift force and hydrodynamic moment acting on the body from the side of fluid.

**Materials and methods.** The paper relies on simulation procedure, as well as model test techniques and results obtained at the test tank. Numerical simulation was performed in ANSYS software package.

*Для цитирования:* Земляк В.Л., Козин В.М., Васильев А.С., Чингалаев С.А. Влияние глубины акватории на характер движения погруженного тела вблизи свободной поверхности жидкости. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 1(403): 48–59.

*For citations:* Zemlyak V.L., Kozin V.M., Vasilyev A.S., Chingalaev S.A. Water depth effect upon motion parameters of submerged body near free surface. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 1(403): 48–59 (in Russian).

**Main results.** This experimental and theoretical study yielded the parameters of water depth effect upon wave-making resistance, uplift force and hydrodynamic moment taking place when a submerged body runs near free surface.

**Conclusion.** The results of this study could be helpful for horizontal stabilization of submerged body moving at various speeds and various diving depths in shallow water areas.

**Keywords:** submerged body, free surface, water depth.

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

Автономные подводные аппараты нашли широкое применение в различных сферах деятельности [1, 2], представляя собой универсальное подводное средство, используемое для решения исследовательских задач, разведки и добычи полезных ископаемых, обслуживания подводных трубопроводов и т.п. При этом растущая надежность таких аппаратов позволяет эксплуатировать их в суровых морских условиях, в т.ч. при ограниченной глубине акватории.

Тем не менее для повышения эффективности работы подобных систем требуется более глубокое понимание влияния сил и моментов, действующих на погруженное тело при его движении вблизи свободной поверхности воды. Гидродинамические характеристики подводного аппарата могут быть получены математическими и экспериментальными методами.

При движении погруженного тела на малом заглублении на поверхности жидкости формируется волновая система. Генерация поверхностных волн приводит к росту силы сопротивления [3, 4]. Кроме силы волнового сопротивления  $R_w$ , на погруженное тело действуют подъемная сила  $F_z$  и гидродинамический момент  $M_y$ . В работах [5–10] выполнена оценка гидродинамических характеристик подводных аппаратов, движущихся вблизи свободной поверхности жидкости при различном заглублении

и числах Фруда  $Fr = \frac{u}{\sqrt{gL}}$  (где  $u$  – скорость движения,

$g$  – ускорение свободного падения,  $L$  – длина погруженного тела). Проанализировано влияние на исследуемые параметры формы носовой и кормовой оконечностей, наличия выступающих частей.

Доусон (Dawson) в экспериментально-теоретическом исследовании [11] показал, что при движении погруженного тела на малом заглублении влияние волнового сопротивления вторично, а наибольшее эксплуатационное значение приобретают подъемная сила и гидродинамический момент, вызывающий дифферент судна. Очевидно, что значения гидродинамических характеристик погруженного тела уменьшаются с ростом его заглубления, однако вопрос влияния глубины дна на исследуемые параметры остается открытым.

Целью исследования являлось определение влияния глубины акватории на волновое сопротивление, вертикальную подъемную силу и гидродинамический момент, действующие на тело со стороны жидкости.

## Подготовка к проведению модельных и численных экспериментов

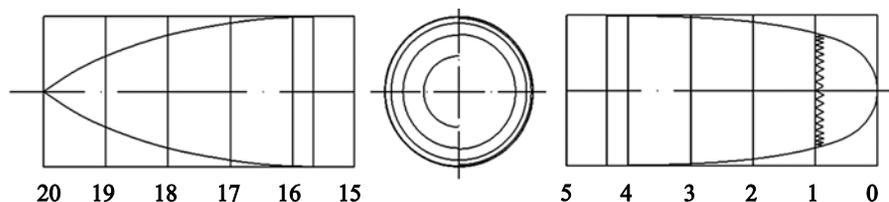
### Preparation for model tests and numerical simulations

Модельные исследования проводились в опытовом бассейне лаборатории ледотехники (ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема») [12].

В экспериментах использовалась модель погруженного тела асимметричной формы круглого сечения с цилиндрической вставкой и относительным удлинением  $L^* = L/D = 8,4$  при  $L = 1,154$  м (где  $D$  – диаметр). Коэффициент полноты мидельшпангоута равнялся  $\beta = 0,785$ , коэффициент общей полноты  $\delta = 0,673$ . Теоретический чертеж погруженного тела показан на рис. 1. Для изготовления модели использовался метод послойной печати с помощью 3D-принтера Raise3D.

**Рис. 1.** Теоретический чертеж модели погруженного тела

**Fig. 1.** Lines drawing of submerged body model



Моделирование турбулентного режима течения в пограничном слое осуществлялось искусственным турбулизатором в виде полосы Хама (Hama) [13]. Турбулизатор размещался на расстоянии  $0,05L$  от носового перпендикуляра. С учетом длины модели, требуемой высоты турбулизатора, а также возможности его изготовления с помощью 3D-печати с высокой точностью полоса Хама оказалась оптимальным решением, обеспечивающим достаточный уровень устойчивого турбулентного потока при минимальном увеличении сопротивления при движении модели по сравнению с эквивалентным ей проволочным турбулизатором.

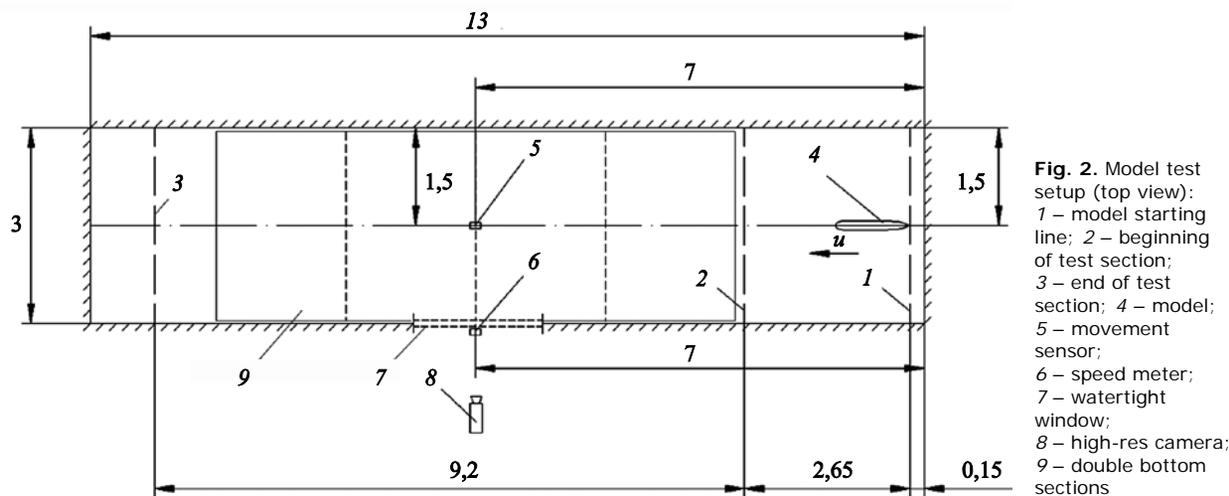
Характеристики погруженного тела и форма его носовой и кормовой оконечностей полностью соответствовали модели, использованной в исследовании [14]. В этой же работе авторы описали особенности и методику проведения модельных экспериментов для определения относительного вертикального перемещения тела  $h_m/h_{sub}$  (где  $h_m$  – отклонение модели от первоначально заданного заглубления  $h_{sub}$ ), возникающего под воздействием подъемной силы  $F_z$ . Выполнена оценка сопоставления полученных результатов с данными известных экспериментальных исследований для глубокой воды  $H_b > 6,5D$  (где  $H_b$  – глубина дна) [11].

В рамках настоящего исследования в чаше опытового бассейна дополнительно были установлены четыре секции подвесного дна. Они закреплялись на специальных подвижных каретках и могли перемещаться в вертикальном направле-

нии на заданную глубину с помощью сервоприводов, что обеспечивало высокую точность позиционирования секций.

Ранее проведенные тестовые прогоны показали, что с учетом параметров опытового бассейна и модели погруженного тела наиболее оптимальными значениями малой глубины дна являются  $H_{b1}^* = H_b/D = 2,9$ ,  $H_{b2}^* = 3,6$ ,  $H_{b3}^* = 4,3$ . Параметр, при котором моделировалась большая глубина, равнялся  $H_{b4}^* = 7,5$ . Первоначально заданное относительное заглубление модели при проведении модельных экспериментов составило  $H_1^* = h_{sub}/D = 1,16$  и  $H_2^* = 1,45$ . Относительная скорость движения погруженного тела равнялась  $Fr = 0,3-0,77$ .

Минимальное значение числа  $Fr$  выбиралось с учетом особенностей конструкции буксировочной тележки, которая представляет собой ферменную конструкцию, установленную на специальных каретках, перемещающихся по рельсовым направляющим. Перемещение тележки осуществляется с помощью шестерни, закрепленной на валу серводвигателя и сопряженной с развернутой зубчатой рейкой. Подобная конструкция не позволяет добиться стационарного движения при  $Fr < 0,3$ , однако обеспечивает плавность хода при большей относительной скорости, а также позволяет осуществлять остановку буксировочной тележки практически мгновенно, исключая ее проскальзывание в процессе буксировки моделей нагрузки при высоких значениях  $Fr$  (рис. 2).



**Fig. 2.** Model test setup (top view): 1 – model starting line; 2 – beginning of test section; 3 – end of test section; 4 – model; 5 – movement sensor; 6 – speed meter; 7 – watertight window; 8 – high-res camera; 9 – double bottom sections

**Рис. 2.** Схема проведения модельного 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

Для проведения численных расчетов в условиях ограниченной глубины акватории использовался ранее разработанный авторами в программном комплексе ANSYS 19 R2 Academic Research алгоритм, описанный в работе [14]. Решение поставленной задачи осуществлялось путем доработки численной модели с целью учета влияния глубины дна на результаты гидродинамических расчетов.

На рис. 3 показана дискретизация модели объекта в водной среде. Сетка накладывалась с учетом пристеночных слоев, с использованием сеточной функции Inflation для улучшения обтекаемости объекта в потоке. Построение сетки осуществлялось алгоритмом CutCell. Модель расчетной области состояла из ячеек в форме гексаэдров.

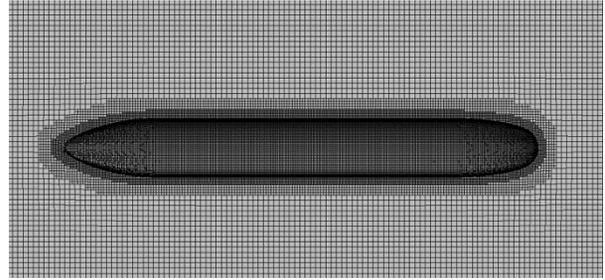
За основу движения тела взяты две модели: модель Multiphase для учета двухфазной среды и модель турбулентности  $k-\varepsilon$ . Уравнение Volume fraction использовалось для реализации модели Multiphase [15]. При исследовании волнообразования на поверхности жидкости от движения объекта в водной среде, принималось, что жидкая и газообразная среды разделены четкими границами. Для решения применялся численный метод определения объема жидкости Volume of fluid. Данный метод предполагает, что фазы (жидкость и газ) рассматриваются как непрерывные, и не допускает их взаимного проникновения друг в друга. Отслеживание границы между фазами осуществляется решением уравнения неразрывности для объемной доли каждой из фаз [16]:

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{u}_q) = 0 \quad (q = g \text{ (gas) or } l \text{ (liquid)}),$$

где  $\alpha_q$  – объемная доля фазы в общем объеме;  $\rho_q$  – плотность фазы;  $\nabla$  – оператор набла;  $\mathbf{u}_q$  – скорость фазы. Индексы  $g$  и  $l$  представляли газовую и жидкую среды соответственно.

При расчете движения погруженного тела средствами ANSYS Fluent использовалась модель турбулентности  $k-\varepsilon$ . Для определения турбулентной вязкости в этой модели рассматривались два скалярных параметра:  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  $\varepsilon$  – скорость вязкой диссипации энергии турбулентности [17]. В этом случае система уравнений Навье – Стокса приобретала следующий вид [16]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0;$$



**Рис. 3.** Дискретная модель объекта в водной среде  
**Fig. 3.** Discrete model of object in water

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \\ = -\frac{\partial}{\partial x_i} P' + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M, \end{aligned}$$

где  $u_i$  и  $u_j$  – компоненты скорости ( $i = x, y, z; j = x, y, z$ );  $x_i$  и  $x_j$  – компоненты перемещения;  $P'$  – модифицированное давление;  $\mu_{eff}$  – эффективная вязкость с учетом турбулентности;  $S_M$  – сумма сил, действующих на тело.

$$P' = P + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k},$$

где  $k = \frac{1}{2} u_i^2$ ;  $\mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  – дивергенция скорости.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t,$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости;  $\mu_t$  – турбулентная вязкость.

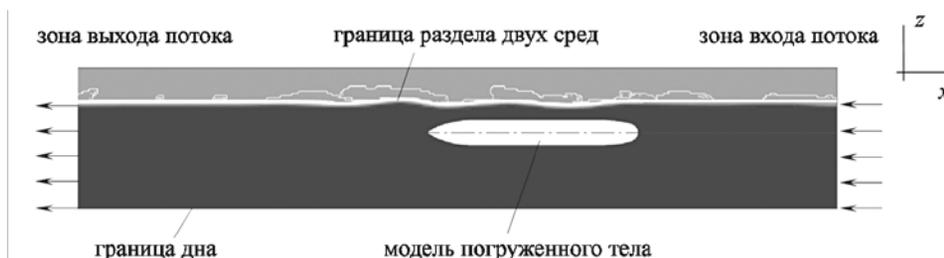
$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon},$$

где  $C_\mu$  – эмпирическая константа, равная 0,09 [17].

Уравнение переноса кинетической энергии турбулентности в турбулентном потоке имело вид:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon;$$

$$P_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \left( 3\mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k \right).$$



**Рис. 4.** Граничные условия модели

**Fig. 4.** Boundary conditions of the model

Уравнение скорости диссипации турбулентности  $\epsilon$ :

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \left( -\rho u_i u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

Расчеты выполнялись в стационарном решателе Stationary. На рис. 4 представлена граница раздела сред. Нижняя зона расчетной области, характеризующая дно, как и поверхность погруженного тела, имела тип граничного условия Wall (абсолютно жесткое тело):  $u_{Wall} = 0$ .

Для входной зоны потока выбирался тип граничного условия Mass-flow-inlet – массовый равномерный расход жидкости на входе:

$$\rho u = \frac{\dot{m}}{\int dA},$$

где  $\dot{m}$  – массовый расход жидкости,  $\int dA$  – интеграл по площади граничной поверхности при заданном размере сетки.

Зоне выхода потока соответствовал тип граничного условия Static pressure – равномерное статическое давление равное заданному [16]:

$$P_{Stat} = P_{Spec}.$$

Численная модель полностью повторяла параметры модельного эксперимента, позволяла моделировать волнообразование на свободной поверхности жидкости от движения погруженного тела и определять давление, силы и гидродинамический момент, действующие на тело. На основе полученных значений строилась зависимость вертикальной составляющей распределения давления вдоль нижней поверхности погруженного тела в виде коэффициента  $C_p = \frac{P - P_\infty}{0,5\rho u^2}$ , зависимость коэффициента

волнового сопротивления  $C_w = \frac{R_w}{0,5\rho u^2 S}$ , зави-

симость коэффициента подъемной силы

$$C_F = \frac{F_z}{0,5\rho u^2 S} \text{ и коэффициента гидродинамическо-$$

$$\text{го момента } C_M = \frac{M_y}{0,5\rho u^2 SL}.$$

При определении  $F_z$  за положительные значения принималась сила, направленная вертикально вверх и притягивающая погруженное тело к поверхности воды, за отрицательные значения – сила, отталкивающая тело вниз. За положительные значения  $M_y$  принимался момент, вызывающий дифферент судна на корму, за отрицательные – момент, вызывающий дифферент на нос.

## Основные результаты модельных и численных экспериментов

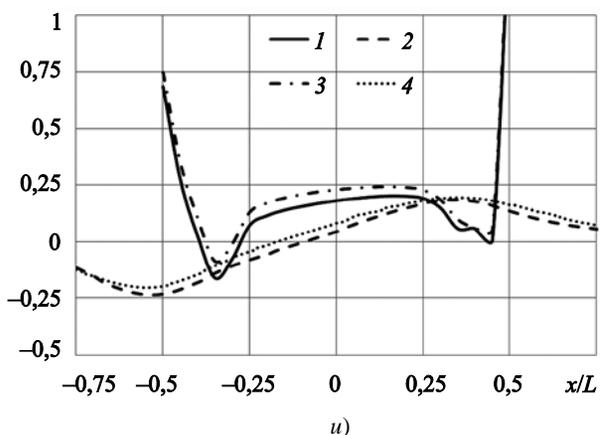
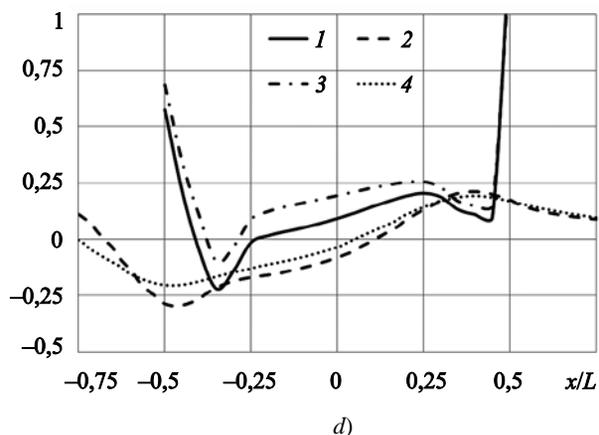
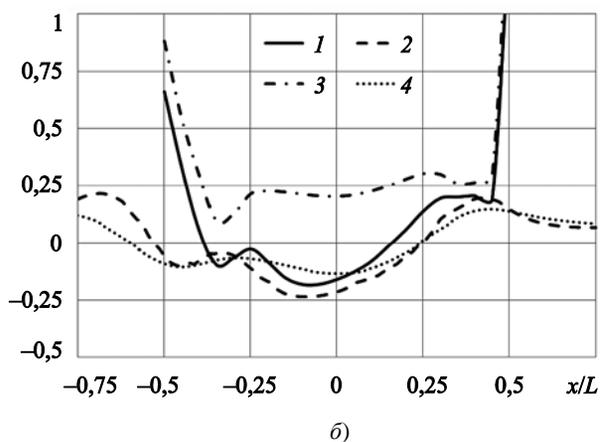
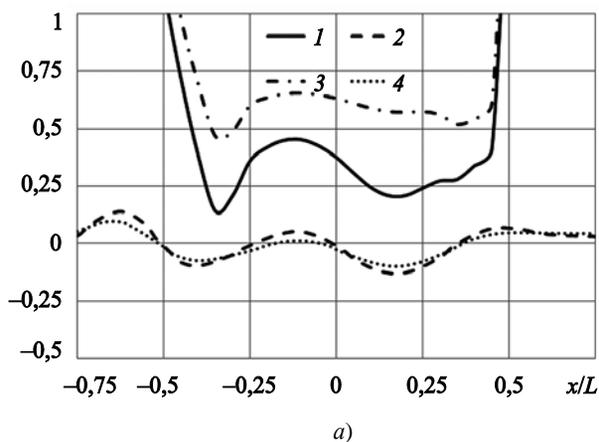
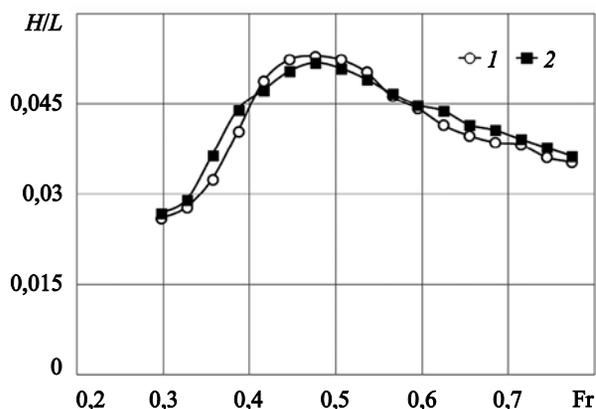
Main results for model tests and numerical simulations

На начальном этапе для оценки работоспособности предложенного численного решения было выполнено сопоставление полученных результатов модельных экспериментов и теоретических расчетов значений относительной величины максимальной высоты поверхностных волн  $H/L$  для всех рассматриваемых случаев движения модели. На рис. 5 показан пример сопоставления зависимостей  $H/L$  от относительной скорости движения тела. Анализ зависимостей показал достаточно хорошую сходимость между полученными значениями. Расхождения между величинами не превышали 5 %.

Рост относительной скорости движения погруженного тела приводил к изменению поля давления вокруг него, соответственно менялся и характер волнообразования на свободной поверхности воды. На рис. 6 показан пример изменения формы профиля гравитационных волн в зависимости от чисел  $Fg$  и величины заглупления при малой глубине дна.

**Рис. 5.** Зависимости максимальных значений  $H/L$  от относительной скорости движения погруженного тела при  $H_1^* = 1,16$  и  $H_{b3}^* = 4,3$ : 1 – модельный эксперимент; 2 – численный расчет

**Fig. 5.** Maximum  $H/L$  versus relative speed of submerged body at  $H_1^* = 1.16$  and  $H_{b3}^* = 4.3$ : 1 – model test; 2 – numerical calculation



**Рис. 6.** Сопоставление между областями давления и профилями гравитационных волн для различных чисел  $Fr$  при  $H_{b3}^* = 4,3$ : а)  $Fr = 0,3$ ; б)  $Fr = 0,39$ ; в)  $Fr = 0,51$ ; г)  $Fr = 0,65$ ; 1 –  $C_p$  ( $H_1^* = 1,16$ ); 2 –  $H/L \times 10$  ( $H_1^* = 1,16$ ); 3 –  $C_p$  ( $H_2^* = 1,45$ ); 4 –  $H/L \times 10$  ( $H_2^* = 1,45$ )

**Fig. 6.** Pressure domains and gravitation wave profiles for various  $Fr$  numbers at  $H_{b3}^* = 4,3$ : а)  $Fr = 0.3$ ; б)  $Fr = 0.39$ ; в)  $Fr = 0.51$ ; г)  $Fr = 0.65$ ; 1 –  $C_p$  ( $H_1^* = 1.16$ ); 2 –  $H/L \times 10$  ( $H_1^* = 1.16$ ); 3 –  $C_p$  ( $H_2^* = 1.45$ ); 4 –  $H/L \times 10$  ( $H_2^* = 1.45$ )

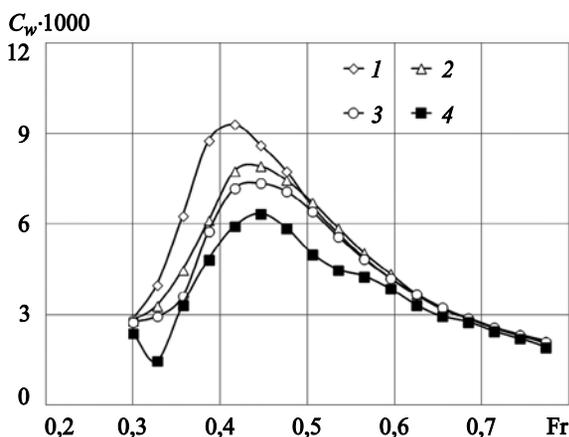
При относительной скорости движения  $0,3 < Fr < 0,51$  разность между значениями  $H/L$  и  $C_p$  для  $H_1^*$  и  $H_2^*$  возрастала (рис. 6а, 6б). При  $Fr > 0,51$  разность начинала уменьшаться, второй гребень гравитационной волны значительно смещался за кормовую оконечность тела (рис. 6в). Чаша прогиба с ростом числа  $Fr$  смещалась от мидель-шпангоута при  $Fr = 0,36$  до кормового перпендикуляра при  $Fr = 0,6$  и за него при более высоких скоростях. При этом разность между значениями  $H/L$  и  $C_p$  для  $H_1^*$  и  $H_2^*$  при  $Fr > 0,65$  становилась крайне незначительной (рис. 6г). Смещение фазы гравитационной волны происходило в результате смещения области пониженного давления в кормовую оконечность тела.

Результаты численного моделирования показали, что движение в условиях малой глубины акватории приводило к значительному росту значения коэффициента волнового сопротивления  $C_w$  по сравнению с данными для глубокой воды ( $H_{b4}^* = 7,5$ ), особенно это было заметно в диапазоне относительных скоростей  $0,33 < Fr < 0,51$  (рис. 7–8). Только в случае движения тела на заглублении  $H_2^* = 1,45$  при глубине дна  $H_{b3}^* = 4,3$  значения  $C_w$  незначительно отличались от данных для глубокой воды. Значение относительной критической скорости волнового сопротивления, т.е. скорости, при которой  $C_w$  приобретало максимальные значения с уменьшением глубины дна, сдвигалось в область меньших значений  $Fr = 0,42$

при  $H_1^* = 1,16$  и  $Fr = 0,45$  при  $H_2^* = 1,45$  по сравнению со случаем большой глубины дна  $Fr = 0,45$  и  $Fr = 0,48$  соответственно.

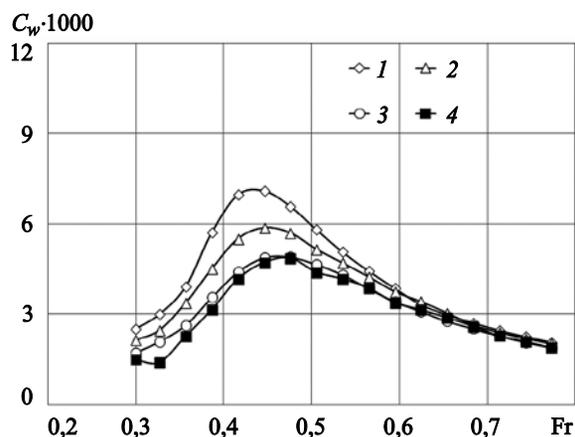
Неравномерное распределение давления по верхней и нижней поверхности тела приводило к возникновению вертикальной подъемной силы  $F_z$ , оказывавшей значительное влияние на изменение величины заглубления. Проведенные численные эксперименты показали, что при скорости движения  $u \rightarrow 0$ , значение параметров  $R_w$  и  $M_y$  стремится к нулевым значениям, а величина подъемной силы  $C_F$ , наоборот, стремится к ненулевому значению  $C_{F0}$ , что согласуется с результатами работы [18]. Поэтому на рис. 9–10 показаны зависимости  $C_F$  за вычетом значения  $C_{F0}$ .

Как и для значений  $C_w$ , при малых глубинах дна по сравнению со случаем глубокой воды наблюдалось резкое возрастание значений  $C_F - C_{F0}$  в области локального максимума при  $Fr = 0,39$  для случая  $H_1^* = 1,16$  (рис. 9). Для относительного заглубления  $H_2^* = 1,45$  значительного роста подъемной силы в диапазоне относительных скоростей  $0,3 < Fr < 0,42$  не наблюдалось, а вот сила, отталкивающая тело от поверхности воды при скоростях  $Fr > 0,42$ , действовала значительно сильнее, чем при глубине  $H_{b4}^* = 7,5$ . Это также подтверждалось экспериментальными зависимостями относительного вертикального перемещения  $h_m/h_{sub}$  (рис. 11–12), на которых заметно влияние глубины дна на исследуемые параметры. Значение  $h_m/h_{sub} = 0$  на графиках



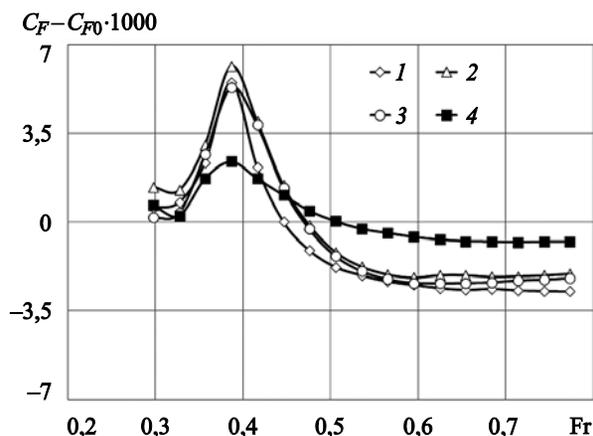
**Рис. 7.** Зависимости  $C_w$  от относительной скорости движения погруженного тела при  $H_1^* = 1,16$ :  
 1 –  $H_{b1}^* = 2,9$ ; 2 –  $H_{b2}^* = 3,6$ ; 3 –  $H_{b3}^* = 4,3$ ;  
 4 –  $H_{b4}^* = 7,5$

**Fig. 7.**  $C_w$  versus relative speed of submerged body at  $H_1^* = 1.16$ : 1 –  $H_{b1}^* = 2.9$ ; 2 –  $H_{b2}^* = 3.6$ ;  
 3 –  $H_{b3}^* = 4.3$ ; 4 –  $H_{b4}^* = 7.5$



**Рис. 8.** Зависимости  $C_w$  от относительной скорости движения погруженного тела при  $H_2^* = 1,45$ :  
 1 –  $H_{b1}^* = 2,9$ ; 2 –  $H_{b2}^* = 3,6$ ; 3 –  $H_{b3}^* = 4,3$ ;  
 4 –  $H_{b4}^* = 7,5$

**Fig. 8.**  $C_w$  versus relative speed of submerged body at  $H_2^* = 1.45$ : 1 –  $H_{b1}^* = 2.9$ ; 2 –  $H_{b2}^* = 3.6$ ;  
 3 –  $H_{b3}^* = 4.3$ ; 4 –  $H_{b4}^* = 7.5$

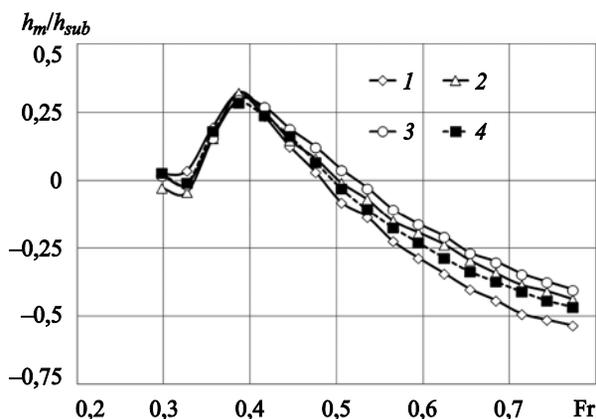


**Рис. 9.** Зависимости  $C_F - C_{F0}$  от относительной скорости движения погруженного тела при  $H_1^* = 1,16$ : 1 -  $H_{b1}^* = 2,9$ ; 2 -  $H_{b2}^* = 3,6$ ; 3 -  $H_{b3}^* = 4,3$ ; 4 -  $H_{b4}^* = 7,5$

**Fig. 9.**  $C_F - C_{F0}$  versus relative speed of submerged body at  $H_1^* = 1.16$ : 1 -  $H_{b1}^* = 2.9$ ; 2 -  $H_{b2}^* = 3.6$ ; 3 -  $H_{b3}^* = 4.3$ ; 4 -  $H_{b4}^* = 7.5$

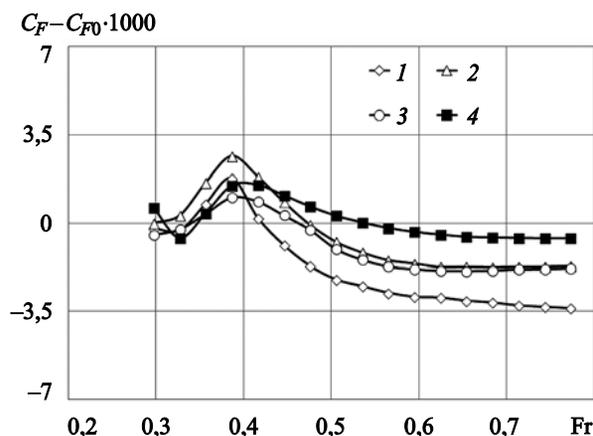
соответствовало первоначально заданной величине заглубления модели.

Анализ кривых также показал, что при  $Fr \approx 0,39$  для заглубления  $H_1^* = 1,16$  положение локального максимума  $C_F - C_{F0}$  соответствовало максимальному значению  $h_m/h_{sub}$ , которое несколько смещалось в сторону больших относительных скоростей при заглублении  $H_2^* = 1,45$ . В этом случае расстояние



**Рис. 11.** Зависимости  $h_m/h_{sub}$  от относительной скорости движения погруженного тела при  $H_1^* = 1,16$ : 1 -  $H_{b1}^* = 2,9$ ; 2 -  $H_{b2}^* = 3,6$ ; 3 -  $H_{b3}^* = 4,3$ ; 4 -  $H_{b4}^* = 7,5$

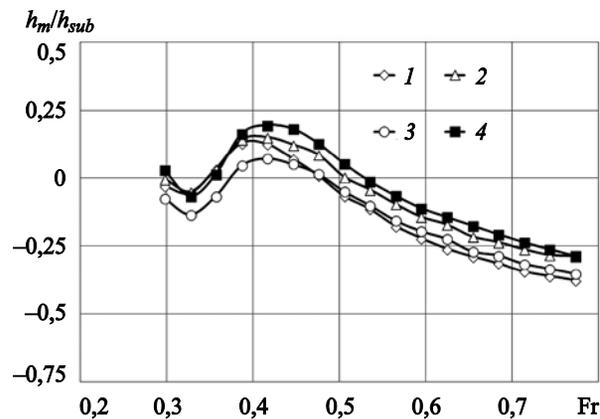
**Fig. 11.**  $h_m/h_{sub}$  versus relative speed of submerged body at  $H_1^* = 1.16$ : 1 -  $H_{b1}^* = 2.9$ ; 2 -  $H_{b2}^* = 3.6$ ; 3 -  $H_{b3}^* = 4.3$ ; 4 -  $H_{b4}^* = 7.5$



**Рис. 10.** Зависимости  $C_F - C_{F0}$  от относительной скорости движения погруженного тела при  $H_2^* = 1,45$ : 1 -  $H_{b1}^* = 2,9$ ; 2 -  $H_{b2}^* = 3,6$ ; 3 -  $H_{b3}^* = 4,3$ ; 4 -  $H_{b4}^* = 7,5$

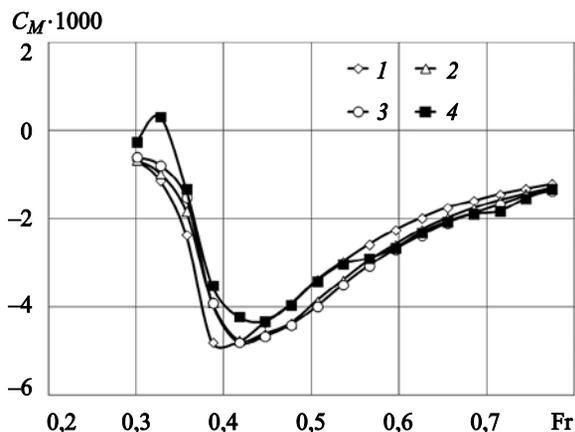
**Fig. 10.**  $C_F - C_{F0}$  versus relative speed of submerged body at  $H_2^* = 1.45$ : 1 -  $H_{b1}^* = 2.9$ ; 2 -  $H_{b2}^* = 3.6$ ; 3 -  $H_{b3}^* = 4.3$ ; 4 -  $H_{b4}^* = 7.5$

между моделью и свободной поверхностью воды было минимальным. При  $H_1^* = 1,16$  кормовая оконечность модели погруженного тела практически контактировала с поверхностью воды, проявлялся значительный дифферент на носовую оконечность. Из полученных результатов видно, что изменение подъемной силы и относительного заглубления при ее воздействии на погруженное тело, движущееся



**Рис. 12.** Зависимости  $h_m/h_{sub}$  от относительной скорости движения погруженного тела при  $H_2^* = 1,45$ : 1 -  $H_{b1}^* = 2,9$ ; 2 -  $H_{b2}^* = 3,6$ ; 3 -  $H_{b3}^* = 4,3$ ; 4 -  $H_{b4}^* = 7,5$

**Fig. 12.**  $h_m/h_{sub}$  versus relative speed of submerged body at  $H_2^* = 1.45$ : 1 -  $H_{b1}^* = 2.9$ ; 2 -  $H_{b2}^* = 3.6$ ; 3 -  $H_{b3}^* = 4.3$ ; 4 -  $H_{b4}^* = 7.5$



**Рис. 13.** Зависимости  $C_M$  от относительной скорости движения погруженного тела при  $H_1^* = 1,16$ :  
 1 –  $H_{b1}^* = 2,9$ ; 2 –  $H_{b2}^* = 3,6$ ; 3 –  $H_{b3}^* = 4,3$ ;  
 4 –  $H_{b4}^* = 7,5$

**Fig. 13.**  $C_M$  versus relative speed of submerged body at  $H_1^* = 1.16$ : 1 –  $H_{b1}^* = 2.9$ ; 2 –  $H_{b2}^* = 3.6$ ;  
 3 –  $H_{b3}^* = 4.3$ ; 4 –  $H_{b4}^* = 7.5$

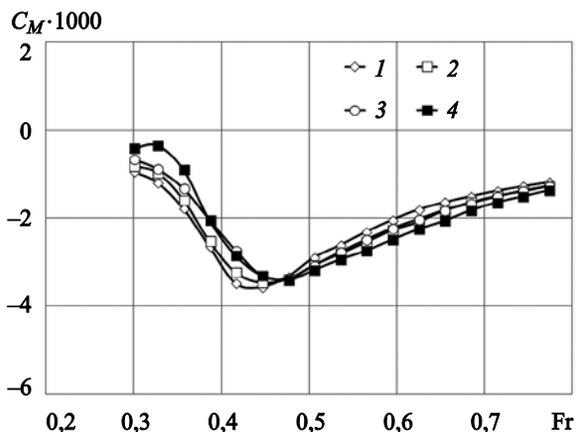
с различной относительной скоростью, имело сложный характер, зависело от глубины акватории и достигало значительных величин.

С ростом относительной скорости движения тела менялся и гидродинамический момент  $M_y$ , на который также существенное влияние оказала глубина дна. На рис. 13–14 показаны зависимости коэффициента  $C_M$  от чисел Fr. Локальный максимум, который виден при глубине дна  $H_{b4}^* = 7,5$  ( $Fr = 0,33$ ), для остальных зависимостей 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 всех случаях малых глубин значения  $M_y$  приобретали отрицательный знак уже при  $Fr = 0,3$ . Для обоих заглоблений наблюдалось движение модели тела с дифферентом на нос. Максимальные отрицательные значения  $C_M$  для малой глубины дна фиксировались при скоростях движения  $Fr \approx 0,39$  ( $H_1^* = 1,16$ ) и  $Fr \approx 0,45$  ( $H_2^* = 1,45$ ), а для  $H_{b4}^* = 7,5$  – при  $Fr \approx 0,45$  и  $Fr \approx 0,48$  соответственно. При  $Fr > 0,6$  характер кривых и значения  $C_M$  практически совпадали.

## Заключение

### Conclusion

Предложена численная модель на базе программного комплекса ANSYS 19 R2 Academic Research, позволяющая определять силы и моменты, дей-



**Рис. 14.** Зависимости  $C_M$  от относительной скорости движения погруженного тела при  $H_2^* = 1,45$ :  
 1 –  $H_{b1}^* = 2,9$ ; 2 –  $H_{b2}^* = 3,6$ ; 3 –  $H_{b3}^* = 4,3$ ;  
 4 –  $H_{b4}^* = 7,5$

**Fig. 14.**  $C_M$  versus relative speed of submerged body at  $H_2^* = 1.45$ : 1 –  $H_{b1}^* = 2.9$ ; 2 –  $H_{b2}^* = 3.6$ ;  
 3 –  $H_{b3}^* = 4.3$ ; 4 –  $H_{b4}^* = 7.5$

ствующие на погруженное тело асимметричной формы круглого сечения с цилиндрической вставкой и относительным удлинением  $L^* = 8,4$  при его движении в приповерхностной водной среде с различной скоростью при малой глубине дна. Работоспособность решения подтверждена путем сопоставления полученных теоретических результатов с данными модельных экспериментов.

Получены зависимости коэффициентов  $C_w$ ,  $C_F$  и  $C_M$  от скорости движения и заглубления погруженного тела для различной глубины акватории. Экспериментально определена величина вертикального перемещения модели тела  $h_m/h_{sub}$  относительно первоначально заданного заглубления, возникающего под воздействием  $F_z$ . Определено влияние глубины дна на характер полученных зависимостей, выполнено сопоставление результатов с данными для глубокой воды  $H_{b4}^* = 7,5$ . Показано, что максимальные значения коэффициентов значительно увеличиваются при движении тела в условиях малой глубины дна, а их пики смещаются в сторону меньших скоростей.

Полученные экспериментально-теоретические результаты могут быть использованы при проектировании подводных аппаратов для стабилизации их движения в приповерхностной водной среде в зависимости от скорости движения в условиях ограниченной глубины акватории.

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

## Список использованной литературы

1. *Newman P., Westwood R., Westwood J.* Market prospects for AUVs // *Marine Technology Reporter*. 2007. Vol. 50, No. 8. P. 22–24.
2. *Wernli R.L.* AUVs – the maturity of the technology // *Riding the Crest into the 21<sup>st</sup> Century : proceedings of Oceans '99 MTS/IEEE*. Washington ; Piscataway, 1999. Vol. 1. P. 189–195. DOI: 10.1109/OCEANS.1999.799730.
3. *Raphaël E., Gennes P.-G. de.* Capillary gravity waves caused by a moving disturbance: wave resistance // *Physical Review E*. 1996. Vol. 53, No. 4. P. 3448–3455. DOI: 10.1103/PhysRevE.53.3448.
4. *Lighthill J.M.* *Waves in Fluids*. Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 1978. XV, 504 p.
5. *Brogliola R., Mascio A. Di, Muscari R.* Numerical study of confined water effects on self-propelled submarine in steady manoeuvres // *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. 2007. Vol. 17, No. 2. P. 89–96.
6. *Jagadeesh P., Murali K.* RANS predictions of free surface effects on axisymmetric underwater body // *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2010. Vol. 4, No. 2. P. 301–313. DOI: 10.1080/19942060.2010.11015318.
7. *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. Vol. 51. P. 161–171. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2014.09.001.
8. *Nematollahi A., Dadvand A., Dawoodian M.* An axisymmetric underwater vehicle-free surface interaction: a numerical study // *Ocean Engineering*. 2014. Vol. 96. P. 205–214. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.12.028.
9. CFD simulations and experiments of a maneuvering generic submarine and prognosis for simulation of near surface operation / *P. Carrica, M. Kerkvliet, F. Quadvlieg, M. Pontarelli, J. Martin* // *Proceedings of the 31<sup>st</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics*. Monterey, 2016. P. 11–16.
10. *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. Vol. 16, No. 3. P. 298–304. DOI: 10.1007/s11804-017-1422-x.
11. *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.
12. *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.
13. *Hama F.R., Long J.D., Hegarty J.C.* On Transition from Laminar to Turbulent Flow // *Journal of Applied Physics*, 1957. Vol. 28. P. 388–394. DOI: 10.1063/1.1722760.
14. *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.
15. *Hirt C., Nichols B.* Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // *Journal of Computational Physics*. 1981. Vol. 39. P. 201–225.
16. *ANSYS CFX–Solver Theory Guide : Release 14.0 / ANSYS Inc.* Canonsburg, 2011. XVI, 402 p.
17. *Снегурев А.Ю.* *Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений : учеб. пособие*. Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 142 с.
18. *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. Vol. 79, No. 2. P. 170–178. DOI: /10.1016/j.jappmathmech.2015.07.008.

## References

1. *Newman P., Westwood R., Westwood J.* Market prospects for AUVs // *Marine Technology Reporter*. 2007. Vol. 50, No. 8. P. 22–24.
2. *Wernli R.L.* AUVs – the maturity of the technology // *Riding the Crest into the 21<sup>st</sup> Century : proceedings of Oceans '99 MTS/IEEE*. Washington ; Piscataway, 1999. Vol. 1. P. 189–195. DOI: 10.1109/OCEANS.1999.799730.
3. *Raphaël E., Gennes P.-G. de.* Capillary gravity waves caused by a moving disturbance: wave resistance // *Physical Review E*. 1996. Vol. 53, No. 4. P. 3448–3455. DOI: 10.1103/PhysRevE.53.3448.
4. *Lighthill J.M.* *Waves in Fluids*. Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 1978. XV, 504 p.
5. *Brogliola R., Mascio A. Di, Muscari R.* Numerical study of confined water effects on self-propelled submarine in steady manoeuvres // *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. 2007. Vol. 17, No. 2. P. 89–96.
6. *Jagadeesh P., Murali K.* RANS predictions of free surface effects on axisymmetric underwater body // *Engineering Applications of Computational Fluid*

- Mechanics. 2010. Vol. 4, No. 2. P. 301–313. DOI: 10.1080/19942060.2010.11015318.
7. *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. Vol. 51. P. 161–171. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2014.09.001.
  8. *Nematollahi A., Dadvand A., Dawoodian M.* An axisymmetric underwater vehicle-free surface interaction: a numerical study // *Ocean Engineering*. 2014. Vol. 96. P. 205–214. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.12.028.
  9. CFD simulations and experiments of a maneuvering generic submarine and prognosis for simulation of near surface operation / *P. Carrica, M. Kerkvliet, F. Quadvlieg, M. Pontarelli, J. Martin* // *Proceedings of the 31<sup>st</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics*. Montreux, 2016. P. 11–16.
  10. *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. Vol. 16, No. 3. P. 298–304. DOI: 10.1007/s11804-017-1422-x.
  11. *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.
  12. *Zemlyak V.L., Kozin V.M., Vasilyev A.S.* Ice Basin of Ice Engineering Laboratory // *Transactions of Sholom-Aleihem Amur State University*. 2021. Vol. 1(42). P. 19–31. DOI: 10.24412/2227-1384-2021-142-19-31 (in Russian).
  13. *Hama F.R., Long J.D., Hegarty J.C.* On Transition from Laminar to Turbulent Flow // *Journal of Applied Physics*, 1957. Vol. 28. P. 388–394. DOI: 10.1063/1.1722760.
  14. *Zemlyak V.L., Kozin V.M.* 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).
  15. *Hirt C., Nichols B.* Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // *Journal of Computational Physics*. 1981. Vol. 39. P. 201–225.
  16. ANSYS CFX–Solver Theory Guide : Release 14.0 / ANSYS Inc. Canonsburg, 2011. XVI, 402 p.
  17. *Snegirev A.Yu.* High-performance calculations in applied physics. Numerical simulation of turbulent flows. St. Petersburg : Publishing House of St. Petersburg State Polytechnical University, 2008. 142 p. (in Russian).
  18. *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. Vol. 79, No. 2. P. 170–178. DOI: /10.1016/j.jappmathmech.2015.07.008.
- 
- Сведения об авторах**
- Земляк Виталий Леонидович*, к.ф.-м.н., доцент кафедры технических дисциплин 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, 1. E-mail: kozinvictor@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2673-469X>.
- Васильев Алексей Сергеевич*, к.т.н., доцент кафедры технических дисциплин ФГБОУ ВО Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема. Адрес: 679015, Россия, Еврейская автономная область, Биробиджан, Широкая ул., д. 70а. E-mail: vasil-grunt@mail.ru.
- Чингалаев Сергей Алексеевич*, аспирант кафедры технических дисциплин ФГБОУ ВО Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема. Адрес: 679015, Россия, Еврейская автономная область, Биробиджан, Широкая ул., д. 70а. E-mail: sergey-chingalaev@mail.ru.
- About the authors**
- Vitaly L. Zemlyak*, Dr. Sci. (Phys.&Math.), Associate Professor of the Technical Disciplines Department, 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: 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>.

*Aleksey S. Vasiliev*, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Technical Disciplines Department, 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: vasil-grunt@mail.ru.

*Sergey A. Chingalaev*, Postgraduate Student of the Technical Disciplines Department, 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: sergey-chingalaev@mail.ru.

Поступила / Received: 22.08.22  
Принята в печать / Accepted: 03.02.23  
© Коллектив авторов, 2023