



УДК 639.2.081

Рыболовство

Исследование гидродинамических характеристик траловой доски

А.А. Недоступ, А.О. Ражев, П.В. Насенков, А.В. Пивоваров

Калининградский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «КГТУ»), Советский пр-т, д.1, г. Калининград, 236022

E-mail: nedostup@kltu.ru

SPIN-код: А.А. Недоступ – 7035-5279, А.О. Ражев – 4535-5888, П.В. Насенков – 7434-6253

Цель работы является доказательство возможности применения программного обеспечения (ПО) для расчёта гидродинамических характеристик траловых досок. **Используемые методы:** компьютерное и физическое моделирование гидродинамических характеристик траловых досок даёт возможность более точной их настройки для качественного промысла. Поиск оптимальных настроек траловых досок возможен при помощи компьютерной программы «Гидродинамика траловых досок», которая разработана на основании множества исследований динамических характеристик. К таким характеристикам относятся: скорость течения, глубина, угол атаки, угол крена и дифферента, максимальное значение коэффициента распорной силы c_y , минимальное значение коэффициента сопротивления траловой доски c_x , максимальное значение гидродинамического качества k . **Новизна:** по результатам физических и математических экспериментов был проведён анализ и разработана методика, позволяющая рассчитывать настройку траловых досок на судне, не прибегая к физическим экспериментам на воде. **Результат:** разработанная методика может позволить специалистам по технике добычи правильно настроить угол атаки траловой доски на судне для правильного горизонтального раскрытия трала, не прибегая к испытаниям на воде. **Практическая значимость:** на основании разработанной методики расчёта специалисты по технике добычи могут настраивать угол атаки траловых досок для достижения высокой эффективности промысла сразу на судне, избегая необходимости проводить эксперименты на воде. Используя специализированное программное обеспечение, они могут моделировать различные параметры, такие как угол наклона и размеры траловой доски, а также условия окружающей среды. Это позволит точно прогнозировать положение доски и оптимизировать её настройки, что в конечном итоге способствует повышению улова, а также минимизирует время на промысле.

Ключевые слова: траловые доски, компьютерная программа, динамические, гидродинамические характеристики, моделирование, 3D-модель.

Study of the hydrodynamic characteristics of the trawl board

Alexander A. Nedostup, Aleksey O. Razhev, Pavel V. Nasenkov, Alexander V. Pivovarov

Kaliningrad State Technical University («KSTU»), 1, Sovetsky Prospekt, Kaliningrad, 236022, Russia

The aim of the work is to prove the possibility of using software for calculating the hydrodynamic characteristics of trawl doors. **The methods used:** computer and physical modeling of the hydrodynamic characteristics of trawl doors makes it possible to set the correct angle of attack of the trawl for more successful catch. The search for optimal settings of trawl doors is possible using the computer program "Hydrodynamics of trawl doors", which was developed on the basis of many studies of dynamic characteristics. Such characteristics include: current speed, depth, angle of attack, angle of heel and trim, maximum value of the spreading force coefficient c_y , minimum value of the trawl door resistance coefficient c_x , maximum value of the hydrodynamic quality k . **Novelty:** based on the results of physical and mathematical experiments, an analysis was carried out and a technique was developed that allows calculating the setting of trawl doors on a vessel without resorting to physical experiments on the water. **Result:** the developed methodology can allow harvesting technicians to correctly adjust the angle of attack of the trawl door on the vessel for the correct horizontal opening of the trawl, without resorting to testing on the water. **Practical significance:** based on the developed calculation methodology, mining technology specialists can adjust the angle of attack of trawl doors to achieve high fishing efficiency directly on the vessel, avoiding the need to conduct experiments on the water. Using specialized software, they can simulate various parameters such as the angle of inclination and dimensions of the trawl door, as well as environmental conditions. This will allow them to accurately predict the behavior of the board and optimize its settings, which ultimately contributes to an increase in catch and minimizes costs and work.

Keywords: trawl doors, computer program, dynamic, hydrodynamic characteristics, modeling, 3D-model.

ВВЕДЕНИЕ

Для эффективного использования траловой доски в рыболовстве необходимо определить её гидродинамические характеристики. Это требует глубокого понимания взаимодействия доски с водной средой. Ключевым моментом является определение силы лобового сопротивления, распорной и заглубляющей сил, действующих на траловую доску, а также гидродинамических коэффициентов. Эти параметры необходимо рассчитать для различных скоростей движения и углах атаки, крена и дифферента траловой доски. При проектировании траловых досок возникает проблема выбора оптимальной её формы. Единой универсальной формы, подходящей для всех случаев, не существует. С точки зрения гидродинамики [Федявский и др., 1968] различным скорости движения и условиям промысла соответствует своя наилучшая форма доски. Для донного промысла требуются траловые доски одной формы, для разноглубинного – другой [Фридман, 1981]. Эксперименты с натурными траловыми досками и их физическими моделями в морских условиях, а также различных бассейнах и гидролотках дают ценные данные. Однако такие испытания приводят к значительным затратам времени и финансов. В связи с этим, возрастает роль компьютерного моделирования гидродинамики траловых досок [Недоступ, Ражев, 2017 б]. Компьютерное моделирование позволяет рассчитать гидродинамические поля вокруг доски, не прибегая к экспериментам на натурных траловых досках, что экономит время и средства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использование компьютерных программ для расчёта гидродинамических характеристик траловой доски позволяет определить её угол атаки, обеспечивающий оптимальное горизонтальное раскрытие трала. Величина горизонтального раскрытия трала является основным фактором для эффективного рыболовства [Коротков, 1972]. Компьютерное моделирование позволяет исследовать гидродинамику траловой доски при различных условиях лова (скорости течения, глубине лова, углах атаки, крена и дифферента) и предоставляет более точную информацию по сравнению с традиционными методами. Исследование гидродинамики в виртуальной среде сокращает затраты на эксперименты в натурных условиях [Мизюркин, 2012].

Специалисты по технике добычи на судне могут использовать полученные данные компьютерного моделирования для определения ориентации траловой доски и величины раскрытия трала в зависимости от настроек траловой доски перед началом промысла.

Это позволяет избежать неправильного расположения доски и увеличивает эффективность промысла, сокращая время на добычу рыбы. Компьютерное моделирование является примером инновационного подхода в рыбной отрасли, который позволяет увеличить эффективность рыболовства. Использование современных технологий позволяет специалистам по технике добычи быстрее принимать решения в постановке трала, что приводит к увеличению доходов.

На основе существующей модели крыловидной траловой доски (см. рис. 1) был разработан чертёж (см. рис. 2), на основе которого была создана цифровая модель траловой доски в программе отечественного производства «Компас 3D» (см. рис. 3).



Рис. 1. Крыловидная траловая доска

Fig. 1. Wing-shaped trawl board

Созданная по чертежу 3D-модель крыловидной траловой доски была загружена в программу «Гидродинамика траловых досок». Программа позволяет проводить исследования гидродинамических характеристик траловой доски. Программное обеспечение позволяет моделировать гидродинамику движущейся в водной среде траловой доски, рассчитать поля давления и скоростей, силы сопротивления при различной ориентации к потоку.

Такие исследования являются неотъемлемой частью проектирования и разработки траловых до-

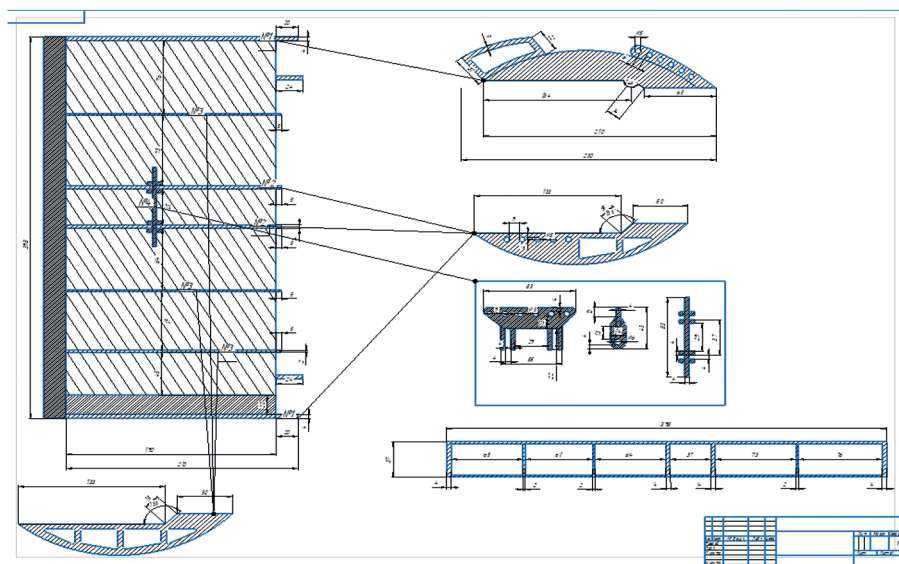


Рис. 2. Чертёж крыловидной траловой доски
Fig. 2. Drawing of a wing-shaped trawl door

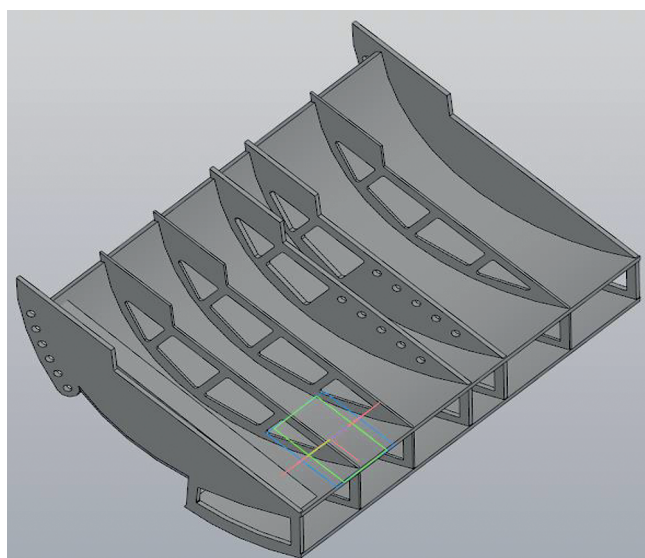


Рис. 3. 3D-модель крыловидной траловой доски
Fig. 3. 3D-model of a wing-shaped trawl door

сок. Они позволяют определить оптимальную форму доски для обеспечения промысла в различных условиях [Афанасьев, 2007]. Например, компьютерное моделирование позволяет выяснить, как форма траловой доски влияет на горизонтальное раскрытие трала. Компьютерное моделирование помогает определить, как доска будет вести себя при различных условиях: при сильном течении, на разных глубинах и при различных углах атаки, крена и дифферента.

В рамках исследования траловых досок мы провели ряд численных экспериментов, используя программу «Гидродинамика траловых досок» [Недоступ,

Ражев, 2017 а]. Результаты компьютерных экспериментов могут помочь в оптимизации конструкций траловых досок и разработать рекомендации по их использованию при различных условиях промысла. На рис. 4 представлены результаты эксперимента при различной ориентации траловой доски к водному потоку.

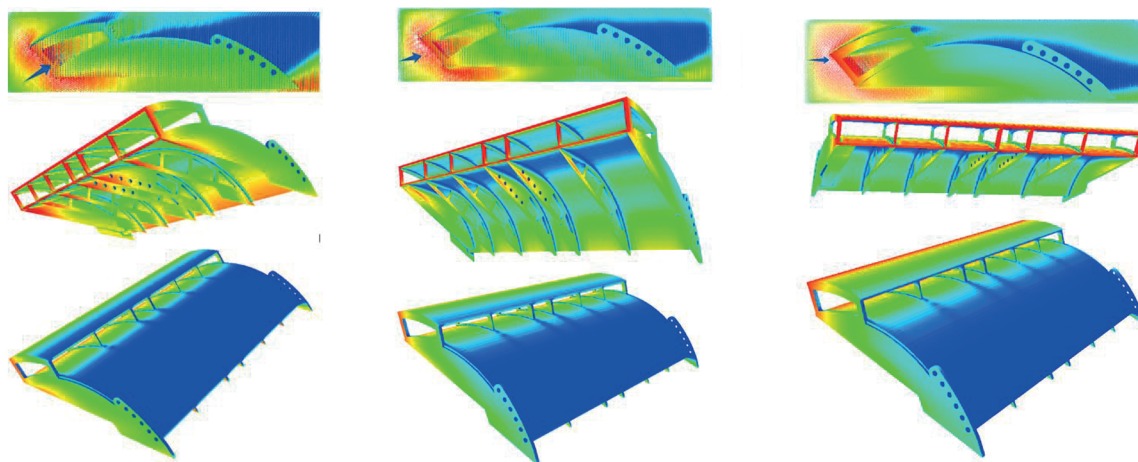
Расчёт сил гидродинамического сопротивления траловой доски выполнялся посредством решения систем уравнений Навье-Стокса методом расщепления на трёхмерной пространственной сетке. По входному значению вектора скорости потока и глубине погружения вычислялось поле давлений на поверхности траловой доски [Недоступ, Ражев, 2017 в]. Далее, по полю давлений вычислялся вектор силы гидродинамического сопротивления, приложенной к центру масс $\mathbf{R}$ (1), и вектор крутящего момента сил гидродинамического сопротивления относительно центра масс $\mathbf{M}$ (2):

$$\mathbf{R} = \sum_i S_i p_i \mathbf{n}_i, \quad (1)$$

$$\mathbf{M} = \sum_i S_i p_i \mathbf{n}_i \times \mathbf{r}_i, \quad (2)$$

где S_i – площадь поверхности траловой доски внутри i -й ячейки расчётной сетки; p_i – давление в i -й ячейке; $\mathbf{n}_i$ – вектор нормали к поверхности, ориентированный внутрь материала траловой доски; $\mathbf{r}_i$ – смещение центра поверхности относительно центра масс траловой доски; i – номер ячейки, через которую проходит поверхность траловой доски; $\times$ – операция векторного произведения.

В установившемся режиме силы и крутящие моменты, действующие на траловую доску со стороны



а) Показатели эксперимента 3D-модели при углах атаки 20°, крена 0° и дифферента 0° б) Показатели эксперимента 3D-модели при углах атаки 10°, крена 0° и дифферента 0° в) Показатели эксперимента 3D-модели при углах атаки 0°, крена 0° и дифферента 0°

Рис. 4. Некоторые показатели эксперимента 3D-модели при различных углах атаки

Fig. 4. Some indicators of the experiment 3D-Models at various angles of attack

ваеров и кабелей, уравниваются силой гидродинамического сопротивления $\mathbf{F}$ и моментом $\mathbf{M}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{F} + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_{K1} + \mathbf{F}_{K2} &= 0; \\ \mathbf{M} + \mathbf{M}_B + \mathbf{M}_{K1} + \mathbf{M}_{K2} &= 0; \\ \mathbf{M}_B &= \mathbf{F}_B \times \mathbf{r}_B; \\ \mathbf{M}_{K1} &= \mathbf{F}_{K1} \times \mathbf{r}_{K1}; \\ \mathbf{M}_{K2} &= \mathbf{F}_{K2} \times \mathbf{r}_{K2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\mathbf{F}_B$, $\mathbf{F}_{K1}$ и $\mathbf{F}_{K2}$ – векторы сил натяжения ваера и двух кабелей соответственно; $\mathbf{M}_B$, $\mathbf{M}_{K1}$ и $\mathbf{M}_{K2}$ – векторы соответствующих вращающих моментов; $\mathbf{r}_B$, $\mathbf{r}_{K1}$ и $\mathbf{r}_{K2}$ – смещение точки крепления ваера и двух кабелей к траловой доске относительно центра масс траловой доски [Abe et al., 1995; Харченко, 2008].

Для верификации полученных результатов численного моделирования гидродинамики траловой до-

ски были проведены экспериментальные исследования с закреплённой на трёх струнах траловой доске. Эксперименты проводились в гидроканале ООО «Фишеринг Сервис» (см. рис. 5).

Схема проведения экспериментов приведена на рис. 6.

В процессе экспериментов при помощи регулировки длин струн устанавливалась требуемая ориентация траловой доски к направлению потока воды в гидроканале. Скорость потока воды задавалась на пульте управления гидроканалом. Абсолютное значение сил натяжения в струнах измерялось при помощи электронных динамометров, а углы наклона оттяжек – при помощи угломера.

В табл. 1 представлены данные, полученные при испытании траловой доски в гидроканале.

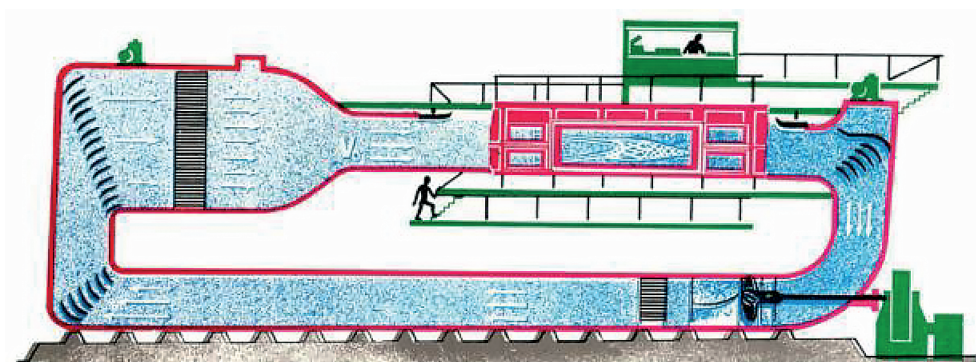


Рис. 5. Схема гидроканала «Фишеринг Сервис»

Fig. 5. Diagram of flume tank «Fishering Service»

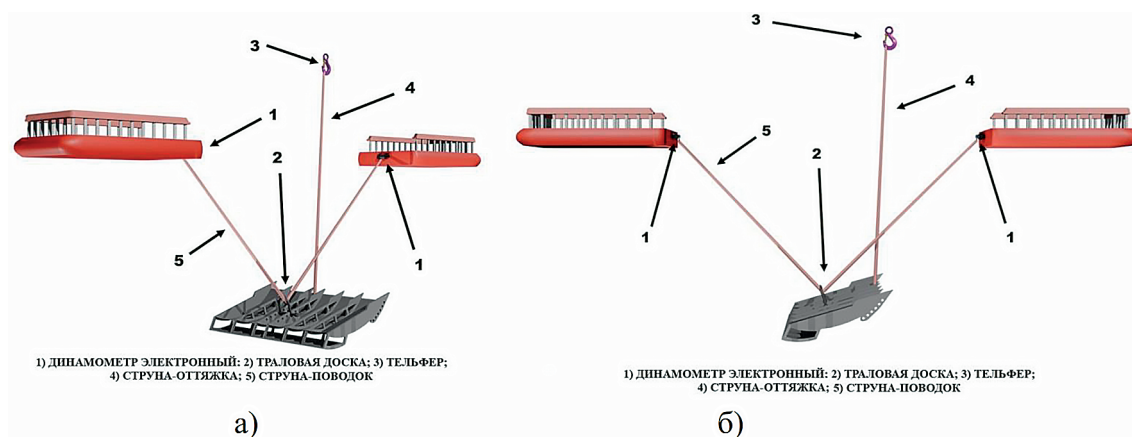


Рис. 6. Схема проведения экспериментов в гидроканале: а) вид спереди; б) вид сбоку
Fig. 6. Scheme of conducting experiments in the flume tank: a) Front view; b) Side view

Табл. 1. Результаты испытаний траловой доски в гидроканале «Фишеринг Сервис»
Table 1. Results of the study in the flume tank «Fishing Service»

Скорость потока, м/с	Угол атаки, град	c_x	c_y	δ_{cx} , %	δ_{cy} , %
1,0	25	0,48	1,46	12	12
	30	0,59	1,79	10	10
	35	0,61	1,85	11	11
	40	0,62	1,81	10	10
	45	0,65	1,79	10	10
	50	0,7	1,79	11	11
	60	0,75	1,66	12	12

В табл. 1 приведены следующие сокращения: c_x , c_y – гидродинамические коэффициенты траловой доски; δ_{cx} , δ_{cy} – среднеквадратические погрешности гидродинамических коэффициентов, полученные на множестве замеров.

По замеренным силам натяжения и углам наклона вычислялись векторы $\mathbf{F}_B$, $\mathbf{F}_{K1}$ и $\mathbf{F}_{K2}$. Далее, с учётом формулы (3) определялась величина относительного расхождения сил и моментов:

$$\frac{|\mathbf{F} + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_{K1} + \mathbf{F}_{K2}|}{|\mathbf{F}|} = \delta_F; \quad \frac{|\mathbf{M} + \mathbf{M}_B + \mathbf{M}_{K1} + \mathbf{M}_{K2}|}{|\mathbf{M}|} = \delta_M. \quad (4)$$

При этом в (4) в качестве $\mathbf{F}$ и $\mathbf{M}$ брались расчётные, а в качестве $\mathbf{F}_B$, $\mathbf{F}_{K1}$ и $\mathbf{F}_{K2}$ – измеренные значения.

Итоговая среднеквадратическая погрешность вычислялась по формуле (5)

$$\delta = \sqrt{\delta_{cx}^2 + \delta_{cy}^2 + \delta_F^2 + \delta_M^2} \quad (5)$$

и составила 20%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Физическое и компьютерное моделирование траловых досок обеспечивают совместные исследования

гидродинамики траловых досок [Недоступ, Ражев, 2021]. Основными гидродинамическими характеристиками траловых досок являются: максимальное значение коэффициента распорной силы c_y , минимальное значение коэффициента сопротивления траловой доски c_x , максимальное значение гидродинамического качества k , высокая статическая и динамическая устойчивость, а также прочность. Важным методом для проверки результатов компьютерного моделирования является сопоставление полученных данных с данными физических моделей траловых досок, полученных при проведении экспериментов в гидроканале.

Сопоставив значения погрешностей экспериментов в гидроканале (см. табл. 1) с итоговым значением среднеквадратической погрешности можно сделать вывод, что влияние погрешности вычислений на итоговую погрешность меньше погрешности экспериментов в гидроканале (около 17%) и находится в пределах 8%, что приемлемо для задач рыболовства.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания по теме «Разработка беспроводной системы контроля параметров трала с элементами искусственного интеллекта «Автотрал»».

ЛИТЕРАТУРА

- Афанасьев В.О. 2007. Системы 3D-визуализации индуцированной виртуальной среды. Автореф. дисс ... докт. физ.-мат. наук. М.: МГУ им. Ломоносова. 36 с.
- Коротков В.К. 1972. Трал, поведение объекта лова и подводные наблюдения за ними. М.: Пищ. пром-ть. 271 с.
- Мизюркин М.А. 2012. Влияние угла атаки траловых досок на сопротивление и геометрические параметры донной траловой системы // Известия КГТУ. No 24. С. 158-165.
- Недоступ А.А., Ражев А.О. 2017 а. Математическая модель взаимодействия распорной траловой доски с водной средой // Морские интеллектуальные технологии. № 3(37) Т. 1. С. 154-157.
- Недоступ А.А., Ражев А.О. 2017 б. Программное обеспечение для исследования гидродинамики распорных траловых досок // Морские интеллектуальные технологии. № 3(37) Т. 1. С. 168-173.
- Недоступ А.А., Ражев А.О. 2017 в. Математическое описание распорной траловой доски для задач численного моделирования динамики разноглубинных траловых систем // Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. № 3. – С. 58-64.
- Недоступ А.А., Ражев А.О. 2021. Производительность сил траловой системы: Постановка задачи // Вестник Астраханского ГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. № 2. С. 55-65.
- Федявский К.К., Войткунский Я.И., Фадеев Ю.И. 1968. Гидромеханика. Л.: Изд-во Судостроение. 565 с.
- Фридман А.Л. 1981. Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства. М: Лёгкая и пищевая промышленность. 327 с.
- Харченко С.А. 2008. Влияние распараллеливания вычислений с поверхностными межпроцессорными границами на масштабируемость параллельного итерационного алгоритма решения систем линейных уравнений на примере уравнений вычислительной гидродинамики // Труды Межд. науч. конф. «Параллельные вычислительные технологии», Санкт-Петербург, 28 января – 1 февраля 2008 г., Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. С. 494-499.
- Abe K., Kondoh T., Nagano Y. 1995. A New Turbulence Model for Predicting Fluid Flow and Heat Transfer in Separating and Reattaching flows-II. Thermal Field Calculation // Int.

Journal of Heat and Mass Transfer. V. 38. No. 8. P. 1467-1481.

REFERENCES

- Afanasiev V.O. 2007. Systems of 3D visualization of the induced virtual environment. Abstr. of the disser. doct. of Sciences in Phys.-Math. Moscow: MSU. 36 p. (In Russ.).
- Korotkov V.K. 1972. Trawl, the behavior of the object of fishing and underwater observations of them. Moscow: Food industry. 271 p. (In Russ.).
- Mizyurkin M.A. 2012. Influence of the angle of attack of trawl doors on the drag and geometrical parameters of the bottom trawl system // News of KSTU. No. 24. P. 158-165. (In Russ.).
- Nedostup A.A., Razhev A.O. 2017 а. Mathematical model of the interaction of a spacer trawl door with the aquatic environment // Marine intelligent technologies. No. 3 (37) V.1. P. 154-157. (In Russ.).
- Nedostup A.A., Razhev A.O. 2017 б. Software for studying the hydrodynamics of spacer trawl doors // Marine intelligent technologies. No. 3(37) V.1. P. 168-173. (In Russ.).
- Nedostup A.A., Razhev A.O. 2017 в. Mathematical description of a spacer trawl door for problems of numerical modeling of the dynamics of multi-depth trawl systems // Vestnik ASTU. Series: Fisheries. No. 3. P. 58-64. (In Russ.).
- Nedostup A.A., Razhev A.O. 2021. Productivity of the forces of the trawl system: Statement of the problem // Vestnik ASTU. Series: Fisheries. No.2. P. 55-65. (In Russ.).
- Fedyavsky K.K., Voitkunsky Ya.I., Fadeev Yu.I. 1968. Hydromechanics. Leningrad: Shipbuilding Publishing House. P. 565. (In Russ.).
- Fridman A.L. 1981. Theory and design of industrial fishing gear. Moscow: Light and food industry. 327 p. (In Russ.).
- Kharchenko S.A. 2008. The influence of parallelization of calculations with superficial interprocessor boundaries on the scalability of a parallel iterative algorithm for solving systems of linear equations using the example of computational fluid dynamics equations // Proc. Intern. Scient. Conf. «Parallel Computing Technologies». St. Petersburg, January 28 – February 1 2008. Chelyabinsk: SUSU Publish. p. 494-499.
- Abe K., Kondoh T., Nagano Y. 1995. A New Turbulence Model for Predicting Fluid Flow and Heat Transfer in Separating and Reattaching flows-II. Thermal Field Calculation // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. V. 38. No. 8. P. 1467-1481.

Поступила в редакцию 26.08.2024 г.
Принята после рецензии 25.02.2025 г.