



Моделирование процесса обледенения корпуса рыболовецкого судна на поверхности воды с учетом влияния волнения

^{1,2} К.Б. Кошелев, ORCID: 0000-0002-7124-3945 <koshelevkb@mail.ru>

² А.В. Осипов, ORCID: 0000-0001-9223-4274 <a.osipov@ispras.ru>

² С.В. Стрижак, ORCID: 0000-0001-5525-5180 <s.strijhak@ispras.ru>

¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН,
656038, Алтайский край, г. Барнаул, ул. Молодежная, д.1.

² Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН,
109004, Россия, г. Москва, ул. А. Солженицына, д. 25.

Абстракт: Изучение обледенения судов является актуальной задачей в связи с судоходством в морях Северного Ледовитого океана. В работе рассматривается задача моделирования обтекания модельного рыболовецкого судна газокapельным потоком и возникновение процесса обледенения. Первоначально моделирование выполнялось с помощью решателя interDyMFoam с учетом задания волны Стокса первого рода для определения положения капель. В дальнейшем моделирование было выполнено с помощью решателя iceFoam в основе которого используется Эйлер-Лагранжев метод для описания газокapельного потока. Рассмотренная модель рыболовецкого судна имела масштаб 1:10. Положение капель задавалось на входе в расчетную прямоугольную область. Расчетная сетка имела от 1.5 до 10 млн. ячеек. С помощью расчетов были получены траектории движения капель вокруг корпуса судна, распределение поля скорости воздуха, положение пленки воды и толщина льда на поверхности палубы. Была выполнена оценка массы нарoщенного льда. Моделирование выполнялось на вычислительном кластере ИСП РАН. Один типовой пример запускался на 48-96 вычислительных ядрах и продолжался не более трех дней.

Ключевые слова: обледенение, судно; волнение; область; сетка; расчет; капли; размер; скорость; температура; пленка воды; пленка льда; масса льда.

Для цитирования: Кошелев К.Б., Осипов А.В., Стрижак С.В. Моделирование процесса обледенения корпуса рыболовецкого судна на поверхности воды с учетом влияния волнения. Труды ИСП РАН, том 35, вып. 5, 2023 г., стр. 259–270. DOI: 10.15514/ISPRAS–2023–35(5)–17.

Modeling the Icing Process for the Hull of a Fishing Vessel on the Surface of the Water, Taking into Account the Influence of Waves

^{1,2} K.B. Koshelev, ORCID: 0000-0002-7124-3945 <koshelevkb@mail.ru>

² A.V. Osipov, ORCID: 0000-0001-9223-4274 <a.osipov@ispras.ru>

² S.V. Strijhak, ORCID: 0000-0001-5525-5180 <s.strijhak@ispras.ru>

¹ Institute for water and environmental problems SB RAS,

1, Molodezhnaya str., Altai region, Barnaul, 656038.

² Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences,

25, Alexander Solzhenitsyn str., Moscow, 109004, Russia.

Abstract: Studying the icing of ships is an urgent task. The paper considers the problem of modeling the flow of a model vessel with a gas-droplet flow and the occurrence of the icing process. Initially, the simulation was performed using the interDyMFoam solver, taking into account the assignment of the Stokes wave of the first kind to determine the position of the droplets. Further modeling was carried out using the iceFoam solver, which is based on the Euler-Lagrangian method for describing the gas-droplet flow. The considered model of a fishing vessel had a scale of 1:10. The position of the droplets was set at the entrance to the calculated rectangular domain. The estimated grid had from 1.5 to 10 million cells. With the help of calculations, the trajectories of droplet movement around the hull of the vessel, the distribution of the air velocity field, the position of the water film and the thickness of ice on the deck surface were obtained. The mass of the overgrown ice was estimated. The simulation was performed on the computing cluster of the ISP RAS. One typical calculation was run on 48-96 computing cores and lasted no more than three days.

Keywords: icing; vessel; excitement; area; grid; calculation; drops; size; speed; temperature; water film; ice film; ice mass.

For citation: Koshelev K.B., Osipov A.V., Strijhak S.V. Modeling the icing process for the hull of a fishing vessel on the surface of the water, taking into account the influence of waves. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 35, issue 5, 2023. pp. 259-270 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2023-35(5)-17.

1. Введение

Изучение обледенения судов в морской науке является актуальной задачей в связи с эксплуатацией кораблей и рыболовецких судов в морях Северного Ледовитого океана, например, в Баренцевом и Карском морях. Российское рыболовецкое судно "Онега" затонуло в Баренцевом море 28 декабря 2020 года. В результате происшествия девятнадцать человек погибли. Спасательная операция была осложнена четырехметровыми волнами и 20-градусным морозом. Одной из возможных причин стало обледенение и потеря управляемости судна. Когда судно внезапно обледенело, то необходимо правильно оценить изменения массы и моментов инерции судна, чтобы обеспечить остойчивость судна и его безопасное положение на воде, а также принять меры по устранению льда.

Таким образом, при движении судна на открытой воде при резком изменении погоды (порывы ветра, температура, давление, осадки, влажность) возможно образование больших волн и брызг, соударение волн с корпусом судна, движение капель вокруг корпуса судна, с последующим нарастанием льда и потерей устойчивости судна на поверхности воды.

Согласно литературным источникам, существует следующая градация обледенения [1]:

- 1) Медленное обледенение происходит для температуры – 1 °С до -3 °С и при скорости ветра 0 м/с - 9 м/с и температуре ниже -3 °С;
- 2) Быстрое обледенение происходит при скорости ветра от 9 до 15 м/с и температуре воздуха от -3°С до - 8 °С;
- 3) Очень быстрое обледенение происходит при скорости ветра выше 15 м/с и температуре ниже - 3°С, а также при скорости ветра от 9 м/с до 15 м/с и температуре ниже – 8 °С.

Согласно последнему руководству службы прогнозирования Росгидромета (Россия), интенсивность обледенения рыболовецких судов характеризуется следующими показателями:

- 1) Медленный режим: скорость обледенения составляет менее 0,007 м/ч;
- 2) Быстрый режим: скорость обледенения от 0,007 м/ч до 0,013 м/ч (характеризуется как опасное явление);
- 3) Очень быстрый режим: скорость обледенения составляет 0,014 м/ч или более (характеризуется как опасное явление).

Ранее процесс обледенения был изучен для различных типов судов и морских сооружений в сложных климатических условиях [2-4]. Полевые измерения процесса обледенения были проведены на 39-метровом российском рыболовецком судне “MFV Narva” в Японском море в феврале 1973 года [2], а поток брызг был изучен на 115-метровом катере береговой охраны США (USCGC) Midgett в северной части Тихого океана и Беринговом море в течение февраля и марта 1990 года [3]. Эти полевые исследования уникальны, дорогостоящи, опасны для экипажа судна и требуют специального измерительного оборудования [5-8].

Как правило, для изучения обледенения используются натурный и лабораторный эксперименты, а также математическое моделирование на суперкомпьютере.

Программное обеспечение с открытым исходным кодом широко используется для моделирования гидродинамики судов при сильном волнении. Одним из успешных проектов с открытым исходным кодом в области вычислительной механики является код OpenFOAM, реализованный на языке программирования C++ [9].

Библиотека SNUFOAM была разработана в работе [10], авторы которой применили библиотеку с открытым исходным кодом для задач судостроения и морской гидродинамики. Shen и Wan разработали библиотеку naoe-FOAM-SJTU, основанную на коде OpenFOAM, с целью моделирования различных морских гидродинамических задач. Авторы предсказали дополнительное сопротивление для судна в случае задания различной формы морских волн [11]. В библиотеке naoe-FOAM-SJTU был реализован метод динамической сетки, были вычислены характеристики движения судна и морских платформ с 6 степенями свободы.

Vuksevic et al. предложили гидродинамическую модель, объединив коды для невязкого случая течения и вязкого течения [12-13]. В работе [14] были изучены вопросы неопределенности размеров ячейки сетки, временного шага и определена возможность использования OpenFOAM для расчета характеристик сопротивления судна [15].

Модель грузового судна KCS была рассчитана и результаты расчета сравнены с экспериментальным результатом для проверки промежуточной точности решателя. В результате было достигнуто относительно хорошее согласование. Авторы работы также изучили модель движения индонезийского традиционного рыболовецкого судна с северного до южного побережья острова Ява.

2. Математическая модель

В настоящем исследовании CFD-решатели с открытым исходным кодом использовались для расчета сопротивления и движения модели рыболовного судна при регулярных встречных волнах, для моделирования процесса образования капель и процесса нарастания льда на внешней поверхности корпуса судна.

На первом этапе рассматривалось моделирование движения судна на поверхности воды с учетом влияния волны. Моделирование проводилось с использованием решателя interDyMFoam и специального граничного условия, метода VOF, реализованного в рамках программы OpenFOAM, который основан на методе конечных объемов [9]. В результате моделирования было определено положение объемной струи воды и образовавшиеся капли

воды. Для задания волновой поверхности использовалась волна Стокса первого порядка, которая имела форму, показанную на рис. 1.

Задание характеристик для волны Стокса (соотношения, частота, амплитуда) приведено в различных публикациях и монографиях [10-11,19-20].

На втором этапе было смоделировано движение капель в набегающем потоке воздуха, воздействие капель на поверхность модельного судна, а также процесс срастания льда и образования водной пленки. Уравнения непрерывности и Навье-Стокса являлись основными уравнениями, описывающие движение жидкости. Для описания вязкой турбулентной жидкости использовалась модель с уравнениями Рейнольдса в составе решателя *interDyMFoam*. Граница раздела воздух-вода вычислялась с помощью метода объема в жидкости (Volume of Fluid). Уравнения Рейнольдса замыкались двумя уравнениями по модели турбулентности SST, предложенной Ментером. Модель турбулентности переноса сдвигового напряжения Ментера SST представляет собой модель вихревой вязкости с двумя уравнениями и пристеночными функциями. Данная модель использовалась для многих гидродинамических и аэродинамических приложений.

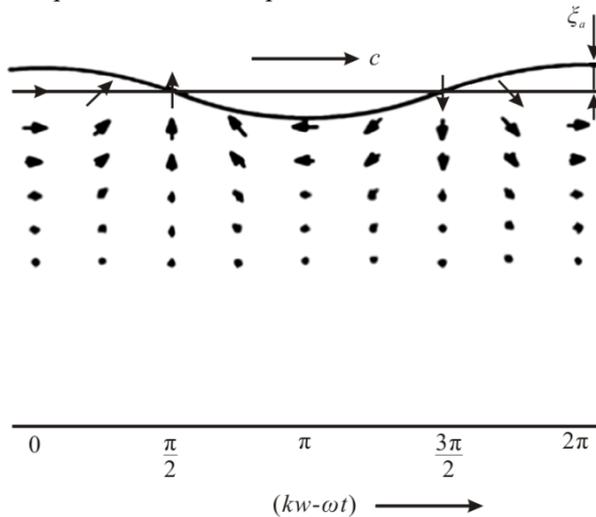


Рис. 1. Волна Стокса первого порядка.
Fig. 1. The Stokes wave of the first order.

Модель сочетает в себе хорошо известные низкорейнольдсовую и высокорейнольдсовую модели турбулентности. Первая модель подходит для моделирования течения в вязком подслое, в то время как вторая модель идеально подходит для прогнозирования поведения потока в областях, удаленных от стенки.

Моделирование нарастания льда проводилось с помощью решателя *iceFoam* с использованием подхода Эйлера-Лагранжа, по модели жидкой пленки по теории мелкой воды (SWIM) [16, 17], модуля динамической сетки. Модель пленки по теории мелкой воды была протестирована для различных аэродинамических профилей и трехмерных стреловидных крыльев. Результаты определения аэродинамических коэффициентов и толщины льда были сопоставлены с экспериментальными данными [17,18].

Для модели рыболовецкого судна проводилось моделирование гидродинамики судна с учетом волнения, образования водной струи у носовой части судна, движения капель и образованием наледи на поверхности модельного тела.

3. Постановка задачи

Рассматривалось типичное рыболовецкое судно, показанное на рис. 2. Данное судно имело следующие размеры в масштабе 1:1: $L=34$ м, $W=8$ м, $H=3.6$ м, $Depth_water=1$ м.

Для разрешения геометрических форм надстроек палубы необходимо большое число элементов сетки и это введет к большим вычислительным ресурсам, которые не всегда доступны. Первая оценка показывает, что размер сеток может быть от 40 до 100 млн ячеек.

С целью упрощения проведения расчетов трехмерная цифровая модель судна была упрощена с помощью программного обеспечения Salome для трехмерного моделирования и построения расчетных сеток. Нами были удалены такие сложные элементы, как антенна, кабели, краны, мелкие металлические предметы.

В результате в цифровой модели остались только наиболее важные элементы: капитанская рубка и корабельная палуба (рис. 3). Модель была сохранена в формате STL. Рассматриваемая модель судна для дальнейшего моделирования имела масштаб 1:10.

В результате исследуемая модель имела характеристики: $L=3.4$ м, $W=0.8$ м, $H=0.36$ м, $Depth_water=0.1$ м; $m=150$ кг. Центр масс имел координаты в точке $(-0.048, 0.104, 0.314)$. Значения моментов инерции: $(1.044, 0.0005, 0.0001, 0.072, 0.075, 1.04)$.



Рис. 2. Рыболовецкое судно в масштабе 1:1.

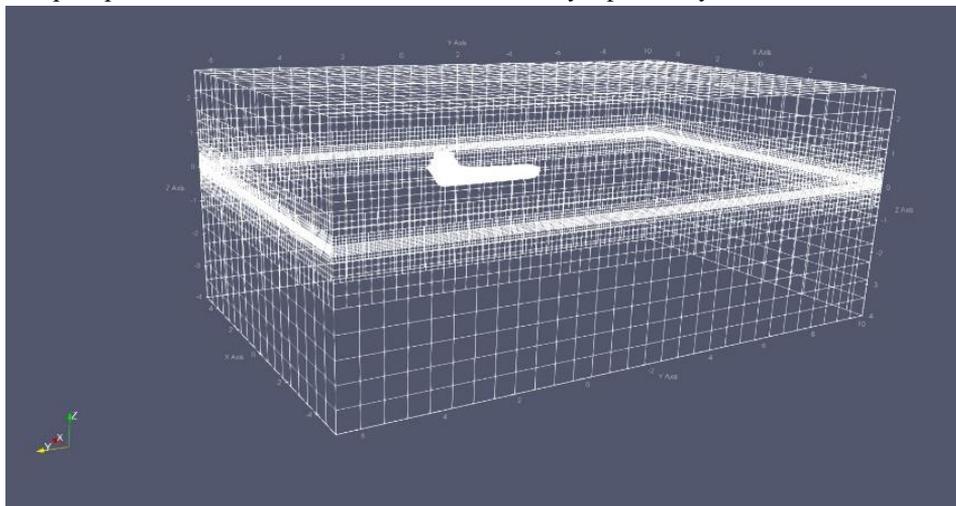
Fig. 2. The fishing vessel in 1:1 scale.



*Рис. 3. Упрощенная модель судна в масштабе 1:10.
Fig. 3. The simplified model of the vessel with size 1:10.*

Для проведения расчетов была подготовлена прямоугольная расчетная область с размерами: $5L \times 2L \times 3L$, где L это длина судна.

Было построено несколько неструктурированных сеток от 1.5 млн до 10 млн ячеек. Окончательно была выбрана сетка с 3 миллионами ячеек (рис. 4). Расчетная сетка была построена с помощью встроенной утилиты snappyHexMesh. Сгущение сетки происходило около раздела двух фаз воздух-вода и около корпуса судна. На входе расчетной области задавались граничные условия для волнения по модели волн Стокса. Также задавалось начальное распределение необходимых величин для двух фаз воздух-вода.



*Рис. 4. Расчетная область для судна.
Fig. 4. The numerical domain for the vessel.*

На входе вычислительной области были заданы граничные условия для волны в соответствии с волновой моделью Стокса первого рода. Также было задано начальное распределение

требуемых значений для воздушной и водной фаз. В ходе расчета было изучено положение потока массы воды и капель на носу судна для заданного числа Фруда до $Fr=0.4$.

Гидродинамика судна изучалась с учетом влияния регулярных волн, образования струи воды вблизи носа судна, движение капель вблизи поверхности корпуса модели. Параметры для моделирования определены в таблице 1.

Табл. 1. Параметры для расчетов

Table 1. Parameters for calculations

Parameters	Value
Re	$10^5 - 3.5 \times 10^6$
Fr	0.1-0.4
Ватерлиния	0.15-0.20
U_{air} / (m·s ⁻¹)	3-8

4. Результаты расчета

В ходе расчета было определено положение водной струи и капель у носовой части судна с помощью гидродинамического решателя по модели “жидкость в объеме” для чисел Фруда $Fr=0.1-0.4$. Длительность численного эксперимента для движения модельного судна на волнении в виртуальном бассейне составило $t=50$ секунд. Результаты моделирования для объемной доли для $Fr=0.4$ представлены на рисунке 5. Видно образование восходящей струи у судна и положение капель. Для задания начального положения облака брызг (капель), необходимого для расчета обледенения с помощью решателя iceFoam на основе результатов вычислений волнения было определено сечение, в котором оценены такие параметры как вектор скорости капель и их массовый расход.

Далее с помощью решателя iceFoam при заданном положении капель в расчетной области и скорости ветра было проведено моделирование процесса обледенения и получено распределение жидкой пленки воды, толщины льда на поверхности судна. Детальная постановка математической модели движения капель в турбулентном потоке газа и нарастания льда по поверхности обтекаемого тела приведены в [17, 18].

Табл. 2. Задание граничных условий для моделирования волнений

Table 2. Specifying boundary conditions for wave modeling

	Inlet	Outlet	Atmosphere	Ship
U	waveVelocity	zeroGradient	pressureInletOutletVelocity	movingWallVelocity
p_{rgh}	fixedFluxPressure	zeroGradient	totalPressure	fixedFluxPressure
α_{water}	waveAlpha	zeroGradient	inletOutlet	zeroGradient
k	fixedValue	zeroGradient	inletOutlet	kqRWF
nut	fixedValue	zeroGradient	zeroGradient	nutkWF
ω	fixedValue	zeroGradient	inletOutlet	omegaWF

Численные эксперименты проведены для случаев $MVD=300-1200$ мкм, скорости ветра $U_{wind}=3$ м/с и скорости судна $V=5$ м/с. Температуры воздуха и капель во входном сечении постоянны во всех расчетных вариантах, $T=270^\circ K$. Время расчета составило $t=8$ секунд. В

ходе расчета определялись траектории движения капель (рис. 6). Большая часть облака капель оседала на поверхности палубы. При этом образовывалась небольшая застойная воздушная зона, сразу за капитанской рубкой, куда капли не достигали.

Также в ходе расчета было определено распределение поля температуры (рис. 7).

Дополнительно получено распределение для толщины пленки воды (рис.8). Наиболее крупное образование пленки воды происходило на носовой части судна, на капитанской рубке, в задней части поверхности кормы.

На рис. 9 показано распределение толщины льда. Основная часть образовавшегося льда распределялась по поверхности палубы.

Был выполнен расчет для случая $MVD=1000$ мкм, скорости ветра $U_{wind}=10$ м/с и скорости судна $V=5$ м/с. Траектория движения капель была уже другой за счет большего значения скорости потока воздуха. Основная часть капель не достигала поверхности палубы и перемещалась в дальний след. Зависимость массы образовавшегося льда от диаметра капель при прочих равных условиях представлена на рис. 10.

Время расчета для одного типового примера составило около 24 часов с *interDyMFoam* и 30 часов с *iceFoam*-решателем. Вычисления проводились на вычислительном кластере ИСП РАН в параллельном режиме с использованием 48 или 96 ядер процессорных ядер для одного расчетного примера.

5. Заключение

Проведено первоначальное исследование обтекания корпуса модельного судна и процесса образования наледи на поверхности палубы с использованием открытых решателей *interDyMFoam* и *iceFoam*. Температура воздуха и капель соответствовала режиму гладкого льда (*glaze ice*), который является наиболее трудоемким для вычислений.

Расчетные результаты показали нелинейную зависимость распределения положения льда на поверхности судна от размера капель при прочих равных условиях. Однако, зависимость массы образовавшегося льда от диаметра капель (брызг) оказалась очень близка к линейной. Дальнейшее развитие может быть направлено на улучшение реалистичности модели судна, расчет обтекания и обледенения полномасштабной модели, уточнение параметров облака брызг, совершенствование модели взаимодействия капель между собой и поверхностью судна.



Рис. 5. Значение величины объемной доли α для $Fr=0.4$.
Fig. 5. The volume fraction for $t=50$ s at $Fr=0.4$.

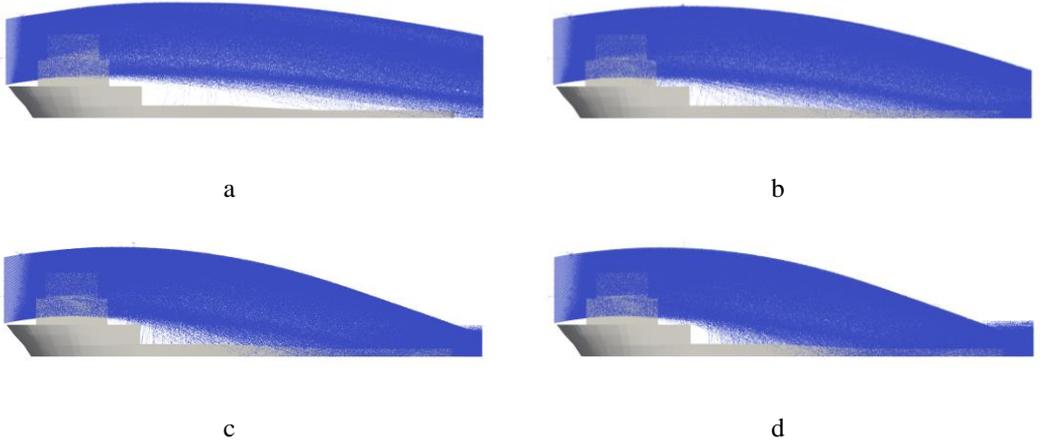


Рис. 6. Траектории движения капель вблизи судна при $U_{wind} = 3$ м/с,
а) $mvd = 300$ мкм, б) $mvd = 600$ мкм, в) $mvd = 1000$ мкм, г) $mvd = 1200$ мкм.
Fig. 6. The droplet trajectories near the ship at $U_{wind} = 3$ m/s,
а) $mvd = 300$ μm , б) $mvd = 600$ μm , в) $mvd = 1000$ μm , г) $mvd = 1200$ μm .

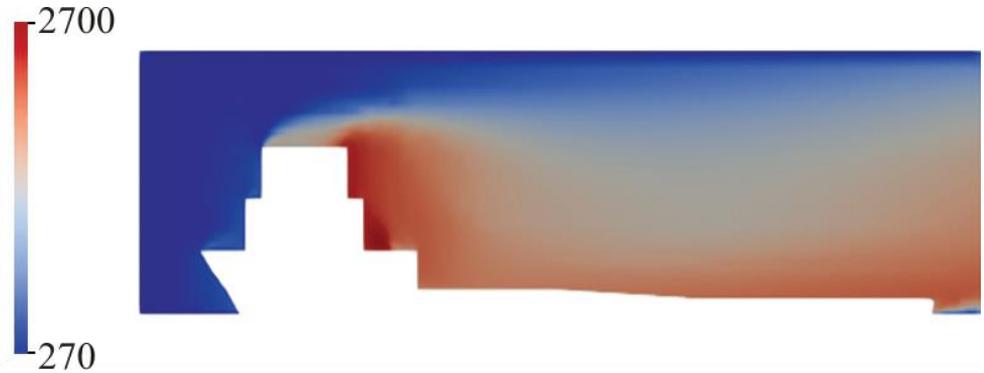


Рис. 7. Поле распределение температуры для $U_{wind} = 3$ м/с.
Fig. 7. The temperature distribution of air for $U_{wind} = 3$ m/s.

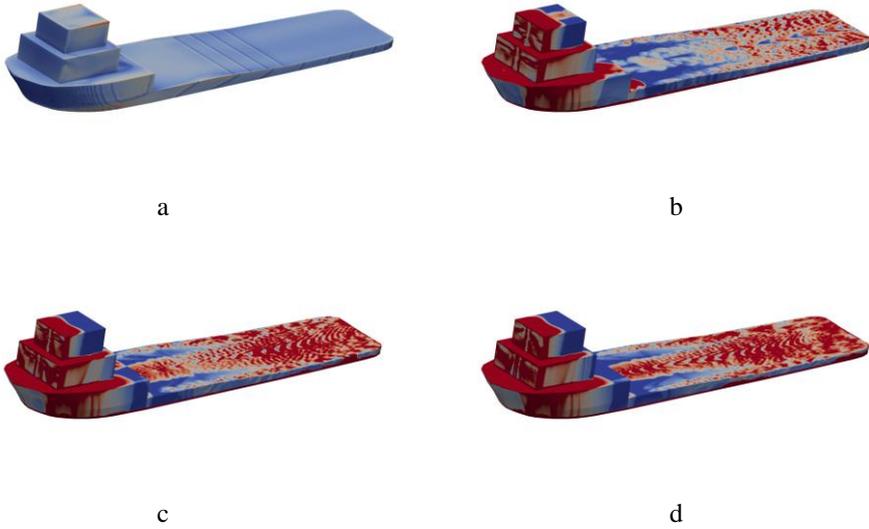


Рис. 8. Распределение пленки воды по поверхности корпуса судна для $U_{wind} = 3$ м/с, а) $mvd = 300$ мкм, б) $mvd = 600$ мкм, в) $mvd = 1000$ мкм, г) $mvd = 1200$ мкм.

Fig. 8. The water film distribution over the surface of the ship hull for $U_{wind} = 3$ m/s, а) $mvd = 300$ μ m, б) $mvd = 600$ μ m, в) $mvd = 1000$ μ m, г) $mvd = 1200$ μ m.

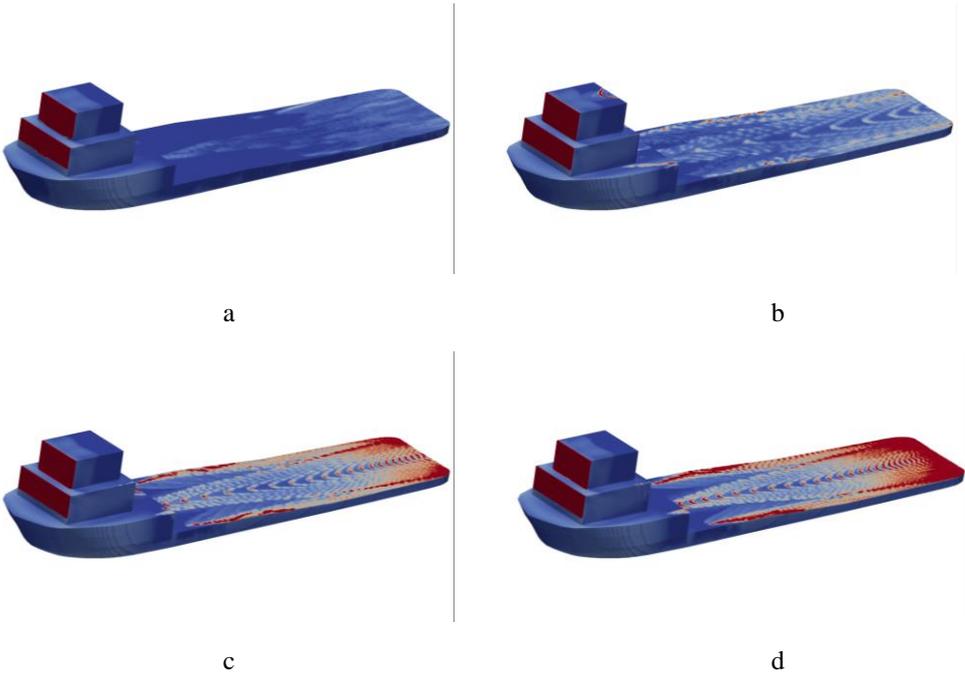


Рис. 9. Распределение наростшего льда по поверхности корпуса судна для $U_{wind} = 3$ м/с, а) $mvd = 300$ мкм, б) $mvd = 600$ мкм, в) $mvd = 1000$ мкм, г) $mvd = 1200$ мкм.

Fig. 9. The distribution of ice accretion on the ship hull surface for $U_{wind} = 3$ m/s а) $mvd = 300$ μ m, б) $mvd = 600$ μ m, в) $mvd = 1000$ μ m, г) $mvd = 1200$ μ m.

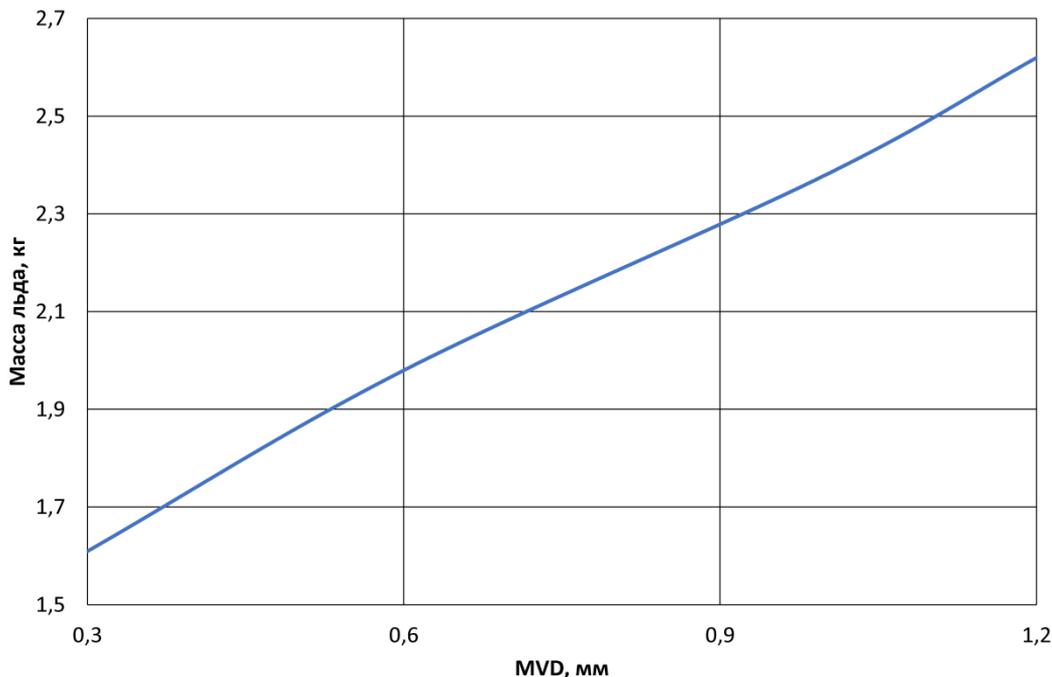


Рис. 10. Зависимость массы образовавшегося льда от диаметра капель при $U_{wind} = 10$ м/с.
Fig. 10. Dependence of ice mass on droplets' diameter at $U_{wind} = 10$ m/s.

Список литературы / References

- [1]. Качурин Л.Г., Смирнов И.А., Гашин Л.И. Обледенение судов. Учебное пособие. Ленинградский гидрометеорологический институт (ЛГМИ), 1980, 56 с.
- [2]. Panov V. V. Vessel Icing. Proceedings AARI, Saint Petersburg, Russia, 1976, 262.
- [3]. Zakrzewski W. P. Splashing a ship with collision-generated spray. *Journal of Cold Regions Science and Technology*, 1987, 14(1): 65-83.
- [4]. Ryerson C. C. Superstructure spray and ice accretion on a large U.S. Coast Guard cutter. *Journal of Atmospheric Research*, 1995, 36(3-4): 321-337.
- [5]. Samuelsen E. M., Edvardsen K., Graverson R. G. Modelled and observed sea-spray icing in Arctic-Norwegian waters. *Journal of Cold Regions Science and Technology*, 2017, 134: 54-81.
- [6]. Mintu S., Molyneux D., Oldford D. A state-of-the-art review of research on ice accretion measurements and modelling. Arctic Technology Conference, St. John's, Canada, 2016, 1- 19.
- [7]. Mintu S., Molyneux D., Colbourne B. A Theoretical model for ship-Wave impact generated sea spray. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2020, 143(4): 041201.
- [8]. Mintu S., Molyneux D. Ice accretion for ships and offshore structures. Part 2-Compilation of data. *Ocean Engineering*, 2022, 248: 110638.
- [9]. Weller H. G., Tabor G., Jasak H. et al. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Journal of Computers in Physics*, 1998, 12: 620-631.
- [10]. Seo S., Park S., Koo B. Effect of wave periods on added resistance and motions of a ship in head sea simulations. *Ocean Engineering*, 2017, 137: 309-327.
- [11]. Wang J. H., Zhao W. W., Wan D. C. Development of naoe- FOAM-SJTU solver based on OpenFOAM for marine hydrodynamics. *Journal of Hydrodynamics*, 2019, 31(1): 1-20.
- [12]. Vukcevic V., Jasak H., Malenica S. Decomposition model for naval hydrodynamic applications, Part I: Computational method. *Ocean Engineering*, 2016, 121: 37-46.
- [13]. Vukcevic V., Jasak H., Malenica S. Decomposition model for naval hydrodynamic applications, Part II: verification and validation. *Ocean Engineering*, 2016, 121: 76-88.
- [14]. Seo S., Park S., Koo B. Effect of wave periods on added resistance and motions of a ship in head sea simulations. *Ocean Engineering*, 2017, 137: 309-327.

- [15]. Bahatmaka A., Kim D. J. Numerical modelling for traditional fishing vessel prediction of resistance by CFD approach. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2018, 13(8): 6211-6215.
- [16]. Bourgault Y., Beaugendre H., Habashi W. G. Development of a shallow-water icing model in FENSAP-ICE. *Journal of Aircraft*, 2000, 37(4): 640-646.
- [17]. Koshelev K. B., Melnikova V. G. Strijhak S. V. Development of iceFom solver for modeling ice accretion. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*, 2020, 32(4): 217-234 (in Russian).
- [18]. Strijhak S., Ryazanov D., Koshelev K., Ivanov A. A neural network prediction for ice shapes on airfoils using icefoam simulations. *Aerospace*, 2022, 9(2): 96.
- [19]. Бэтчелор Дж.К. Введение в динамику жидкости. Москва. Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2004., 768 с.
- [20]. Ландау Л., Лифшиц Е. Теоретическая физика. В десяти томах. Том VI. Гидродинамика. Издательство Физматлит, 2017. 728 стр.

Информация об авторах / Information about authors

Константин Борисович КОШЕЛЕВ – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН. Сфера научных интересов: вычислительная гидродинамика, гидрология, геоинформатика.

Konstantin Borisovich KOSHELEV – Cand. Sci. (Phys.-Math.), associate professor, senior researcher at the Institute for water and environmental problems of the Siberian branch of the RAS. Research interests: computational fluid dynamics.

Андрей Владимирович ОСИПОВ – инженер Института системного программирования им. В.П. Иванникова РАН с 2018 года. Сфера научных интересов: вычислительная гидродинамика, метод контрольного объема, подвижные сетки, лагранжев подход.

Andrei Vladimirovich OSIPOV – engineer of the Ivannikov Institute for System Programming of the RAS since 2018. Research interests: computational fluid dynamics, finite volume method, dynamic meshes, particles.

Сергей Владимирович СТРИЖАК – кандидат технических наук, ведущий инженер Института системного программирования им. В.П. Иванникова РАН с 2009 года. Сфера научных интересов: вычислительная гидродинамика, многофазные течения, турбулентность, ветроэнергетика, параллельные вычисления.

Sergei Vladimirovich STRIJHAK – candidate of technical sciences, leading engineer of the Ivannikov Institute for System Programming of the RAS since 2009. Research interests: computational fluid dynamics.