

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ СУДОХОДСТВА

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION AND SAFETY OF NAVIGATION

УДК 659.62

DOI: 10.37890/jwt.vi71.262

САЕ-исследования аэродинамики речных льдов

В.А. Лобанов

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0931-7317>

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В работе проведён обзор осенне-зимних подвижек и торошения льдов на речных судоходных путях. Выделен круг задач обеспечения безопасности ледового судоходства, требующий прогноза ветровых нагрузок на торосистые ледяные поля крупнобитых фракций. В качестве комплексного аргумента для характеристики такого поля предложен коэффициент его парусности. Выявлена статистическая функция распределения высоты торосов.

Для ускорения процесса трёхмерного описания геометрии ледяной поверхности с заданным законом распределения торосов предложено совместное использование САД и САЕ-систем. Проведена серия САЕ-«продувок» модельных ледяных полей. По анализу результатов САЕ-моделирования ветрового воздействия на крупнобитые льды подтверждена зависимость аэродинамических нагрузок от направления атмосферного потока. Сделан вывод об ограниченности применения классического уравнения газодинамики в отношении исследованных льдов.

Ключевые слова: ледяной покров, торосистость льда, ветровые подвижки льдов, ледовое сжатие, САЕ-система, численное моделирование.

CAE studies of river ice cover aerodynamics

Vasily A. Lobanov

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0931-7317>

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper provides an overview of autumn-winter movements and ice hummocking on river shipping routes. The range of tasks of ensuring the safety of ice navigation is allocated, which requires the forecast of wind loads on hummocky ice fields of big fractions. As a complex argument for the characterization of such a field, the coefficient of its windage is proposed. The statistical function of the distribution of the height of the hummocks has been revealed.

To speed up the process of three-dimensional description of the geometry of the ice surface with a given law of the distribution of hummocks, the joint use of CAD and CAE systems is proposed. A series of CAE «purgings» of model ice fields has been carried out. The dependence of aerodynamic loads on the direction of atmospheric flow has been confirmed by the analysis of the results of CAE-modeling of wind impact on small floe ices. The

conclusion is made about the limitations of the application of the classical equation of gas dynamics in relation to the studied ice.

Keywords: ice cover, ice hummockiness, wind shifts of ice, ice compression, CAE system, numerical modeling.

Введение

Ледяная среда является дополнительной навигационной опасностью при эксплуатации флота с невысоким уровнем его ледовокатегорийности. Подавляющая часть грузового флота внутреннего и смешанного (река-море) плавания, по объективным причинам эпизодически работающего во льдах, относится именно к этой группе.

Можно констатировать тот факт, что на замерзающих судоходных акваториях наиболее опасным явлением признаны подвижки льдов вследствие течения или ветра. Они провоцируют ледовые сжатия в локальных зонах раздела кинематических или морфологических параметров ледяных образований [1-12]. Ледовые сжатия значительно ухудшают возможности по ледопроеходимости судов, нередко обнуляют их и, как следствие, приводят к повреждениям корпусов и движительно-рулевых органов. Кроме того, практика ледовых навигаций многократными примерами подтвердила губительность этих явлений даже для судов с повышенными ледовыми категориями [2-5].

Уровень ветровых сжатий существенно определяется состоянием внешней поверхности ледовых полей. Поэтому её изучение и математическое описание с целью прогноза места, времени и интенсивности ледовых сжатий сохраняет актуальность [2-7]. Следует указать на то, что традиционные математические модели по аэродинамике льдов дают корректные оценки для очень больших поверхностей (~ сотням квадратных миль). При этом допустимо условное усреднение торосистости этих поверхностей путём введения коэффициента аэродинамического трения, а общий вектор ледового дрейфа считать коллинеарным ветровому воздействию.

Однако в достаточной области задач требуются оценки аэродинамических нагрузок на отдельные ледяные образования значительно большей степени раздробленности. Для условий внутренних водных путей – это крупнобитые льды и обломки ледяных полей. Экспертная оценка результатов, полученных для сопоставимых условий с использованием классических методик, показала неадекватность последних для таких льдов – расхождение в уровнях ветровых нагрузок достигало кратности порядка [3,5,13]. При этом необходим учёт конфигурации льдов в плане и «шероховатости» их поверхности в конкретном направлении ветрового воздействия («продувки»).

Поэтому авторский опыт решения задач аэродинамического воздействия на ледяной покров внутренних водных путей отдаёт предпочтение численным методам. Так, например, САЕ-симуляция подобных процессов обеспечивает вполне корректный отклик по искомым результатам [2,3,10].

Моделирование

Приведённый ниже обзор явился результатом анализа САЕ-моделирования множества вариантов «продувки» крупнобитых льдов при варьировании их размеров, торосистости, направления и силы ветра. Пример модели показан на рис. 1.

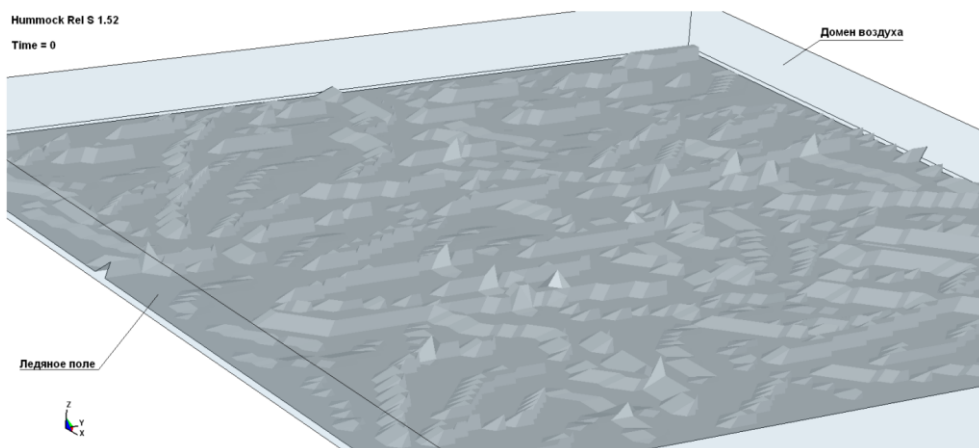


Рис. 1. Пример модели в САЕ-среде

Для снижения временного ресурсопотребления задачи при допущении незначимых ветровых деформаций льда как контактного материала его реология была сформулирована абсолютно жёсткой оболочкой (*MAT_RIGID [15]). Взаимодействующая поверхность этой оболочки была помещена внутрь подвижного объёмного домена, имитирующего атмосферу. При этом воздух был описан восьмиузловыми Эйлеровыми элементами. Его реология в используемой САЕ-среде сформулирована моделью *MAT_NULL – материалом с нулевыми параметрами девиатора напряжений [15]. Уравнение состояния атмосферы для этого материала допустимо к описанию в нескольких формах. Авторские возможности были ограничены его формулировкой в виде *EOS_IDEAL_GAS [14,16]:

$$p_a = (C_p - C_v)\rho_a T, \quad (1)$$

где p_a – давление воздуха, Па;

C_p ; C_v – удельная теплоёмкость воздуха соответственно при постоянных давлении и объёме ($C_p = 1005 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{К}}$; $C_v = 718 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{К}}$);

ρ_a – плотность воздуха ($\rho_a = 1,276 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$);

T – абсолютная температура воздуха, °К.

В расчётных моделях изменялась раздробленность ледяной среды (размеры полей: 50-100 м), торосистость ледяных образований (0-5 баллов), сила ветра (0-20 м/с) и его направление (0-180 градусов по азимуту, плоскость XOY, рис. 1). Ресурсопотребление оперативной памяти САЕ-модели по конкретному варианту расчёта зависело от площади ледяного поля и колебалось в интервале потребностей хранения текущих данных для 750 000-1 150 000 узлов.

Результаты

Постановка настоящей задачи вначале требует описания восторошенного состояния ледяного покрова. По имеющимся публикациям в этой тематике ветровую фрагментацию и торосение протяжённых льдов допустимо свести к поверхности с логнормальным распределением торосов по площади ледяного поля [6,7]. Однако для речных судоходных путей такая модель чаще некорректна по той причине, что торосистые зоны формируются преимущественно вследствие кратковременных

изменений уровней воды в осенне-зимний период, которые провоцируют местные подвижки льда.

Результаты анализа данных рукописи [15] о состоянии поверхности льдов ВВП ЕГС России, дополненных авторскими материалами, убедительно тяготеют к описанию статистического распределения размеров торосов на речных акваториях показательным (экспоненциальным) законом:

$$F_h(h) = 1 - e^{-k_h h}, \quad (2)$$

где $F_h(h)$ – функция распределения высоты торосов;

k_h – эмпирический коэффициент.

Пример естественного состояния таковой поверхности льда после интенсивного торошения показан на рис. 2, а график функции распределения (2) при $k = 4$ (торосистость 5 баллов) – на рис. 3.



Рис. 2. Характер торошения льдов внутренних водных путей

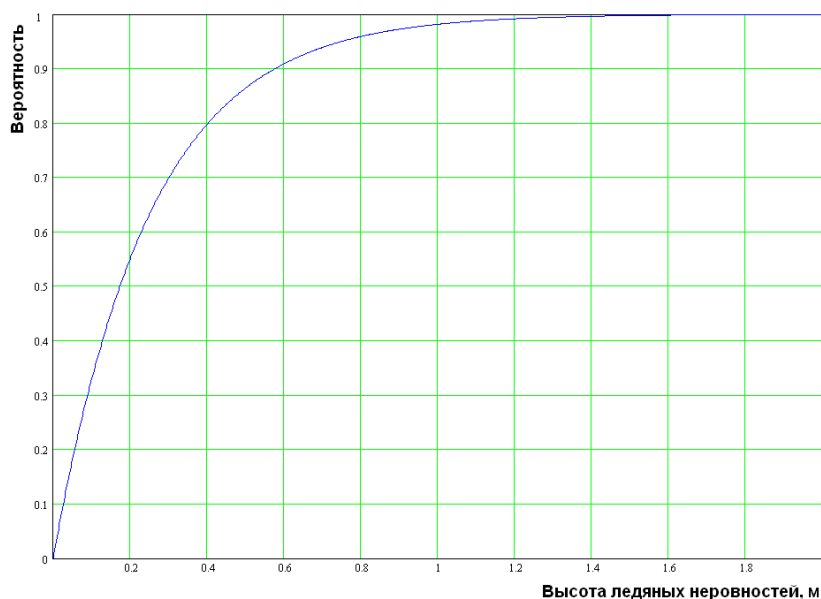


Рис. 3. Функция распределения высоты речных торосов

Кривая функции распределения (Рис. 3) показывает, что с обеспеченностью не менее 95 % взломанные ледяные зоны, сформированные на речных судоходных магистралях после подвижек полей, образованы наслоениями торосов высотой до 0,8 м.

Следует отметить, что торосистость как количественный параметр определяет только соотношение восторженной части и всей площади рассматриваемой ледяной поверхности, то есть высота торосов не является аргументом торосистости. Поэтому эмпирический коэффициент в зависимости (2) должен иметь значение комплексного аргумента. Автором рекомендован коэффициент парусности. Его можно интерпретировать как отношение площадей двух одинаковых в плане ледяных полей – ровного и заторошенного. Например, для торосов высотой 0,20-0,25 м при пятибалльной торосистости ледяного образования его значение составляет около 1,5.

Корректное трёхмерное приближение модели торосистого поля к его естественному состоянию не оправдывает больших затрат времени на подготовку геометрии тела только средствами САЕ-технологий. Дело в том, что в сеточных генераторах САЕ-систем отсутствуют возможности по автоматизированному созданию конечноэлементного разбиения сред с требуемым для пользователя случайным распределением позиций узлов. Это вынудило автора к использованию сторонних математических САД-систем. Так в настоящей работе для описания восторженных ледяных полей был применён пакет MATHCAD [17]. При этом следует отметить, что окончательный этап описания геометрии льда, связанный с переводом координат полученных узлов в «формат» САЕ-системы, выполнялся полуавтоматически. Пример торосистой ледяной поверхности, разработанной с применением MATHCAD-среды показан на рис. 4.

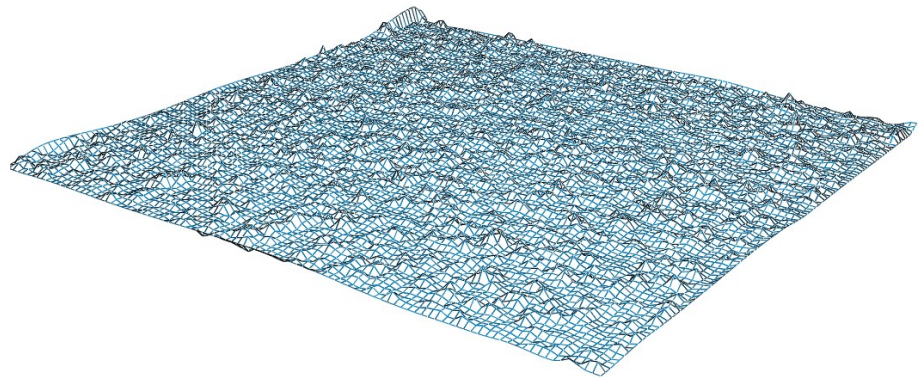


Рис. 4. Вид торосистой поверхности, созданной в MATHCAD-среде

Виртуальные «продувки» исследованных ледяных полей выявили предполагаемую выше зависимость уровня ветровых усилий от направления действия атмосферного потока. Это подтверждают данные САЕ-испытаний, показанные на рис. 5.

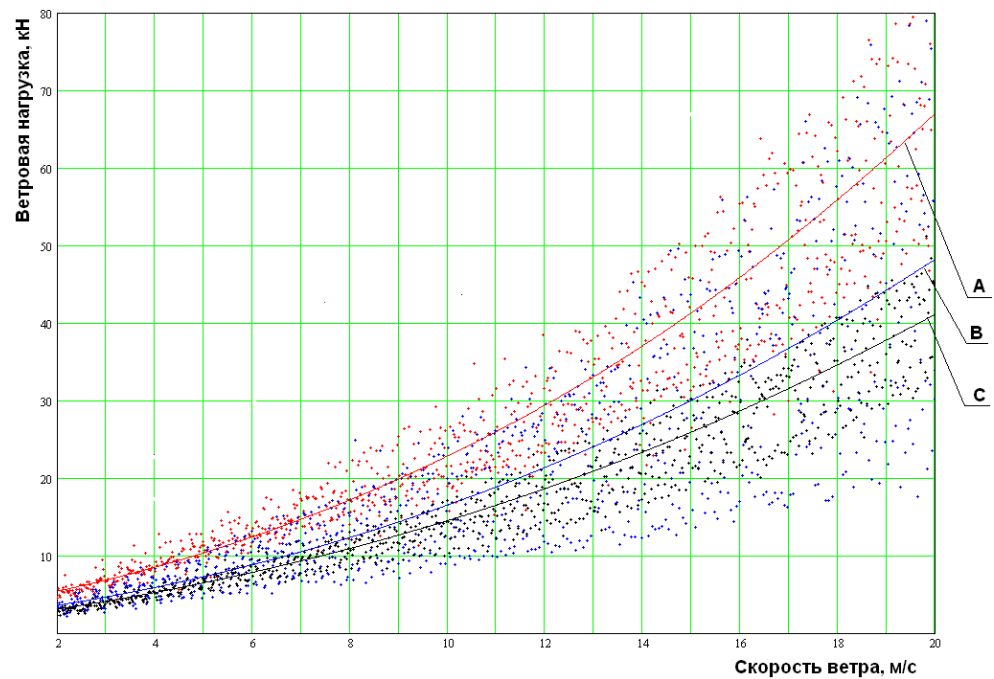


Рис. 5. Зависимость внешних нагрузок на ледяной покров от направления и силы ветра

Графики рис. 5 на примере крупнобитой торосистой льдины (коэффициент парусности – 1,52) средним размером в плане 50 м наглядно иллюстрируют «индивидуальность» каждого варианта (кривые А и В – рост ветровых нагрузок в противонаправленных «продувках», кривая С – для «траверзного» направления ветра

по отношению к условиям А и В). Так при взаимно перпендикулярных «продувках» разница нагрузок может достигать 50 % (линии С и А соответственно).

Поэтому применение известной формулы газодинамики (3) при оценках аэродинамических сил на отдельных ледяных образованиях ограниченных размеров во многих частных случаях не даёт адекватного результата и экспертный подход для решения подобных задач должен быть ориентирован на численные методы:

$$F_a = k_f \rho_a A V_a^2, \tag{3}$$

- где F_a – аэродинамическая нагрузка;
- k_f – усреднённый коэффициента воздушного трения;
- A – площадь ледяного поля;
- V_a – скорость ветра.

При этом следует отметить, что САЕ-эксперименты по «продувке» исследуемых льдов с их последующей статистической обработкой выявили большую дисперсию коэффициента k_f (Рис. 6).

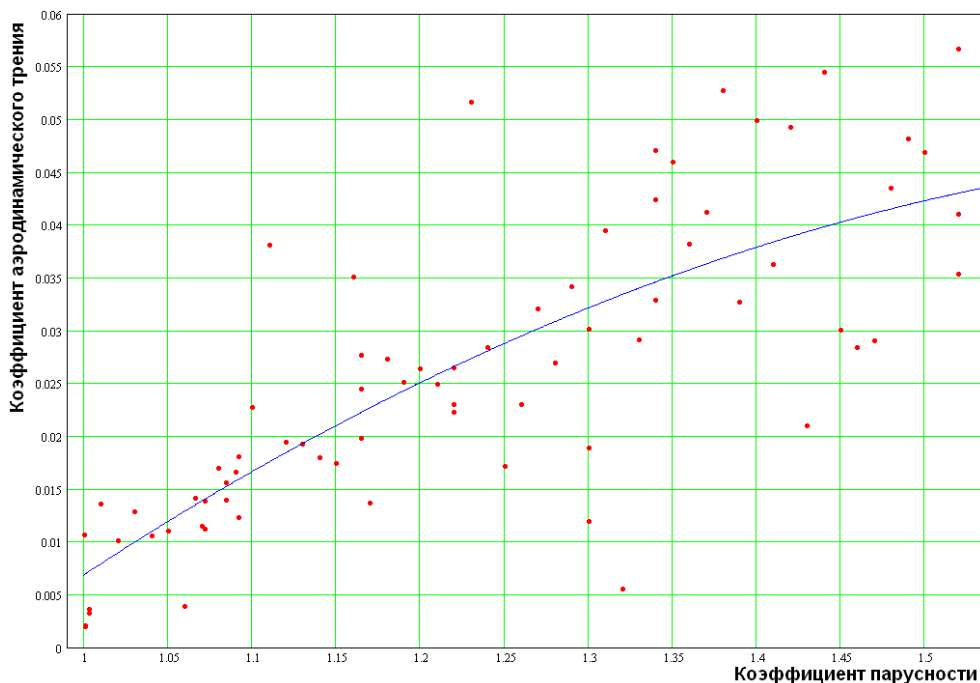


Рис. 6. Статистическая связь коэффициента k_f с коэффициентом парусности ледяного поля

Для торосистых ледяных полей крупнобитых фракций в исследованном диапазоне их коэффициента парусности разброс величин усреднённого коэффициента воздушного трения при различных направлениях ветра достигает уровня порядка (Рис. 6). И хотя корреляционный анализ обнаружил связь указанных коэффициентов, однако уровень её низок (коэффициент корреляции составил 0,75).

Заключение

1. В достаточном ряде частных случаев адекватные оценки аэродинамических нагрузок на торосистые ледяные поля крупнобитых фракций требуют численного моделирования.
2. Для качественной формулировки влияния торосистости конкретного ледяного образования на его «подверженность» ветровому воздействию предложен коэффициент парусности.
3. Усреднённый коэффициент аэродинамического трения и коэффициент парусности крупнобитых всторошенных льдов слабо коррелированы.

Список литературы

1. Vasily A. Lobanov, Yulia R. Guro-Frolova. Visualization of CAE-Solutions of Ice Navigation Partial Problems. Joint Maneuvering of Vessels (2022). Scientific Visualization 14.1: 32 - 40, DOI: 10.26583/sv.14.1.03
2. Теоретические основы обеспечения безопасности судовождения на внутренних водных путях: монография / А.Н. Клементьев, И.К. Кузьмичёв, В.А. Лобанов [и др.]; под ред. И.К. Кузьмичёва. – Нижний Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2020. – 124 с. – ISBN 978-5901722-73-2. – Текст: непосредственный.
3. Лобанов В.А. Ветровые нагрузки на ледяной покров // Интернет-журнал «Науковедение» Том 7, №2 (2015). – с. 1-11, DOI: 10.15862/64TVN215
4. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. 2 издание, исправленное. – СПб.: Судостроение, 2014. – 504 с., ил.
5. Коржавин К.Н. О дрейфе ледяных полей под воздействием ветра. – Материалы симпозиума по льду, 1972. с. 109-112.
6. Миронов Е.У., Клячкин С.В., Порубаев В.С. Морфометрические характеристики гряд торосов и стамух по данным натурных наблюдений и модельных расчетов в северо-западной части Каспийского моря // Труды 9-й межд. конф. RAO'09, 15-18 сентября 2009. – СПб.: 2009. т.1. с. 280–286.
7. Смирнов В.Н., Миронов Е.У. Исследования прочности, морфометрии и динамики льда в инженерных задачах при освоении шельфа в замерзающих морях. – Проблемы Арктики и Антарктики, №2 (85), 2010. – с. 5-15.
8. Aleksei A. Dobrodeev, Kirill E. Sazonov, Elizaveta A. Bokanova. Ice interaction of carrier ships in drifting ice and under ice compression: theoretical description. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-014.pdf
9. Robert Frederking. Nanisivik Revisited: Ice Pressure Measurements from Winter 1985-86. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-018.pdf
10. Marnix van den Berg, Raed Lubbad1, Sveinung Løset. Numerical modelling of ice pressure effects on the ice resistance during station keeping in broken ice. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-082.pdf
11. Dyre Oliver Dammann, Andrew R. Mahoney, Mark Johnson, Hajo Eicken, Leif E.B. Eriksson, Franz J. Meyer, Emily Fedders, Mark Fahnestock. Applications of radar interferometry for measuring ice motion. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-012.pdf
12. Alisa V. Baranskaya, Nataliya G. Belova, Daria M. Bogatova, Anna V. Novikova, Stanislav A. Ogorodov, Tanghua Li, Timothy A. Shaw, Benjamin P. Horton, Nicole S. Khan. Relative sea level changes as a driver of coastal dynamics in the Russian Arctic. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-003.pdf

13. Fujisaki A., Yamaguchi H., Toyota T., Futatsudera A., Miyanaga M. Measurements of air ice drag coefficient over the ice covered Sea of Okhotsk. – J. Oceanogr., 2009. №65. – p. 487-498.
14. Botticher R. Fluid Structure Interaction with *MAT_SOFT_TISSUE and EFG Elements. 5th European LS-DYNA Users Conference. – 2005.
15. Тронин В.А. Повышение безопасности и эффективности ледового плавания судов на внутренних водных путях: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук: специальность 05.22.16 – Судовождение / Горький, 1990. – 414 с.
16. Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA. – URL: <https://www.lstc.com/products/ls-dyna>
17. PTC MathCAD. – URL: <https://www.ptc.com/en/products/MathCAD>

References

1. Vasiliy A. Lobanov, Yulia R. Guro-Frolova. Visualization of CAE-Solutions of Ice Navigation Partial Problems. Joint Maneuvering of Vessels (2022). Scientific Visualization 14.1: 32 - 40, DOI: 10.26583/sv.14.1.03
2. Teoreticheskie osnovy obespecheniya bezopasnosti sudovozhdeniya na vnutrennih vodnyh putyakh: monografiya / A.N. Klement'ev, I.K. Kuz'michyov, V.A. Lobanov [i dr.]; pod. red. I.K. Kuz'michyova. – Nizhnyj Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2020. – 124 s. – ISBN 978-5901722-73-2. – Tekst: neposredstvennyj.
3. Lobanov V.A. Vetrovye nagruzki na ledyanoj pokrov // Internet-zhurnal «Naukovedenie» Tom 7, №2 (2015). – s. 1-11, DOI: 10.15862/64TVN215
4. Ionov B.P., Gramuzov E.M. Ledovaya hodkost' sudov. 2 izdanie, ispravlennoe. – SPb.: Sudostroenie, 2014. – 504 p. – Tekst: neposredstvennyj.
5. Korzhavin K.N. O drejfe ledyanyh polej pod vozdejstviem vetra. – Materialy simpoziuma po l'du, 1972. c. 109-112.
6. Mironov E.U., Klyachkin S.V., Porubaev V.S. Morfometricheskie karakteristiki gryad torosov i stamuh po dannym naturnyh nablyudenij i model'nyh raschetov v severo-zapadnoj chasti Kaspijskogo morya // Trudy 9-j mezhd. konf. RAO'09, 15-18 sentyabrya 2009. – SPb.: 2009. t.1. s. 280–286.
7. Smirnov V.N., Mironov E.U. Issledovaniya prochnosti, morfometrii i dinamiki l'da v inzhenernyh zadachah pri osvoenii shel'fa v zamerzayushchih moryah. – Problemy Arktiki i Antarktiki, №2 (85), 2010. – s. 5-15.
8. Aleksei A. Dobrodeev, Kirill E. Sazonov, Elizaveta A. Bokatova. Ice interaction of carrier ships in drifting ice and under ice compression: theoretical description. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-014.pdf
9. Robert Frederking. Nanisivik Revisited: Ice Pressure Measurements from Winter 1985-86. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-018.pdf
10. Marnix van den Berg, Raed Lubbad1, Sveinung Løset. Numerical modelling of ice pressure effects on the ice resistance during station keeping in broken ice. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-082.pdf
11. Dyre Oliver Dammann, Andrew R. Mahoney, Mark Johnson, Hajo Eicken, Leif E.B. Eriksson, Franz J. Meyer, Emily Fedders, Mark Fahnestock. Applications of radar interferometry for measuring ice motion. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-012.pdf
12. Alisa V. Baranskaya, Nataliya G. Belova, Daria M. Bogatova, Anna V. Novikova, Stanislav A. Ogorodov, Tanghua Li, Timothy A. Shaw, Benjamin P. Horton, Nicole S. Khan. Relative sea level changes as a driver of coastal dynamics in the Russian Arctic. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-003.pdf

13. Fujisaki A., Yamaguchi H., Toyota T., Futatsudera A., Miyanaga M. Measurements of air ice drag coefficient over the ice covered Sea of Okhotsk. – J. Oceanogr., 2009. №65. – p. 487-498.
14. Botticher R. Fluid Structure Interaction with *MAT_SOFT_TISSUE and EFG Elements. 5th European LS-DYNA Users Conference. – 2005.
15. Tronin V.A. Povyshenie bezopasnosti i effektivnosti ledovogo plavaniya sudov na vnutrennih vodnyh putyah: dissertaciya na soiskanie uchyonoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk: special'nost' 05.22.16 – Sudovozhdenie / Gor'kij, 1990. – 414 s.
16. Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA. – URL: <https://www.lstc.com/products/ls-dyna>
17. PTC MathCAD. – URL: <https://www.ptc.com/en/products/MathCAD>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лобанов Василий Алексеевич, профессор кафедры Судовождения и безопасности судоходства, доцент, д.т.н., кафедра Судовождения и безопасности судоходства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, Россия, Нижний Новгород, Нестерова 5, e-mail: lobbas@mail.ru

Vasily A. Lobanov
Professor of department of Navigation and safety of navigation, associate professor, Dr. Sci. Tech., department of Navigation and safety of navigation; Volga State University of Water Transport, 603950, Russia, Nizhny Novgorod, Nesterova 5

Статья поступила в редакцию 05.05.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.
Received 05.05.2022; published online 07.06.2022.