

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.291

Численное исследование низкоскоростного столкновения стального шара с ледяной плитой

¹Халид В., ¹Голубев В.И., ^{1,2}Гусева Е.К.

¹Московский физико-технический институт, <https://mipt.ru/>

г. Долгопрудный 141700, Московская область, Российская Федерация

²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, <https://ipmnet.ru/>

Москва 119526, Российская Федерация

E-mail: khalid@phystech.edu, golubev.vi@mipt.ru, guseva.ek@phystech.edu

Поступила 15.02.2024, рецензирована 20.02.2024, принята 26.02.2024, опубликована 25.04.2024

Представлена действительным членом РАЕН И.Б. Петровым

Аннотация: Рассматривается процесс динамического деформирования при низкоскоростном столкновении деформируемых твёрдых тел. Полная трёхмерная контактная задача численно решена в проблемно-ориентированном программном комплексе Abaqus, основанном на явном конечно-элементном методе на структурных расчётных сетках. Применены две основные механико-механические модели – линейная изотропная упругая и упругопластическая. Полученные результаты моделирования продемонстрировали возможность воспроизведения результатов лабораторных экспериментов, доступных в открытой литературе, для различных скоростей столкновения. Понимание процесса деформирования льда востребовано в ряде прикладных задач, например, для оценки влияния ударов льда по крылья самолётов и фильтрации переотражённых от контактной границы лёд-вода паразитных волн, возникающих в процессе проведения сейсмической разведки в Арктическом регионе.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, реологические модели льда, деформируемое твёрдое тело, линейная упругость, пластичность

УДК 004.94

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 23-21-00384, <https://rscf.ru/project/23-21-00384/>.

Для цитирования: Халид В., Голубев В.И., Гусева Е.К. Численное исследование задачи низкоскоростного столкновения стального шара с ледяной плитой. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(2):291-296. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.291.

Numerical Investigation of the Steel Ball-Ice Plate Low-Speed Collision

Walid Khalid, Vasily I. Golubev

Moscow Institute of Physics and Technology, <https://mipt.ru/>

Dolgoprudny 141700, Moscow region, Russian Federation

E-mail: khalid@phystech.edu, golubev.vi@mipt.ru

Evgeniya K. Guseva

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, <https://ipmnet.ru/>

Moscow 119526, Russian Federation

E-mail: guseva.ek@phystech.edu

Received Februar 15, 2024, peer-reviewed Februar 20, 2024, accepted Februar 26, 2024, published April 25, 2024

Abstract: In this paper, the dynamic deformation process during the low-speed collision was investigated. The full 3D dynamic contact problem was simulated in the Abaqus software, based on the explicit finite-element method on structured meshes. Two basic mechanical models (linear isotropic elastic and elastoplastic) are considered. The obtained results showed the possibility of the experimental data, available in the open literature for different striker velocities, reproduction.

The better understanding of the ice deformation process can be useful for different applied problems, like the ice impact on the aircraft wings estimation and the ice-water contact reflected waves filtration during the seismic survey in the Arctic region

Keywords: computer simulation, ice rheology models, deformable solid body, linear elasticity, plasticity
UDC 004.94

Acknowledgments: This work was financially supported by the Russian Science Foundation, project 23-21-00384, <https://rscf.ru/en/project/23-21-00384/>.

For citation: Walid Khalid, Vasily I. Golubev, Evgeniya K. Guseva. Numerical Investigation of the Steel Ball-Ice Plate Low-Speed Collision. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(2):291-296e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.291.

Содержание

1. Введение (292)
 2. Математическая модель и численный метод (293)
 3. Результаты моделирования (294)
 - 3.1. Упругая модель (294)
 - 3.2. Упругопластическая модель (294)
 4. Заключение (295)
- Литература (296)

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача корректного расчёта процесса динамического деформирования льда является актуальной. Данное явление встречается во множестве прикладных областей, например, в авиастроении и при сейсмической разведке месторождений нефти и газа в Арктике. Понимание механики льда может позволить создать новые инженерные технологии.

Существует множество исследовательских работ, направленных на изучение механических свойств льда. Например, инженерные свойства морского льда были детально освещены в работе [1]. Процесс растрескивания монокристаллического льда под высокоскоростным воздействием экспериментально был исследован в работе [2]. Более современным обзором известных механических свойств льда является работа [3]. В ней было показано, что предел растяжения на сжатие и на растяжение меняется в широком диапазоне при изменении температуры. Также были отмечены различия в механических свойствах льда при квазистатических тестах на сжатие и при тестировании на высокоскоростные удары. Недавно исследователями экспериментально были исследованы значения прочности, величины деформации и упругих

модулей льда для различных температур и скоростей нагружения [4].

Многие исследовательские коллективы работают над задачей построения надёжной механической модели льда для описания процесса его деформирования. Например, в работе [5] определяющие соотношения для описания высокоскоростного деформирования льда и алгоритм численного расчёта напряжений был предложен. Он основан на критерии перехода в пластическое состояние Drucker-Prager и описывает различное поведение при сжатии и растяжении. В работе [6] трёхмерная модель, учитывающая зависимость от скорости деформирования, была предложена и успешно валидирована на динамическом бразильском тесте для кольца из льда. В статье [7] предложено новое материальное уравнение, используемое для ледяных материалов, связанное с квазистатическими и ударными реакциями.

Недавно, подробное экспериментальное исследование процесса взаимодействия стального шара с пластиной из льда было проведено [8]. Использование широкого диапазона скоростей удара позволило получить различные деформационные кривые, содержащие информацию о реологии льда. Настоящая работа является попыткой применения простейших механических моделей для описания наблюдаемых в эксперименте деформаций льда. Для проведения компьютерного моделирования использовалась полная трёхмерная постановка, решаемая явным конечно-элементным методом в программном комплексе Abaqus. Последовательно использовались линейная упругая и упругопластическая модели для воспроизведения экспериментальных данных.

Для получения наилучшего совпадения результатов значение предела текучести рассматривалось как дополнительный свободный параметр модели.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

В настоящей работе процесс столкновения стального шара с пластиной из льда изучался численно. Ранее экспериментальные исследования были проведены другой исследовательской группой [8]. Рассматривались случаи различной скорости удара, которая варьировалась в диапазоне от 0.431 м/с до 2.230 м/с. Полученные диаграммы "сила реакции опоры – глубина проникновения шара" представлены на **Рис. 1**. Было показано, что увеличение скорости удара приводит к увеличению максимальной глубины проникновения шара.

В данной работе нами получены результаты численного расчёта в полной трёхмерной постановке. Все размеры объектов и свойства материалов были взяты из работы [8]. Радиус шара был равен 38 мм, а длина, ширина и высота ледяной пластины равнялись 2000×2000×550 мм. Используемые параметры льда: $C_p = 3940$ м/с, $C_s = 2493$ м/с, $\rho = 917$ кг/м³. Используемые параметры стали: $C_p = 5700$ м/с, $C_s = 3100$ м/с, $\rho = 7800$ кг/м³.

Использовался конечно-элементный метод, реализованный в Abaqus. Была построена структурная расчётная сетка, содержащая более 600 тысяч расчётных узлов. Полная область интегрирования приведена на **Рис. 2**.

Две различные модели были использованы для описания процесса динамического деформирования льда. Первая из них

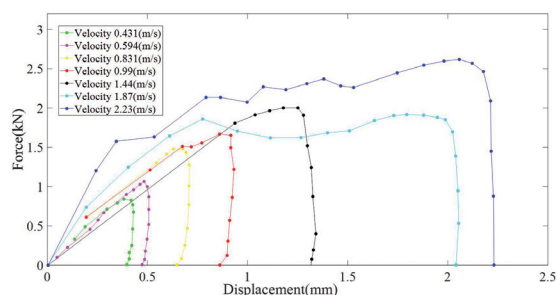


Рис. 1. Диаграмма "сила реакции опоры – глубина проникновения шара", полученная экспериментально [8]. Различные цвета отражают различные скорости удара.

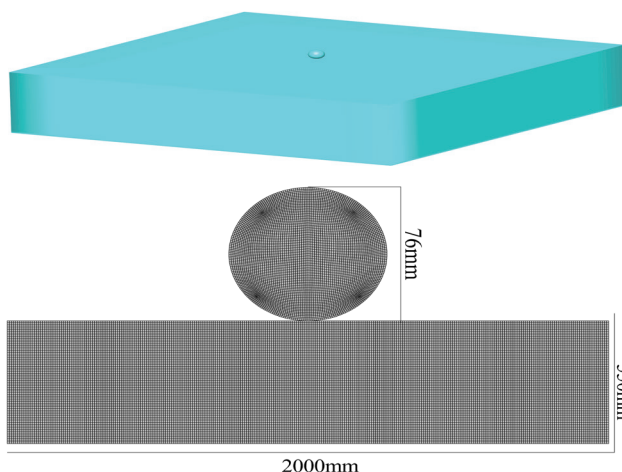


Рис. 2. Область интегрирования: 3D вид (слева) и 2D сечение (справа).

– изотропная линейно упругая модель. Соотношения между тензором напряжений и тензором деформаций задаются законом Гука в форме

$$\sigma = c \varepsilon. \tag{1}$$

Здесь σ – тензор напряжений, ε – тензор деформаций и c – тензор четвёртого ранга упругих постоянных. Механические параметры упругого материала: плотность ρ , модуль Юнга E и модуль Пуассона ν . В матричной форме для трёхмерной задачи система уравнений (1) имеет вид

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix}. \tag{2}$$

Соотношение между модулем Юнга E , модулем Пуассона ν и модулем сдвига G имеет вид

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \tag{3}$$

Упругие свойства материала могут быть также выражены через параметры Ламе λ и μ , или через скорость поперечной волны C_s и скорость продольной волны C_p :

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (4)$$

$$C_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad C_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (5)$$

Второй рассмотренной моделью являлась упругопластическая модель. Для перехода в пластическое состояние используется критерий Мизеса. Это условие может быть выражено в терминах второго инварианта тензора напряжений J_2 как $J_2 = k^2$, где $k = \sigma_y / \sqrt{3}$ и σ_y – значение предела текучести. С вычислительной точки зрения данная модель реализуется дополнительной корректировкой после упругого шага.

Для сокращения времени расчёта за начало расчёта принимался момент подлёта шара к пластине. Полное физическое время расчёта составляло 0.2 с, шаг по времени фиксировался равным 10^{-8} с.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1. УПРУГАЯ МОДЕЛЬ

На первом этапе были проведены расчёты для различных скоростей столкновения при использовании упругой модели. Зависимость от времени наблюдаемых в эксперименте параметров представлена на **Рис. 3**.

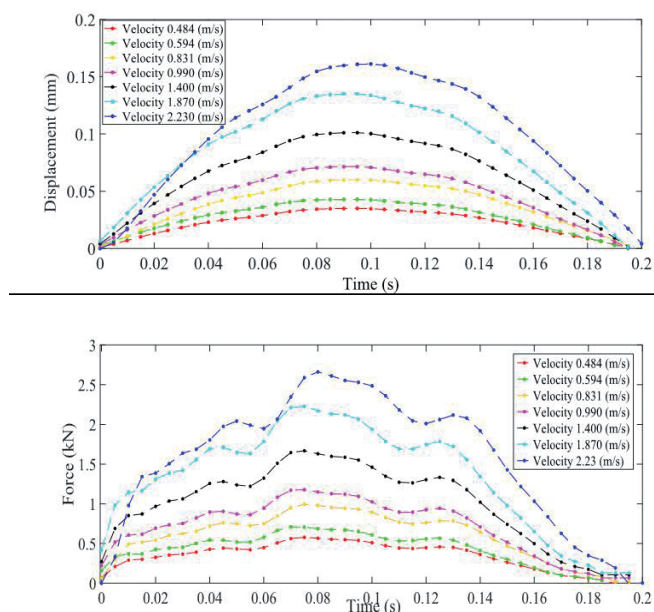


Рис. 3. Зависимость от времени величины смещения (вверху) и силы реакции (внизу). Линейно упругая модель.

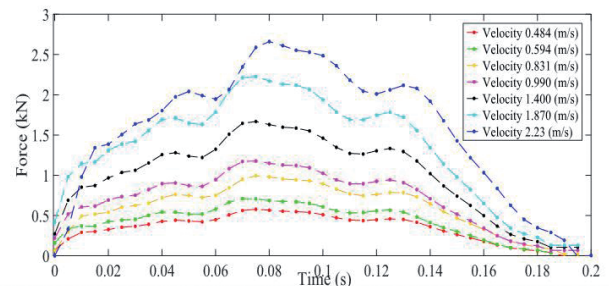


Рис. 4. Диаграмма «сила реакции опоры – глубина проникновения шара», полученная в расчётах. Линейно упругая модель.

По результатам рассчитанных зависимостей были построены диаграммы «сила реакции опоры – глубина проникновения шара» (см. **Рис. 4**). Результаты значительно отличаются от результатов лабораторных экспериментов. Информация о величине максимальных просадок приведена в **Таблице 1**.

Величина смещений и силы реакции опоры значительно зависят от скорости удара. Меньшие скорости приводят к меньшим глубинам проникновения, большие – к большим. Однако, во всех рассмотренных случаях результаты численного моделирования были как минимум в десять раз ниже, чем результаты экспериментов. Кроме того, расчётная величина осадки возвращается к нулевому значению к моменту окончания расчёта. Всё это ясно свидетельствует о том, что изотропная линейно упругая модель не описывает адекватно поведение льда, которое наблюдается в экспериментах.

3.2. УПРУГОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

На втором этапе была использована упругопластическая модель с фиксированным

Таблица 1
Численные и экспериментально [8] максимальные смещения поверхности льда. Линейно упругая модель

Скорость, м/с	Экспериментальные смещения, мм	Расчетные смещения, мм	Отличия, число раз
0.484	0.430	0.040	10.77
0.594	0.507	0.043	11.81
0.831	0.708	0.060	11.80
0.990	0.932	0.072	13.03
1.400	1.341	0.101	13.26
1.870	2.054	0.135	15.20
2.230	2.230	0.161	13.84

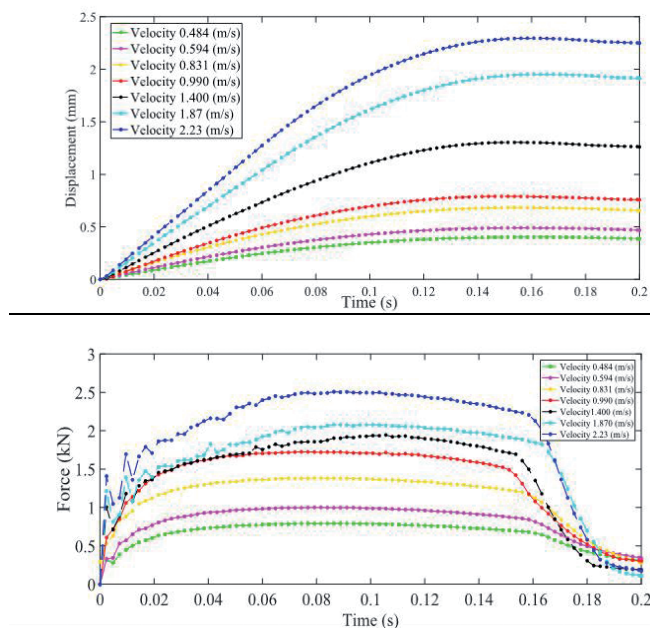


Рис. 5. Зависимость от времени величины смещения (вверху) и силы реакции (внизу). Уругопластическая модель.

значением предела текучести 0.34 МПа. Для тех же самых величин скорости удара временные зависимости наблюдаемых величин представлены на Рис. 5. Обновленные диаграммы приведены на Рис. 6. Явно видно, что теперь для значения скорости в 2.23 м/с отличия достаточно малы.

Для получения лучшего совпадения результатов расчётов с экспериментальными данными в дальнейшем величина предела текучести рассматривалась в качестве свободного параметра (отдельно для каждой скорости удара). На основе многовариантного счёта были выбраны оптимальные значения,

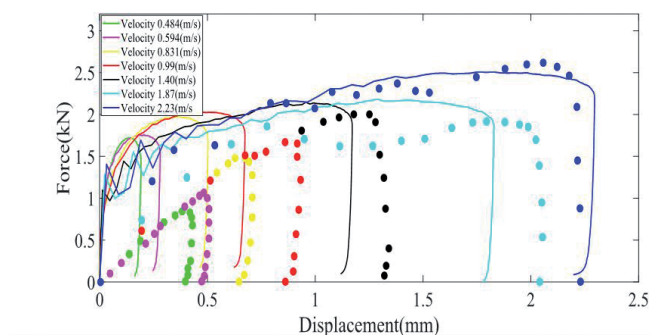


Рис. 6. Диаграмма «сила реакции опоры – глубина проникновения шара», полученная в расчётах. Уругопластическая модель. Значение предела текучести 0.34 МПа.

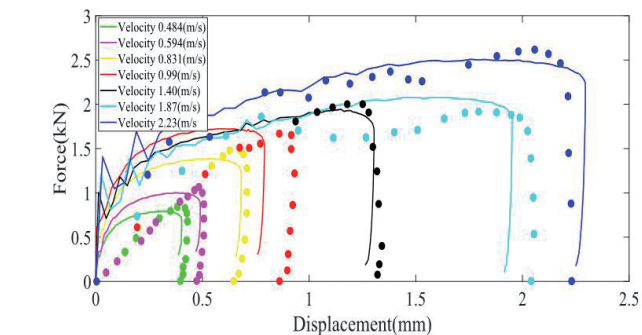


Рис. 7. Диаграмма «сила реакции опоры – глубина проникновения шара», полученная в расчётах. Уругопластическая модель. Оптимальные значения предела текучести.

Таблица 2

Численные и экспериментально [8] максимальные смещения поверхности льда. Уругопластическая модель

Скорость, м/с	Экспериментальные смещения, мм	Расчетные смещения, мм	Отличия, число раз
0.484	0.430	0.403	1.065
0.594	0.507	0.490	1.034
0.831	0.708	0.68	1.036
0.990	0.932	0.790	1.178
1.400	1.341	0.1304	1.027
1.870	2.054	1.952	1.052
2.230	2.230	2.295	0.971

диаграммы для которых представлены на Рис. 7. Информация о величинах осадки представлена в Таблице 2. Эти данные отражают гораздо более близкое совпадение с результатами лабораторных экспериментов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был численно исследован процесс динамического деформирования ледяной пластины при ударе стальным шаром. Две механические модели были использованы для описания реологии льда: изотропная линейно упругая и уругопластическая модели. Сравнение глубины проникновения шара с результатами лабораторных экспериментов было проведено.

Выявлено, что использование упругой модели приводит к значительному занижению максимальной глубины проникновения ударника. Таким образом, использование данной модели для решения практических задач невозможно.

Использование упругопластической модели с фиксированным значением предела текучести для всех скоростей удара не позволяет воспроизвести все кривые нагружения. Использование предела текучести в качестве дополнительного свободного параметра модели позволяет значительно улучшить результат. Возможным объяснением данного эффекта является различие в механизмах неупругого поведения (плавление, микрорастрескивание и пр.) для различных энергий удара. Изучение данного факта должно являться продолжением настоящего исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schwarz J, Weeks W. Engineering properties of sea ice. *Journal of Glaciology*, 1977, 19(81):99-531.
2. Combescure A, Chuzel-Marmot Y, Fabis J. Experimental study of high-velocity impact and fracture of ice. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48(20):2779-2790.
3. Petrovic J. Review mechanical properties of ice and snow. *Journal of materials science*, 2003, 38:1-6.
4. Wenyan M, Yingkui G. Experimental study on mechanical properties of ice. *Proc. AASRI International Conference on Industrial Electronics and Applications*, Atlantis Press, 2015, pp. 192-196.
5. Pernas-Sanchez J, Pedroche D, Varas D, Lopez-Puente J, Zaera R. Numerical modeling of ice behavior under high velocity impacts. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, 49(14):1919-1927.
6. Zhang Y, Wang Q, Oterkus S, Oterkus E, Li J, Han D. Numerical investigation of ice plate fractures upon rigid ball impact. *Ocean Engineering*, 2023, 287:115824.
7. Ince S, Kumar A, Paik J. A new constitutive equation on ice materials. *Ships and Offshore Structures*, 2017, 12(5):610-623.
8. Елифанов В.П. Особенности контактного разрушения льда. *Лёд и снег*, 2020, 60(2):274-284.

Халид Валид

аспирант

Московский физико-технический институт
9, Институтский пер., Долгопрудный 141700,
Московская обл., Россия

E-mail: khalid@phystech.edu

Голубев Василий Иванович

д.ф.-м.н.

Московский физико-технический институт
9, Институтский пер., Долгопрудный 141700,
Московская обл., Россия

E-mail: golubev.vi@mipt.ru

Гусева Евгения Кирилловна

аспирант

Институт проблем механики им. А.Ю.
Ишлинского РАН

101/1, пр-т Вернадского, Москва 119526, Россия

E-mail: guseva.ek@phystech.edu