

УДК 539.3

EDN INIZYQ (<https://elibrary.ru/inizyq>)

DOI 10.33113/mkmk.ras.2025.31.01.10



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОБИТИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗО ЛЬДА И ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН*

Орлов М.Ю., Глазырин В.П., Фазылов Т.В.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия*

АННОТАЦИЯ

В работе приведены результаты численного моделирования процесса разрушения металлических конструкций, содержащих лед, при действии оживального ударника. В конструкции (имитирующей пассивную защиту) тонкие металлические пластины располагались над и подо льдом, как бы защищая и одновременно подпирая его. Количество пластин подо льдом увеличивалось до случая, когда сквозное пробитие становилось невозможным. Рассмотрен лед без фазовых переходов с усредненными физико-механическими характеристиками. Поведение льда моделировалось соотношениями механики сплошных сред на основе феноменологического макроскопического подхода. Использовалась концепция разрушения материалов, основанная на детерминированном подходе. В качестве основного инструмента использован численный метод Г.Р. Джонсона, расчетная часть которого дополнена механизмами расщепления расчетных узлов и разрушения расчетных элементов. Численное моделирование проведено в осесимметричной постановке при помощи некоммерческого программного комплекса «Удар. Осесимметричная задача». Проведены качественные и количественные тесты, а также сделан анализ чувствительности конечно-элементной сетки. Результаты расчетов получены в виде конечных конфигураций «ударник-мишень», графиков и таблиц. Изучены основные закономерности процесса пробития (время зарождения первых очагов разрушения и их эволюция, механизм пробития конструкции и разрушения льда), качественно и количественно оценен уровень остаточной деформации пластин и время процесса. Выявлено, что в процессе разрушения льда доминировал хрупкий механизм, а пробитие конструкций проходило по механизму «прокола». После пробития верхних слоев отмечена только упругая деформация ударника, а после пробития нижних – его пластическая деформация с затуплением и фрагментацией носика. Установлено, что наличие 11 стальных пластин толщиной 1 мм под ледяным блоком привело к полной остановке ударника.

Ключевые слова: лед; модель; численный метод; хрупкое разрушение; пробитие; остаточная деформация

RESEARCH OF IMPACT RESISTANCE OF STRUCTURES COMPOSED OF ICE AND THIN METAL TARGETS IMPACTED BY HIGH-VELOCITY STRIKER

Orlov M.Yu., Glazyrin V.P., Fazylov T.V.

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-29-00187.

ABSTRACT

The paper presents the results of numerical modeling perforation of structures composed ice and thin metal targets and impacted by ogival striker. In research objects (simulating passive protection), thin metal plates were located above and below the ice, as if protecting and simultaneously supporting it. The number of plates under the ice increased until the striker stuck or partial perforation was. Freshwater Ice without phase transitions with averaged physical and mechanical characteristics is considered. Ice was modeled by a complex model of continuum mechanics based on the phenomenological macroscopic approach. The concept of failure of materials, including ice was based on the deterministic approach was used. The numerical method of G.R. Johnson was used as the main tool, into it were incorporated by algorithm splitting the nodes and erosion of triangle elements. Numerical modeling was conducted in an axisymmetric statement using the non-commercial software package "Impact. Axisymmetric Problem". Qualitative and quantitative tests were conducted, and a sensitivity analysis of the finite element mesh was made. The calculation results were obtained in the form of final configurations "striker – targets", graphs and tables. The main regularities of the perforation event (the time of fracture and evolution of cracks, dominated mechanism of perforation) were studied, the level of permanent deformation of all plates was estimated. It was by numerical simulation found that only the brittle mechanism dominated in the ice failure, and the penetration of structures occurred by the "piercing" mechanism. After the perforation of the upper layers, only elastic deformation of the striker was noted, and after the perforation of the lower layers, its plastic deformation with blunting and tip eroded. It was found that 11 mm-steel-plates led to partial penetration of the structure.

Keywords: ice; model; numerical method; brittle fracture; full and partial perforation; permanent deformation of plate

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время лед является объектом интенсивных исследований как в РФ, так и за рубежом. Постоянный интерес различных научных групп вызван необходимостью развития северных территорий, борьбой с ледовыми заторами на сибирских реках, добычей природных ископаемых на Крайнем Севере, разрушением айсбергов при помощи взрыва, созданием защит от микрометеоритов и космического мусора, содержащих лед и ледяные частицы. Успешная реализация проекта Северного Морского Пути также требует углубления научных знаний в области прочностных и механических свойств льда. Недостаточная изученность свойств этого природного материала является одной из сложностей для прогнозирования его поведения при динамических нагрузках. Поэтому все еще актуальны новые физико-математические модели поведения льда и численные методы расчета его напряженно-деформированного и термодинамического состояния.

Известно, что количество полновесных исследовательских работ по данной теме постоянно растёт. В работе [1] при помощи метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH) рассмотрено влияние числа ледяных градин сферической формы, воздействующих на цилиндрическую шарнирно-опертую панель из полимерного композитного материала. При помощи гибридного сеточно-характеристического метода на неструктурированных тетраэдрических сетках проведены трехмерные расчеты разрушения водяного льда и достигнуто хорошее согласие с аналогичными экспериментальными результатами [2]. Методом импульсного рентгенографирования получены диаграммы движения (зависимость глубины внедрения от времени) для процесса соударения

цилиндрических ударников с плоским торцом с ледяными преградами в диапазоне начальных скоростей от 500 до 1500 м/с [3]. Модификация двух математических моделей льда путем дополнения их собственными экспериментальными функциями и константами, а также успешное моделирование процесса соударения низкоскоростного ударников (шарика и составного конуса) с ледяной мишенью приведены в [4]. Обзор применения методов конечных элементов, гидродинамики сглаженных частиц и метода дискретных элементов для задач деформации и хрупкого разрушения льда сделан в [5]. При помощи пакета прикладных программ Reactor 3D проведены численные расчеты процесса соударения одиночного ударника и группы ударников с массивной ледяной мишенью [6]. В работе [7] при помощи численного метода смоделировано взрывное разрушение айсберга с целью предотвращения его столкновения с морскими судами. В работе [8] получены экспериментальные результаты по разрушению тонких, средних и толстых ледяных мишеней при низкоскоростном ударе компактного элемента. Процедура определения откольной прочности льда при соударении компактного ударника с ледяной поверхностью детально описана в [9]. В работе [10] представлена феноменологическая модель разрушения льда, а также проведены физические эксперименты по соударению ледяного цилиндра с алюминиевой преградой. Подробное описание актуальных вычислительных задач применительно для арктических материалов при динамическом нагружении приведены в [11].

Исходя из вышеописанного, можно утверждать, что для прогнозирования поведения льда при ударных и взрывных нагрузках часто используются численные методы как достойная альтернатива дорогостоящему физическому эксперименту. Однако лед является малоизученным природным материалом, поэтому необходимы новые физико-математические модели, критерии разрушения и алгоритмы расчетов, адекватно описывающие его поведение в экстремальных условиях. На взгляд авторов, недостаточное внимание сейчас уделяется металлическим конструкциям, содержащим один либо несколько ледяных блоков в своем составе.

В настоящей работе исследуется поведение конструкций, состоящих из льда и тонких стальных пластин, при действии высокоскоростного оживального ударника. Количество пластин с лицевой стороны ледяного блока было постоянным, а количество слоев под ним увеличивалось до количества, после которого сквозного пробития уже не фиксировалось. Статья построена следующим образом. Описание математической модели и численного метода с анализом чувствительности сетки приведены в разделе 1. В разделе 2 описан ударник и предыдущие и текущие объекты исследования. В разделе 3 представлены результаты расчетов в виде рассчитанных конфигураций ударника и мишени, временных зависимостей скорости ударника, поврежденности материалов, а также сводной таблицы всех результатов расчетов. В последнем разделе изложены выводы.

1. ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ЛЬДА И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА

Физико-математическая модель деформирования и разрушения льда при динамических нагрузках соответствует современным физическим представлениям о его поведении под нагрузкой. Лед описывается упруго-пластической, сжимаемой,

пористой, прочной средой без фазовых переходов с усредненными физико-механическими характеристиками, взятыми из общедоступных источников [12]. Концепция разрушения льда основана на детерминированном подходе с учетом одновременной работы нескольких критериев разрушения. С точки зрения авторов, это позволяет избежать нефизических деформаций и получать картины разрушения, наиболее приближенные к реальным.

В качестве основного инструмента исследований использовался численный лагранжев метод, расчетная часть которого дополнена механизмами расщепления расчетных узлов и разрушения расчетных элементов. Расчеты проведены для двумерного осесимметричного случая при помощи некоммерческого программного комплекса «Удар. Ос.2» с последней модифицированной версией решателя [13].

1.1. Анализ чувствительности сетки.

Тестирование математической модели и алгоритмов расчетов происходило путем решения тестовых задач: о соударении двух одинаковых цилиндров, об ударе цилиндра по жесткой стенке и путем сравнения с результатами баллистических тестов, проведенными в Томском государственном университете [14].

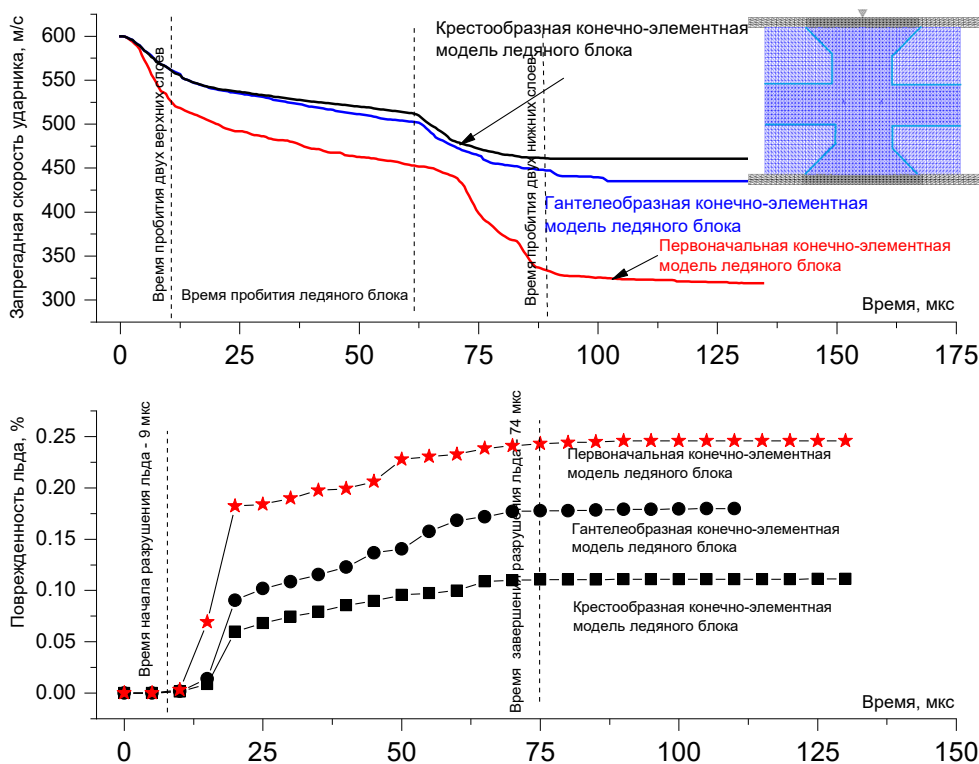


Рис.1. Временные зависимости запреградной скорости ударника и поврежденности, полученные на трех различных конечно-элементных моделях ледяного блока.

Первоначальным этапом проверки был анализ чувствительности расчетной сетки. Мы использовали три конечно-элементных модели ледяного блока как составной части всей исследуемой конструкции. Рассмотрена конструкция, в которой надо льдом и под ним располагалось одинаковое количество пластин. Конечно-элементная модель ударника была аналогична той, которая использовалась в работах [14,15]. Целью серии расчетов являлось достижение

консервативных научных результатов, в том числе морфологии разрушения взаимодействующих тел, а также ряда фундаментальных характеристик процесса. Первая конечно-элементная модель построена в режиме автоматической триангуляции расчетной области и содержала самые большие по размеру элементы. Две следующих модели имели сгущения в области пенетрационного канала и V-образной области в зоне контакта ударника и мишени. Такая область фиксировалась в физическом эксперименте, поэтому место сгущения было выбрано именно там. Исходя из этого они назывались как гантелеобразная и крестообразная области. Фрагмент крестообразной модели приведен на рис.1 в правом верхнем углу.

Также на рис.1 приведены результаты, полученные для трех конечно-элементных моделей. Нетрудно заметить, что достигнут консервативный результат в части времени начала пробития и накопления повреждений льда, при этом кривые на графике позволяют выделить основные этапы пробития конструкции, подтвержденные экспериментально. Наиболее близкие результаты показаны на верхнем графике. С точки зрения экономии вычислительных ресурсов и точности результатов крестообразная конечно-элементная модель ледяного блока является наиболее приемлемой для расчетов. В дальнейшем она использовалась в оригинальной части наших исследований, изложенных ниже.

2. ДИНАМИКА УДАРНИКА ПРИ ПРОБИТИИ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ДВУХ ЛЕДЯНЫХ БЛОКОВ И ТОНКОЙ СТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНОЙ МЕЖДУ НИМИ

Излагаемые ниже исследования были направлены на выявление влияния расположения тонкой стальной пластины, помещенной между двух ледяных цилиндров, против действия оживального ударника [15].

Путем подбора толщины металлических пластин и их расположения (вверху, внизу, посередине ледяного блока) была оценена ударная стойкость конструкции при действии ударника. При обозначении конструкций были указаны толщины металлической пластины и ледяных блоков соответственно. Например, конструкция, состоящая из двух одинаковых ледяных блоков толщиной 20 мм и разделенная тонкой стальной миллиметровой пластиной, обозначалась как (20-мм-Лед+1мм-сталь+20-мм-Лед), соответственно. В качестве ударника рассматривался сердечник немецкой пули Smk, с оживальной головной частью, диаметром 6.1 мм, массой 2.55 г и высотой 16 мм. Материал сердечника – высокопрочная сталь. Начальная скорость составляла 600 м/с.

На рис.2 приведены временные зависимости поврежденности льда (вверху) и запреградной скорости ударника (внизу). Видно, что лед разрушается с первых микросекунд процесса пробития. Вначале процесса все три кривые сливаются в одну. После 50 мкс поврежденность льда для конструкции (20-мм-Лед+1мм-сталь+20-мм-Лед) увеличивается за счет хрупкого разрушения нижнего блока. На нижнем графике изображены типичные кривые скорости ударников для трех вариантов расчетов. Видно, что взаимодействие с пластиной, разделяющей ледяной блок на равные части, проявляется «ступенькой» или резким падением скорости на графике. Итак, для конструкции (10-мм-Лед+1мм-сталь+30-мм-Лед) «ступенька» располагается вначале процесса, а для конструкции (30-мм-Лед+1мм-сталь+10-мм-Лед), наоборот, в конце. Несмотря на такое различие, в конце процесса пробития кривые сближались.

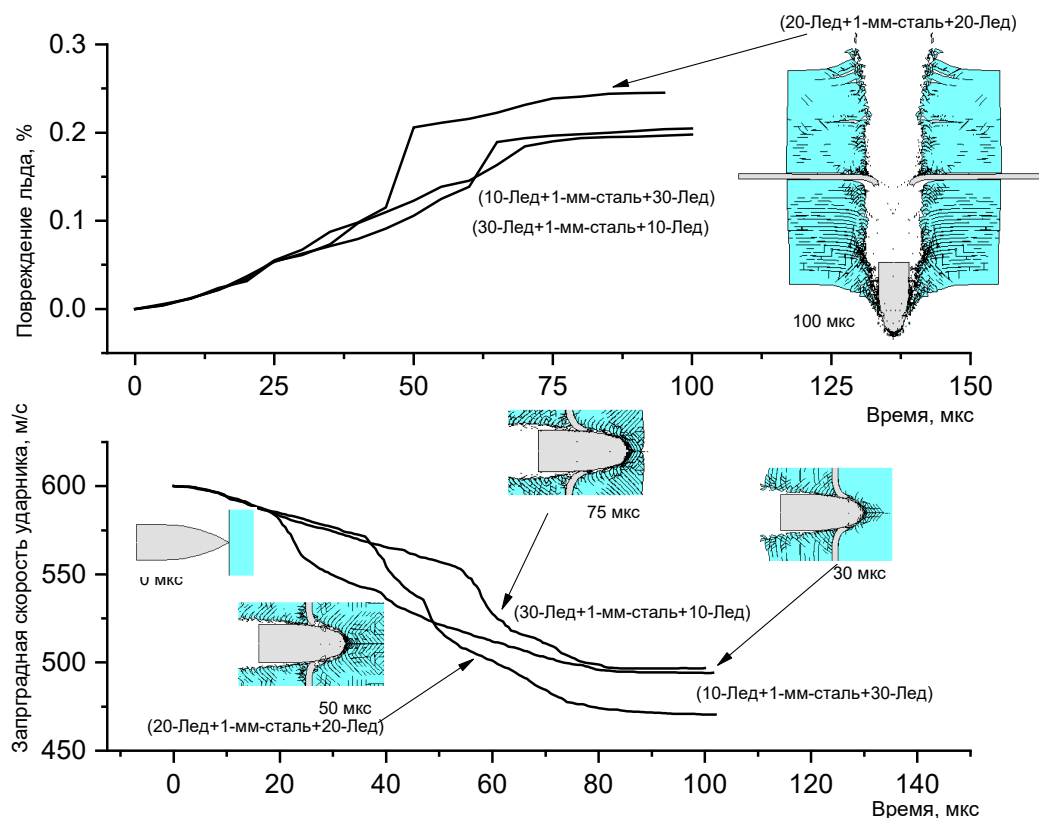


Рис.2. Временные зависимости поврежденности льда и запреградной скорости ударника.

Результаты моделирования позволили рассчитать количество поглощенной энергии в процессе пробития, запреградную скорость ударника, баллистический предел, время процесса пробития и начала зарождения первых очагов разрушения и их распространение внутри ледяного блока и т.п.

Как логическое завершение проведенных исследований был сформулирован дальнейший круг задач. Предложены новые конструкции из льда и тонких металлических пластин как бы «подпирающие» и «защищающие» его. В данной работе они заявлены как новые объекты исследования и описаны ниже.

2.1. Текущие объекты исследования.

Ниже описаны текущие объекты исследований. Всего рассмотрено 11 конструкций, состоящих из ледяного блока размерами в сечении (40×30) мм, помещенного между тонкими стальными пластинами размерами в сечении (1×30) мм. Пластины выполнены из мягкой стали и расположены таким образом, что две верхние из них как бы защищали лед, а нижние, наоборот, как бы подпирали его. Стоит отметить, что вверху всегда находились две пластины без воздушного зазора между ними. Количество пластин подо льдом постоянно увеличивалось до количества, после которого пробитие ударником существенно затруднялось или становилось вовсе невозможным. Последний случай известен в научной литературе как частичное пробитие. Итак, конструкция (2+Лед+5) означала, что над ледяным блоком было 2 стальных пластины, а под ним пять пластин. Аналогично были обозначены остальные конструкции.

На рис.3 приведены исходные конфигурации последней и первой исследуемых конструкций в начальный момент времени.

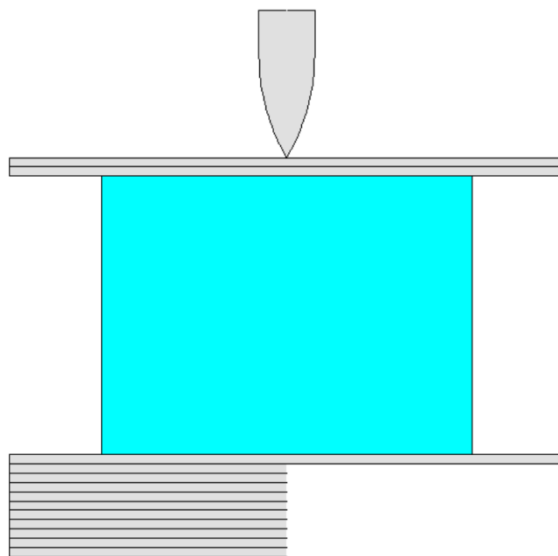


Рис.3. Исходные конфигурации текущих объектов исследования; левая часть рисунка изображает поперечное сечение конструкции (2+Лед+11), а правая – (2+Лед+1).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ПРОБИТИЯ КОНСТРУКЦИЙ, СОДЕРЖАЩИХ ЛЕД И ТОНКИЕ СТАЛЬНЫЕ ПЛАСТИНЫ

В данном разделе приведены результаты численного моделирования процесса пробития всех одиннадцати преграды. В процессе счета анализировались деформационные картины и области разрушения льда, определено время начала разрушения льда, зарождения в нем трещин и их эволюция. Были определены форма пенетрационного канала внутри ледяного блока и установлен доминирующий тип разрушения льда, а также механизм пробития верхних и нижних пластин.

Верхний ряд на рис.4 иллюстрирует пробитие верхних слоев преграды, а также нижних слоев исследуемых конструкций. Видно, что пробитие происходит по механизму прокалывания с небольшим деформированием и разрушением носика ударника. Ниже на рисунке представлена картина разрушения верхних слоев преграды для конструкции (2+Лед+1). В рамках используемой модели можно заключить, что доминирующим механизмом разрушения льда являлся хрупкий механизм. Это подтверждается многочисленными трещинами во льду, ориентированными под различным углом к оси симметрии. Видно, что после выхода ударника из преграды лед фрагментируется.

Расчеты показывают, что диаметр пробоины практически равен диаметру ударника в его цилиндрической части. Далее можно видеть пенетрационный канал в ледяном блоке для варианта расчета (2+Лед+9). Установлено, что пенетрационный канал имел V-образную форму до момента его полного разрушения. На самом нижнем ряду изображены пластины для варианта расчетов (2+Лед+10). Как и в предыдущем случае, можно отметить существенную остаточную деформацию слоев и сформировавшиеся воздушные зазоры между пластинами. Отмечено, что образовавшийся воздушный зазор между верхними слоями всегда был больше, чем между нижними.

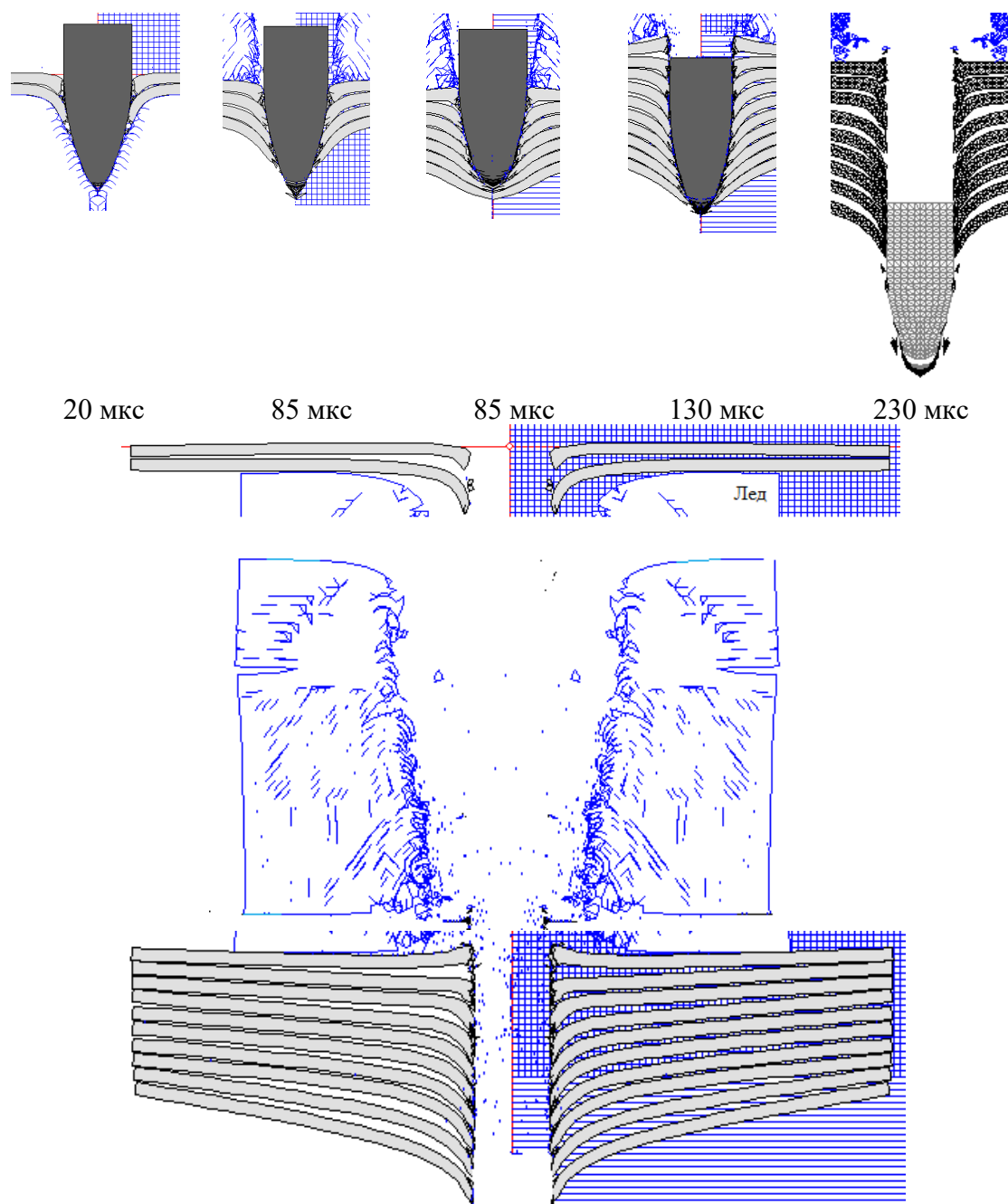


Рис.4. Результаты расчетов процесса пробития преград. Верхний ряд слева направо: фрагмент рассчитанной конфигурации ударник-мишень для конструкции (2+Лед+1), (2+Лед+4), (2+Лед+7), (2+Лед+10) и (2+Лед+9). Второй ряд сверху: верхние пластины после перфорации. Третий ряд сверху: ледяной блок после перфорации ударником преграды (2+Лед+9). Нижний ряд: нижние пластины после перфорирования. Цена деления 0.05 см.

Далее, проанализируем временные зависимости запреградной скорости ударника (рис.5). Запреградная скорость ударника рассчитывается как скорость его центра масс и в настоящее время является важной характеристикой процессов пробития и проникания. Кривые скорости отражают всю динамику процесса, включая взаимодействие ударника с тонкими стальными пластинами, находящимися подо льдом.

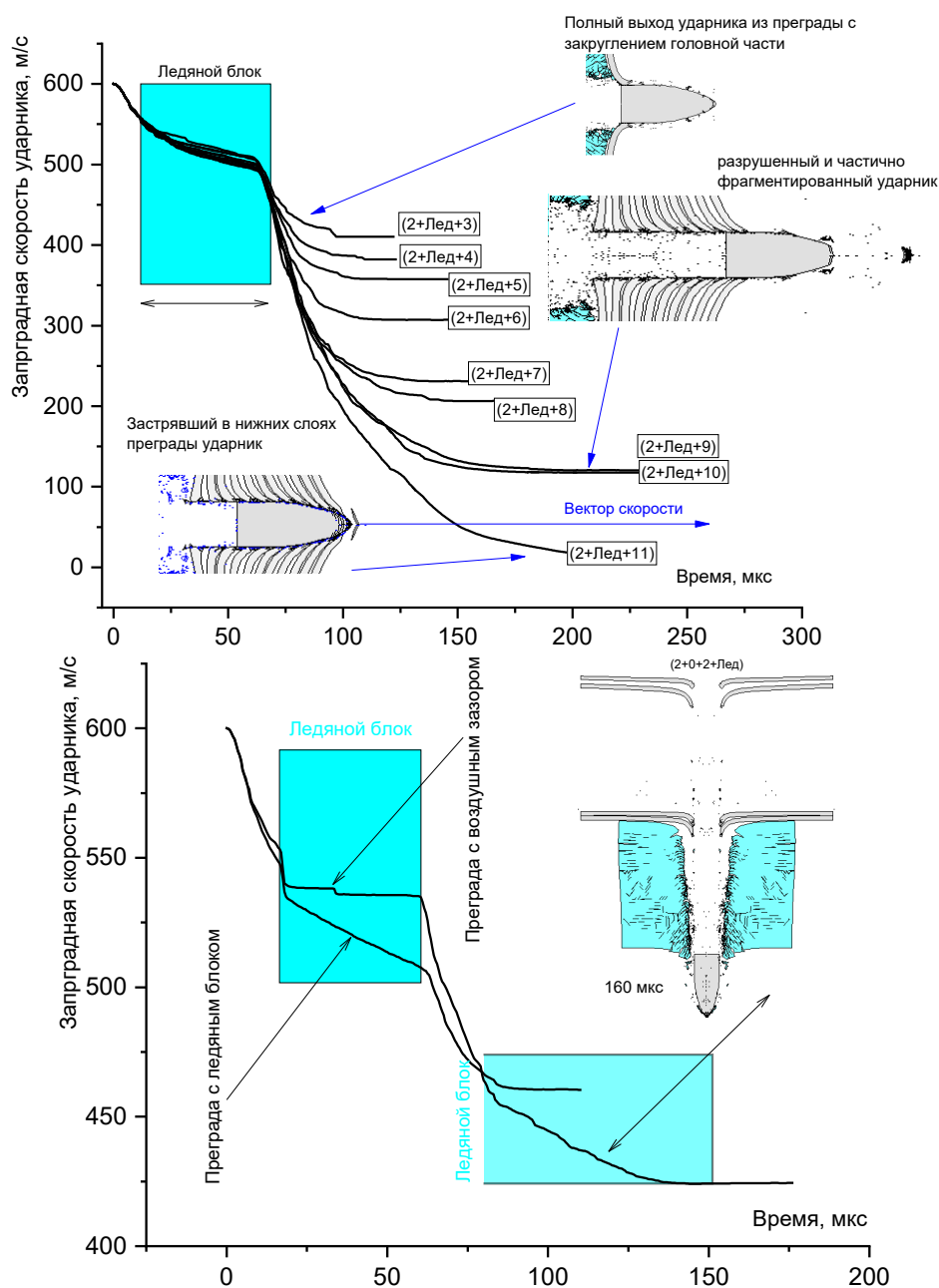


Рис.5. Временные зависимости скорости ударника. Вверху изображены кривые скорости для преград без воздушного зазора. Внизу изображены кривые скорости для преграды с воздушным зазором и ледяным блоком.

На верхнем графике приведены 11 кривых для конструкций, содержащих лед между пластинами. Видно, что скорость резко падает уже на первых микросекундах взаимодействия. После перфорирования двух верхних слоев, ударник взаимодействует с ледяным блоком приблизительно до 60 мкс. Потом носик ударника начинает взаимодействовать с нижними слоями преграды, что приводит к более резкому падению скорости. В зависимости от количества пластин подо льдом, величина падения скорости возрастает. В конце процесса пробития кривые скорости становятся параллельными оси абсцисс. В реальности, это соответствует выходу ударника из конструкции.

Специально для изучения движения ударника во льду были проведены дополнительные расчеты, в которых ледяной блок помещался под нижними

слоями. Две кривые относятся к варианту расчетов (2+Лед+2) и (2+0+2+Лед). Индекс «0» означал воздушный зазор между верхними и нижними пластинами, которых в данном случае было по две. Видно, что когда ледяная среда заменялась воздушной, кривая скорости была параллельна оси абсцисс. В том случае, когда ударник перфорировал лед, кривая его скорости имела небольшой угол наклона к ней.

Далее проанализировано развитие поврежденности льда и движение тыльной поверхности слоев. На рис.6 вверху показана эволюция повреждения льда для каждого варианта расчета.

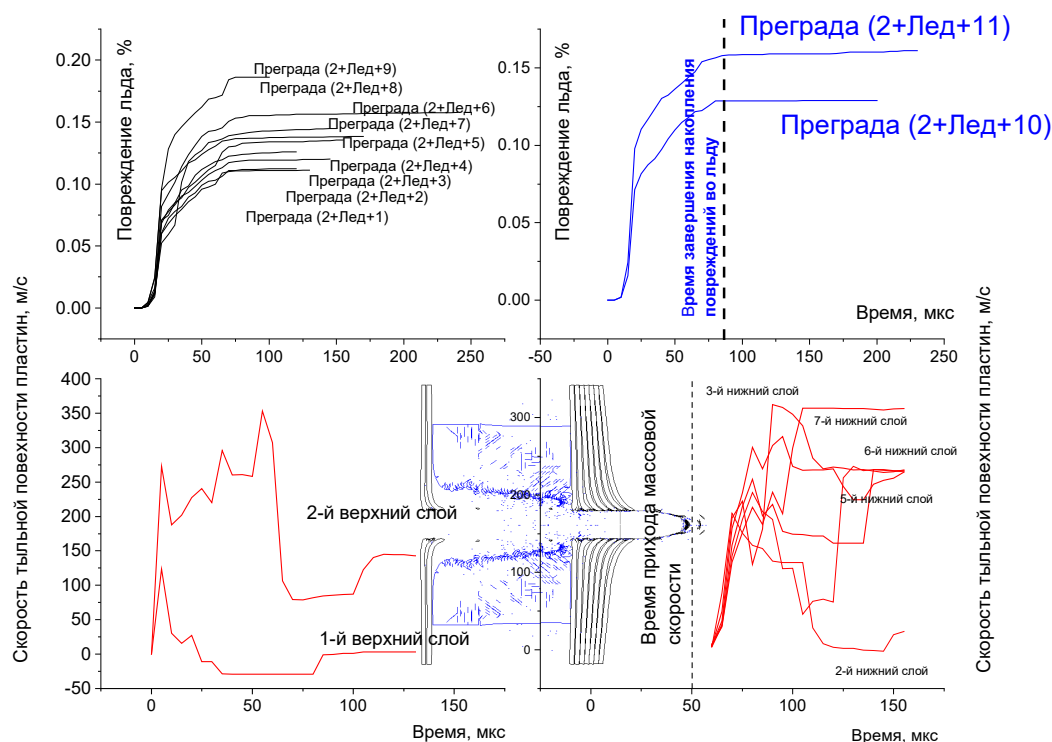


Рис.6. Результаты расчетов: поврежденность льда от времени; поврежденность льда от времени для случаев (2+Лед+10) и (2+Лед+10); временная зависимость скорости тыльной поверхности для верхних слоев конструкции; временные зависимости скорости тыльной поверхности некоторых нижнем слоев.

В целом, мы наблюдали такой же процесс при глубоком внедрении компактных ударников в лед [14]. Увеличение количества тонких пластин под ледяным блоком незначительно увеличивало объем его повреждений. Кривые поврежденности позволяют выявить процесс начала разрушения ледяных блоков и его окончание. Согласно расчетным данным, процесс разрушения льда начинался на 8 мкс, а полностью завершился уже на 80 мкс. Временные зависимости скорости тыльной поверхности пластин для преграды (2+Лед+7) приведены на нижних графиках. Видно, что тыльная скорость второго верхнего и второго нижнего слоя стремится к нулю. Кривые скорости на графике имели особенности, вызванные взаимодействием слоев внутри конструкции в процессе пробития. Необходимо отметить, что график отражает процесс взаимодействия только до 150 мкс.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В Таблице 1 приведены результаты расчетов серии вычислительных экспериментов. Получены численные значения времени пробития конструкции в целом, запреградной скорости ударника, энергии поглощения ударника, диаметров пробоин в верхних и нижних пластинах, поврежденности всех материалов, а также приведена качественная оценка уровня остаточной деформации пластин.

Таблица 1.

Результаты расчетов процесса пробития конструкций, содержащих лед и тонкие стальные пластины.

Обозначение конструкции-преграды	Время пробития, мкс	Запреградная скорость, м/с	Энергия поглощения, Дж	Диаметры пробоин в верхней преграде		Уровень пластической деформации верхних слоев	Максимальный диаметр в нижних пластинах, мм	Уровень пластической деформации нижних слоев	Поврежденность материалов		
				Диаметр пробоины в первой верхней пластине, мм	Диаметр пробоины во второй верхней пластине, мм				Поврежденность льда, %	Поврежденность всех стальных пластин, %	Поврежденность ударника, %
(2+лед+1)	105	459	190.4	6.6	8.4	Средний	6.1/1	Средний	16.87	5.2	1.2
(2+лед+2)	108	450	200	6.5	6.5		6.32/1		12.28	5.7	1.7
(2+лед+3)	115	410	244	6.15	6.15		6.46/2		11.22	5.5	2.1
(2+лед+4)	120	383	271	6.74	7.22		6.4/1		12.59	5.9	2.1
(2+лед+5)	125	357	296.5	6.64	6.36		6.2/3		12.00	5.4	2.3
(2+лед+6)	138	307	339	6.66	6.72		6.15/2		14.48	4.7	2.4
(2+лед+7)	150	231	390.9	6.62	6.14		6.4/1		13.54	5.3	2.7
(2+лед+8)	164	206	404.8	6.58	6.15		6.35/2		13.83	5.1	3.1
(2+лед+9)	215	117	441.5	7.04	6.76	Средний	6.25/4	Высокий	15.70	5.1	3.9
(2+лед+10)	230	120	440.6	6.58	7.64		6.3/2		16.10	5.0	2.6
(2+лед+11)	250	17	458.6	6.68	6.48	Высокий	6.25/1	Средний	12.89	4.6	3.7

Внимание! под полным временем пробития следует считать время выхода ударника из конструкции, т.е. когда задняя часть ударника достигнет тыльной поверхности нижней пластины. В последней строчке приведены максимальные диаметры пробоин, которые фиксировались в нижних пластинах. Значение в знаменателе означает номер пластины.

Видно, что время пробития конструкций увеличивалось с увеличением количества пластин подо льдом и изменялось от 105 мкс до 250 мкс. В последнем и предпоследнем вариантах оно составляло 230 мкс и 250 мкс, соответственно. Запреградная скорость ударника, наоборот, уменьшалась с ростом количества пластин подо льдом. После пробития конструкции (2+Лед+1) она составляла почти 460 м/с, а в процессе пробития преграды (2+Лед+11) она составила 17 м/с

(на момент времени 250 мкс). Как было ранее отмечено, в последнем варианте произошло частичное проникание ударника без сквозного пробития всей конструкции. Рассчитанные значения энергии абсорбции (поглощения) изменялись от 190 Дж до 458 Дж. Видно, что в случае частичного пробития конструкции затрачено почти 460 Дж, что является максимальной величиной. Рассчитанные значения диаметров пробоин в верхних пластинах показали, что их величина была близка к исходному диаметру ударника. Больших различий между полученными значениями диаметра пробоины в верхней и нижней пластинах не обнаружено. Однако выявлена связь между остаточной деформацией слоев и диаметрами пробития в верхних слоях. Анализ процесса пробития позволил качественно оценить уровень пластической деформации верхних слоев. Диаметры пробоин в нижних слоях по своим размерам слабо отличались от диаметров пробоин в верхних слоях. Расчетным путем установлено, что максимальный диаметр зафиксирован в слоях, которые были расположены ближе к ледяному блоку. Объем поврежденного льда был больше чем сумма объемов повреждений в ударнике и пластинах. Это можно связать с доминирующим хрупким механизмом разрушения льда. Максимальный объем разрушений во льду был почти в 5 раз больше, чем максимальный объем разрушений в преградах. Как и следовало ожидать, объем разрушений во льду увеличивался с увеличением количества пластин подо льдом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ научно-технической литературы указывает на недостаток полновесных работ, связанных с пробитием высокоскоростным ударником конструкций, содержащих лед и металлические пластины. Можно предположить, что лед и композиты, сделанные на его основе, вполне могут применяться в качестве защитных конструкций. В Томском государственном университете более десяти лет ведутся систематические научные исследования, предметом изучения которых является отклик льда на динамические нагрузки. В настоящей работе объектами исследования были конструкции, содержащие ледяной блок, расположенный между тонкими пластинами из мягкой стали. Лед описывался упруго-пластической моделью механики сплошных сред с учетом свойств прочности, пористости, сжимаемости. Концепция разрушения основана на детерминированном подходе к описанию разрушения. Расчеты проведены при помощи численного лагранжева метода, расчетная часть которого дополнена механизмами расщепления расчетных узлов и разрушения расчетных элементов. Проведены тестовые расчеты, в результате которых определены основные физико-механические характеристики льда и добавлены в библиотеку материалов разработанного программного комплекса. Проведен анализ чувствительности сетки, в результате которого предложена наиболее эффективная (с точки зрения экономии вычислительных ресурсов) конечно-элементная модель ледяного блока. Результаты исследований позволили получить ряд интегральных характеристик процесса пробития, включая диаметр пробоин в пластинах, время пробития и запреградную скорость ударника. Установлено, что наличие 11 стальных пластин, толщиной 1 мм, под ледяным блоком привело к полной остановке оживального ударника. При доминирующем хрупком разрушении льда, пробитие пластин происходило по механизму прокалывания.

ОБОЗНАЧЕНИЯ:

6.1Smk – сердечник немецкой пули, диаметром 6.1 мм.

Предыдущие объекты исследования

(20-мм-Лед+1мм-сталь+20-мм-Лед) – предыдущий объект исследования – конструкция, состоящая из двух ледяных блоков (20×20) мм, разделенными миллиметровой стальной пластиной;

(10-мм-Лед+1мм-сталь+30-мм-Лед) – предыдущий объект исследования, состоящий из двух ледяных блоков размерами (10×20) мм и (30×20) мм соответственно;

(30-мм-Лед+1мм-сталь+10-мм-Лед) – предыдущий объект исследования, являющийся, по сути, перевернутым предыдущим, и состоящий из двух ледяных блоков размерами (30×20) мм и (10×20) мм соответственно.

Дополнительный объект исследования

(2+0+2+Лед) – дополнительный объект исследования, который не включен в серию численных экспериментов, изложенных в разделе 3. В данной конструкции ледяной блок находился под нижними слоями. Таким образом, между стальными пластинами был воздушный зазор, по высоте равный ледяному блоку.

Текущие объекты исследования

(2+Лед+1) – первый текущий объект исследования. Конструкция, содержащая ледяной блок размерами в сечении (40×30) мм и тонкие стальные пластины. Надо льдом располагались две пластины размерами (1×40) мм, а подо льдом только одна;

(2+Лед+11) – последний (одиннадцатый) объект исследования. Надо льдом располагались две пластины, а под ним – одиннадцать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В., Занина Э.А. *Численный анализ воздействия града на панель из углепластика* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2024. – Т.30. – №3. – С.387-399.
2. Shigaev N.O., Beklemysheva K.A. *Numerical Modeling of Water Ice Impact Destruction* / 23rd International Conference “Mathematical Modeling and Supercomputer Technologies” (MMST 2023). – Cham: Springer, 2024. – Pp.253-265.
3. Герасимов С.И. и др. *Исследование пробития ледовой преграды цилиндрическим ударником* // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. – 2020. – Т.9. – №2. – С.95-99.
4. Глазова Е.Г., Крылов С.В., Чекмарев Д.Т. *Численное моделирование удара ледяной сферы о преграду* // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. – 2020. – Т.162. – №2. – С.137-147.
5. Гриневич Д.В., Бузник В.М., Нужный Г.А. *Обзор применения численных методов для моделирования деформации и разрушения льда* // Труды ВИАМ. – 2020. – №8(90). – С.109-122.
6. Краус Е.И., Мельников А.Ю., Фомин В.М., Шабалин И.И. *Пробитие ледяных преград конечной толщины стальными ударниками* // Прикладная механика и техническая физика. – 2019. – Т.60. – №3. – С.146-153.
7. Favorskaya A., Khokhlov N. *Icebergs Explosions for Prevention of Offshore Collision: Computer Simulation and Analysis* / Proceedings of the 12th KES

International Conference on Intelligent Decision Technologies (KES-IDT 2020). – Singapore: Springer, 2020. – Pp.201-210.

8. Yiheng Z., Renwei L., Lihao Y. et al *Ice breaking by low-velocity impact with a rigid sphere* // Intern. J. of Impact Engineering. – 2023. – Vol.182. – 104786.
9. Sherburn J., Horstemeyer M. *Hydrodynamic modeling of impact craters in ice* // Intern. J. of Impact Engineering. – 2010. – Vol.37(1). – Pp. 27-36.
10. Carney K., Benson D., DuBois P., Lee R. *A phenomenological high strain rate model with failure for ice* // Intern. Journal of Solids and Structures. – 2006. – Vol.43(25-26). – Pp.7820-7839.
11. Петров И.Б. *Проблемы моделирования природных и антропогенных процессов в Арктической зоне Российской Федерации* // Математическое моделирование. – 2018. – Т.30. – №7. – С.103-136.
12. Богородский В.В., Гаврило В.П. *Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии.* – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 383 с.
13. Орлов Ю.Н., Глазырин В.П., Орлов М.Ю. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Удар-ОС1. Ударно-волновое нагружение конструкций. Осесимметричная задача».* №2010610911 от 28.01.2010.
14. Орлов М.Ю., Глазырин В.П., Орлов Ю.Н. *Исследование разрушения льда при ударных и взрывных нагрузках* / VIII Всероссийская научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2018». Сборник трудов. – Томск: Изд-во Красное знамя, 2008. – С.23-26.
15. Orlov M.Y., Glazyrin V.P., Orlova Y.N. *Impact Resistance of Design Composed of Ice Block and Thin Metal Plate Impacted by High-Velocity Ogival Projectile* / Proceedings of the XII All Russian Scientific Conference on Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics (CICMCM 2023). – Singapore: Springer, 2024. – Pp.225-233.

REFERENCES

1. Medvedsky A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V., Zanina E.A. *Chislennyj analiz vozdejstviya grada na panel' iz ugleplastika [Numerical Analysis of Hail Impact on Carbon Fiber Reinforced Plastic Panel]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2024, Vol.30, No.3, Pp.387-399.
2. Shigaev N.O., Beklemysheva K.A. *Numerical Modeling of Water Ice Impact Destruction*. 23rd International Conference “Mathematical Modeling and Supercomputer Technologies” (MMST 2023). Cham: Springer, 2024, Pp.253-265.
3. Gerasimov S.I., Zubankov A.V., Krivosheev O.V., Kalmykov A.P., Kapinos S.A., Glukhov A.A., Pisetsky V.V., Gerasimova R.V. *Issledovanie probitiya ledovoj pregrady tsilindricheskim udarnikom [Study of the Penetration of a Cylindrical Striker through an Ice Barrier]*. Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta MIFI, 2020, Vol.9, No.2, Pp.95-99.
4. Glazova E.G., Krylov S.V., Chekmarev D.T. *Chislennoe modelirovanie udara ledyanoy sfery o pregradu [Numerical simulation of the ice sphere impact onto the barrier]*. Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskie nauki, 2020, Vol.162, No.2, Pp.137-147.
5. Grinevich D.V., Buznik V.M., Nuzhny G.A. *Obzor primeneniya chislennykh metodov dlya modelirovaniya deformatsii i razrusheniya l'da [Review of the application of numerical methods for modeling ice deformation and destruction]*. Trudy VIAM, 2020, No.8(90), Pp.109-122.

6. Kraus E.I., Melnikov A.Y., Fomin V.M. et al. *Penetration of Steel Projectiles through Finite-Thickness Ice Targets*. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2019, Vol.60, Pp.526-532.
7. Favorskaya A., Khokhlov N. *Icebergs Explosions for Prevention of Offshore Collision: Computer Simulation and Analysis* / Proceedings of the 12th KES International Conference on Intelligent Decision Technologies (KES-IDT 2020), Singapore, Springer, 2020, Pp.201-210.
8. Yiheng Z., Renwei L., Lihao Y. et al *Ice breaking by low-velocity impact with a rigid sphere*. International Journal of Impact Engineering, 2023, Vol.182, 104786.
9. Sherburn J., Horstemeyer M. *Hydrodynamic modeling of impact craters in ice*. International Journal of Impact Engineering, 2010, Vol.37(1), Pp.27-36.
10. Carney K., Benson D., DuBois P., Lee R. *A phenomenological high strain rate model with failure for ice*. International Journal of Solids and Structures, 2006, Vol.43(25-26), Pp.7820-7839.
11. Petrov Ig. *Problemy modelirovaniya prirodnykh i antropogennykh protsessov v Arkticheskoy zone Rossijskoj Federatsii [Problems of simulation of natural and anthropogenous processes in the Arctic zone of the Russian Federation]*. Matematicheskoe modelirovanie, 2018, Vol.30, No.7, Pp.103-136.
12. Bogorodskiy V.V., Gavrilov V.P. *Led. Fizicheskie svoystva. Sovremennye metody glyatsiologii [Ice. Physical properties. Modern methods of glaciology]*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1980, 383 p.
13. Orlov Yu.N., Glazyrin V.P., Orlov M.Yu. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii programmy dlya EhVM "Udar-OSI. Udarno-volnovoe nagruzhenie konstruksij. Osesimmetrichnaya zadacha" [Certificate of state registration of the computer program "Udar-OSI. Shock-wave loading of structures. Axisymmetric problem"]*. No.2010610911 ot 28.01.2010.
14. Orlov M.Yu., Glazyrin V.P., Orlov Yu.N. *Issledovanie razrusheniya l'da pri udarnykh i vzryvnykh nagruzkakh [Study of ice destruction under impact and explosive loads]*. VIII Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya "Aktual'nye problemy sovremennoj mekhaniki sploshnykh sred i nebesnoj mekhaniki – 2018". Sbornik trudov. Tomsk, Izdatel'stvo Krasnoe znamya, 2008, Pp.23-26.
15. Orlov M.Y., Glazyrin V.P., Orlova Y.N. *Impact Resistance of Design Composed of Ice Block and Thin Metal Plate Impacted by High-Velocity Ogival Projectile*. Proceedings of the XII All Russian Scientific Conference on Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics (CICMCM 2023). Singapore, Springer, 2024, Pp.225-233.

Поступила в редакцию 11 декабря 2024 года.

Сведения об авторах:

Орлов Максим Юрьевич – к.ф.-м.н., с.н.с., Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия; e-mail: orloff_m@mail.ru
Глазырин Виктор Парфирович – д.ф.-м.н., зав.лаб., Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия; e-mail: glvp@list.ru
Фазылов Талгат Вадимович – асп., Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия; e-mail: talgat505@gmail.com