

КОМПЛЕКСНОЕ ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЛЬДА

канд. физ.-мат. наук Ю.Н. ОРЛОВ, канд. физ.-мат. наук М.Ю. ОРЛОВ
Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск,
e-mail: orloff_m@mail.ru,

Представлены результаты исследования процессов динамического нагружения поликристаллического льда. Разработаны физико-математическая модель поведения льда при ударно-взрывных нагрузках и численный метод расчета напряженно-деформированного состояния с учетом эволюции деформационных картин и областей его разрушения. Проведены натурные эксперименты по взрыву речного льда зарядом взрывчатого вещества (ВВ) в полиэтиленовой оболочке. Проведен лабораторный эксперимент по соударению сферического ударника с ледяными преградами. Численно решена задача о внедрении стального сферического ударника в лед при низких скоростях.

Ключевые слова: лед, эксперимент, взрыв, расчет, майна, деформация, разрушение.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время поисковые научно-исследовательские работы по изучению поведения льда при динамических нагрузках являются крайне актуальными. Это объясняется необходимостью развития транспортных связей в северных регионах нашей страны, увеличением добычи природных ископаемых в Заполярье, постоянной борьбой с ледовыми заторами на сибирских реках, отработкой ракетного вооружения в ледяных пустынях Арктики, разработкой новых видов защит летательных аппаратов от микрометеоритов и частиц космического мусора.

Основная сложность исследований определена в прошлом веке Ф. Мальгредом, С. Канн, Н. Маэно, В. Богородским и др. и заключается в том, что такой древнейший природный материал, как лед (сегодня известно более 15 его разновидностей), мало изучен в условиях динамического нагружения. Прежде всего это объясняется его сложной внутренней структурой, особенностями кристаллической решетки, аномальными пластическими свойствами, многократными фазовыми переходами в процессе деформирования и т.д. С точки зрения разрушения лед вообще может не иметь аналогов. Проблемы прочности и разрушения таких тел только начинают разрабатываться, поэтому картина разрушения льда при динамических нагрузках остается мало изученной (Трайд, 1983).

Анализ научно-технической и патентной литературы указывает на необходимость разработки физико-математических моделей поведения льда при ударно-взрывных нагрузках. В настоящее время, согласно публикационной активности, наиболее известной моделью следует считать феноменологическую модель, созданную в

Национальном космическом агентстве США (Carney, 2006). Однако модель имеет ряд недостатков, указанных самими авторами, и к тому же привязана к определенным баллистическим экспериментам. Учитывая сложную структуру льда, скудную экспериментальную базу (некоторые экспериментальные данные вообще не согласуются между собой), отсутствие моделей разрушения льда, можно утверждать, что адекватной физико-математической модели поведения льда при динамических нагрузках все еще нет.

Целью работы являлось комплексное экспериментально-теоретическое исследование процессов разрушения льда при динамическом нагружении. В плане экспериментальных исследований изучено состояние заснеженного и бесснежного ледяных покровов после подрыва в воде эмульсионного ВВ, а также процесс соударения сферического ударника с ледяными цилиндрами в дозвуковом диапазоне скоростей удара. Теоретически исследованы процесс взрывного нагружения однофазного льда зарядом ВВ и процесс нормального соударения сферического ударника в диапазоне до 325 м/с.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Ежегодно по ледовой тематике выходит более 1400 статей (данные Всемирной сети Интернет), однако полноценных работ по исследованию ударно-волнового и взрывного нагружения льда значительно меньше. При этом количество исследований за рубежом на порядок больше, чем в нашей стране. Ситуация осложняется отсутствием государственной поддержки исследований и возобновлением американской программы “SCICEX”, в рамках которой идет сбор научных данных новейшими надводными и подводными средствами военно-морского флота. Об этом факте неоднократно было упомянуто, в том числе в (Орлов и др., 2013).

Очевидно, что через некоторое время отставание российских научных коллективов в этом направлении будет еще заметней и от некоторых важнейших ледовых проектов придется отказаться вовсе. Поэтому необходимо создавать новые модели поведения льда при динамическом нагружении и, как альтернативу эксперименту, развивать численные методы расчета напряженно-деформированного состояния льда с учетом эволюции деформационных картин и областей разрушения. Необходимы надежные экспериментальные данные по ударно-волновому и взрывному нагружению льда для апробации разрабатываемых средств математического моделирования.

В НИИ прикладной математики и механики Томского госуниверситета более 25 лет ведутся поисковые научно-исследовательские работы по исследованию динамического нагружения льда. Модифицирована физико-математическая модель поведения льда при ударно-волновых и взрывных нагрузках. Разработан численный метод расчета его напряженно-деформированного состояния с учетом фрагментарного разрушения, а также накоплены научные данные (теоретические и экспериментальные) о поведении льда при ударе и взрыве (Глазырин и др., 2008; Горельский и др., 2012; Глазова и др., 2013).

Создание физико-математической модели деформирования и разрушения льда является крайне сложной научно-технической задачей. В НИИ прикладной математики и механики по инициативе авторов организована мобильная лаборатория «Взрывное разрушение природных материалов», объектом исследования которой является пресноводный лед. За последние три года проведены более 10 экспедиций, и как следствие появилась возможность создания одноименной реляционной базы данных. Разрабатываемая база данных должна стать основой для выявления некоторых

механизмов и закономерностей процесса взрывного нагружения льда и апробации новых методов математического моделирования.

ПЕРВЫЕ ИТОГИ РАБОТЫ МОБИЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ «ВЗРЫВНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ»

Два года назад были проведены первые натурные испытания по взрывному нагружению речного льда. Эксперименты совпали с весенними противопоаводковыми мероприятиями МЧС на реке Томи. Экспериментальная площадка выбрана практически на фарватере реки Томи в районе коммунального моста. При первичном осмотре дефектов ледяного покрова (полыньи и разводьев) в радиусе 5 м не обнаружено. Глубина реки в данном месте более 7 м, а ширина около 500 м. Течение воды не являлось значительным. Температура воды +4 °С. Объект исследования — речной лед средней толщины.

На рис. 1 показаны результаты натурных испытаний весной 2013 г. Диаметр лунки для закладки ВВ получился 16 см. В качестве ВВ использовался заряд Эмуласт АС-30-ФП-90 в полиэтиленовой оболочке (тротиловый эквивалент по теплоте взрыва 0,82). Заглубление в воду незначительное. Масса ВВ составляла 4 кг, длина заряда 70 см. Подрыв ВВ осуществлялся в воде при помощи детонирующего шнура ДШЭ-12 ГОСТ 6196-78 по классической схеме. Ледяной покров в районе экспериментальной площадки был заснеженным, толщина снега не менее 10 см. Толщина льда составила 80 см.

Лунка для закладки эмульсионного ВВ изображена на рис. 1а. На рис. 1б показана взрывная майна на расстоянии ~ 6 м. Фотографии сделаны научным сотрудником НИИ ПММ Г.Н. Богомолковым со спасательного катера через 10 минут после взрыва. Отметим, что в радиусе нескольких метров были замечены крупные фракции льда размерами в поперечном сечении 65–75 см. Внутри майны присутствовал мокрый снег и небольшие осколки льда. Вода была видна невооруженным глазом. На поверхности ледяного покрова возле майны образовалась горка высотой ~ 35 см. Радиальных трещин, распространяющихся от эпицентра взрыва в разные направления, на поверхности льда не обнаружено. Качественно был оценен радиус выброса осколков льда, который составил около 5 м. Не исключено, что небольшие куски льда под действием продуктов детонации были выброшены значительно дальше.

На рис. 2 показаны результаты прошлогодних натурных испытаний по взрыву льда. Диаметр лунки равнялся 11 см, а масса эмульсионного ВВ составила 8 кг (использовались два заряда по 4 кг каждый). Объект исследования — бесснежный ледяной покров, толщиной 70 см. Площадка для эксперимента выбрана за городом практически в центре реки. Схема эксперимента не менялась.



Рис. 1. Эксперимент по взрыву речного льда: а — диаметр до взрыва; б — взрывная майна на расстоянии 6 м; в — измерение диаметра майны после взрыва.

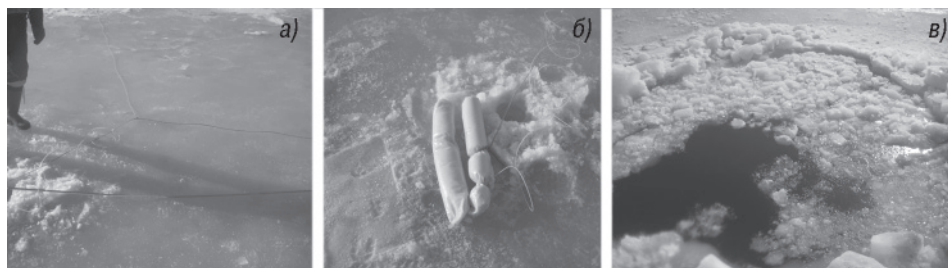


Рис. 2. Эксперимент по взрыву речного льда в 2014 г.: *а* – место будущей майны; *б* — ледяной покров до взрыва; *в* — образовавшаяся после взрыва майна.

На рис. 2*а* показано место будущей майны. Рис. 2*б* иллюстрирует состояние ледяного покрова до взрыва (фото сделано со спасательного катера). После взрыва во льду образовалась майна диаметром 400–430 см, напоминающая форму окружности (рис. 2*в*). Продуктами детонации образовано большое число маленьких осколков льда, которые можно наблюдать внутри и рядом с майной. Больших фрагментов льда (более 100 см) обнаружено не было. Радиус выброса осколков был больше, чем при подрыве заснеженного льда. Радиальных трещин на поверхности ледяного покрова также выявлено не было.

Сопоставляя результаты экспериментов, можно заключить следующее. Из-за оттепели в первом эксперименте лед более пористый, поэтому наблюдалась одна картина разрушений. В первом случае взрыв сопровождался образованием незначительного количества осколков льда. Во втором случае речной лед был менее пористый, а его прочностные характеристики несколько выше. Поэтому картины разрушений отличались и преобладало хрупкое разрушение. В результате действия продуктов детонации образовывалось множество фракций льда, среди которых отмечены небольшие осколки (15 см). В обоих экспериментах форма взрывной майны была близка к окружности. Состояние кромки льда также отличалось.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Описание поведения льда при динамических нагрузках проводится с позиции феноменологической макроскопической теории механики сплошных сред на основе фундаментальных законов сохранения. Лед моделировался упруго-пластической, пористой, сжимаемой средой с учетом свойств прочности, ударно-волновых явлений и фрагментарного разрушения. Упруго-пластическое течение задается уравнениями Прандтля–Рейса при условии текучести Мизеса. Уравнение состояния было определено функцией Уолша, его основным достоинством является широкая доступность фигурирующих в нем постоянных. Действие взрывного нагружения задается в приближении модели мгновенной детонации заряда взрывчатого вещества (ВВ). Уравнение состояния продуктов детонации описывается политропой Ландау–Станюковича (Орленко, 2014).

В расчетах лед был однофазным, с усредненными физико-механическими характеристиками, взятыми из общедоступной литературы (Богородский, 1980). Основные физико-механические характеристики льда были следующие: начальная плотность $\rho_0 = 0,92$ г/см³, скорость звука $C_0 = 3020$ м/с, модуль сдвига $G = 3,2$ ГПа, предел текучести $\sigma_t = 0,022$ ГПа, откольная прочность $\sigma_k = 0,01$ ГПа, удельная работа

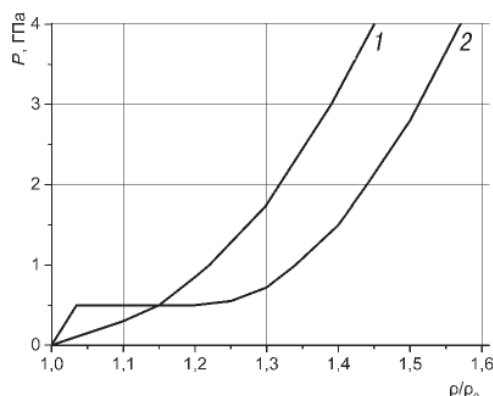


Рис. 3. Ударная адиабата воды и льда: 1 — вода, 2 — лед.

сдвиговых пластических деформаций $A_p = 0,5$ кДж/кг, эквивалентная пластическая деформация $\varepsilon_{eq} = 2,0$.

Уравнение состояния льда принято в виде:

$$P(\rho) = B(\rho/\rho_0 - 1)(\rho/\rho_0)^2,$$

где $B = 8,4$ ГПа, $\rho_0 = 0,92$ г/см³.

Уравнение состояния воды в виде полинома:

$$P(\rho) = 0,0225(\rho/\rho_0 - 1) + 0,085(\rho/\rho_0 - 1)^2.$$

На рис. 3 приведена ударная адиабата воды и льда. Ударная адиабата воды близка к графику степенной функции, причем после достижения относительной плотностью значения 1,35 кривые становятся параллельными.

В качестве основного инструмента исследований использовался численный лагранжев метод, расчетная часть которого дополнена механизмами расщепления расчетных узлов и разрушения расчетных элементов. Оригинальность метода заключается в новом способе выделения поверхностей разрывов сплошности материалов, который не накладывает серьезных ограничений на решение современных динамических много-контактных задач механики деформируемого твердого тела. Модель разрушения льда является детерминированной, допускает появление новых свободных поверхностей и совместное образование разрушений по типу отрыва и сдвига (Герасимов и др., 2007).

Достоверность результатов численного моделирования установлена путем решения ряда тестовых задач и сравнением с известным аналитическим решением, а также экспериментальными данными. Экспериментальные данные были получены на уникальном баллистическом стенде с высокоточными приборами регистрации в НИИ прикладной математики и механики. Отдельные эксперименты специально были проведены в ЦНИИ им. А.Н. Крылова (Санкт-Петербург). В лабораторном эксперименте исследован процесс внедрения стальной сферы в лед в дозвуковом диапазоне. Сравнение результатов лабораторного и численного экспериментов свидетельствует в пользу разработанного численного метода расчетов (Глазырин и др., 2008).

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЛЬДА

Для более детального изучения процесса взрывного нагружения льда был смоделирован натуральный эксперимент, проведенный в 2013 г. Объект исследования —



Рис. 4. Численное моделирование подрыва льда, расположенного на водной подложке. Толщина льда 80 см, масса закладки ВВ 4 кг. Размер майны $d \sim 210$ см.

a — исходная конечно-элементная модель системы «Лед – ВВ – Вода»; *б* — текущая конфигурация системы «Лед – ВВ – Вода», $t = 5$ мс; *в* — конечная конфигурация системы «Лед – ВВ – Вода», $t = 10,7$ мс.

ледяная преграда толщиной 80 см, расположенная на водной подложке. Взрывчатое вещество с необходимыми параметрами помещалось непосредственно подо льдом.

На рис. 4 изображены расчетные конфигурации подрыва льда в моменты времени 0, 5 и 10,7 мс. На этих изображениях видно, что наиболее обширные разрушения при взрывном нагружении происходят на свободной поверхности льда. Эти разрушения вызваны растягивающими напряжениями, возникающими при выходе волны сжатия на поверхность льда. Образовавшаяся майна (полынья) размером примерно 210 см. Размер этот приблизительный. Точность определяется размером расчетных элементов, так как отрывные разрушения происходят по границе элементов. В данном разбиении поперечное сечение элементов составило 10×10 см.

На рис. 5а приведен график распределения скорости свободной поверхности льда в радиальном направлении для двух моментов времени. В момент времени 1 мс график гладкий, скорость плавно меняется от максимальной на куполе (105 м/с) до нуля на периферии. В момент времени 10,7 мс график кусочно-непрерывный. Такой эффект получается от того, что лед в процессе деформации отламывается кусками, по мере того как возникают разрушающие напряжения. Каждый кусок теряет связь с соседней областью, но сохраняет приобретенную им до этого скорость. В свою очередь оставшийся лед до момента разрушения продолжает тормозиться соседними областями. В итоге получается именно такое распределение скоростей.

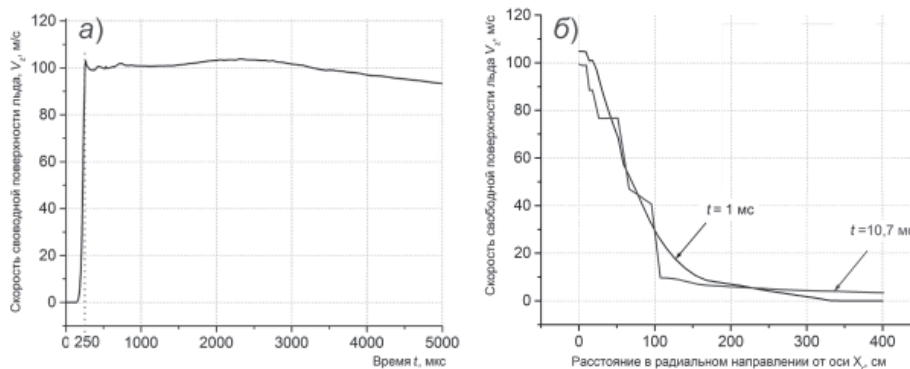


Рис. 5. Распределение скорости поверхности льда: *a* — распределение осевой скорости поверхности льда в радиальном направлении для моментов времени 1 и 10,7 мс; *б* — изменение осевой скорости льда во времени в центре купола.

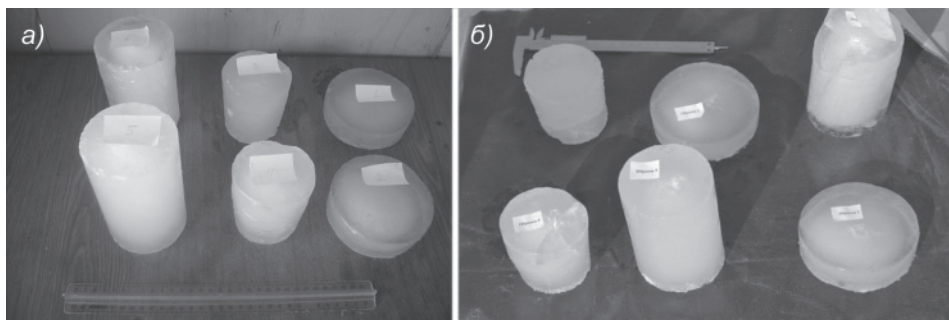


Рис. 6. Ледяные цилиндры до (а) и после (б) соударения.

На рис. 5б приведен график скорости осевой точки свободной поверхности льда, т.е. точки на вершине купола, образованного взрывом. В момент времени 250 мкс эта точка приобретает скорость, равную примерно 105 м/с и впоследствии практически не изменяющуюся. Расхождение между результатами натурного и вычислительного экспериментов составило не более 5 % (Орлова, 2014).

Далее проведен лабораторный эксперимент по соударению сферического ударника с ледяным цилиндром. Для проведения физического эксперимента были подготовлены шесть цилиндров льда, которые получались путем заморозки пресной воды в естественных условиях при температуре $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение более 72 ч. Объектами исследования являлись цилиндры с разной высотой и диаметром (рис. 6). В качестве ударника были выбран стальной шарик с медной оболочкой диаметром 4,5 мм. Начальная скорость ударника составляла 155 ± 5 м/с, масса — 3,55 г. Процесс взаимодействия проходил по нормали. В процессе эксперимента фиксировались глубина внедрения ударника и диаметр кратера. Отметим, что кратер имел форму усеченного конуса, вершина которого располагалась ближе к тыльной поверхности. Во всех экспериментах процесс кратерообразования сопровождался выбросом льда с лицевой поверхности цилиндра. Диаметр откольной тарелки измерен не был. После удара во льду присутствовали кольцевые трещины отрыва, при этом лед разрушался только в области контакта с «ударник – мишень» независимо от высоты цилиндра.

Результаты проведенных экспериментов по соударению сферического ударника с ледяными цилиндрами приведены в табл. 1. При проведении эксперимента образец № 3 был разрушен.

Установлена следующая закономерность процесса внедрения сферического ударника. Полученная глубина кратера была почти в 2 раза больше, чем первоначальная.

Таблица 1

Результаты лабораторных экспериментов

Номер образца	Диаметр цилиндра, мм	Высота цилиндра, мм	Глубина кратера, мм	Диаметр кратера, мм
1	114,5	38,4	7,9	17,5
2	114,5	42	8,4	16,0
3	78,6	93	–	–
4	78,6	92,1	8,1	15,0
5	86,3	140,3	8,2	19,0
6	84,0	135,4	8,1	18,0

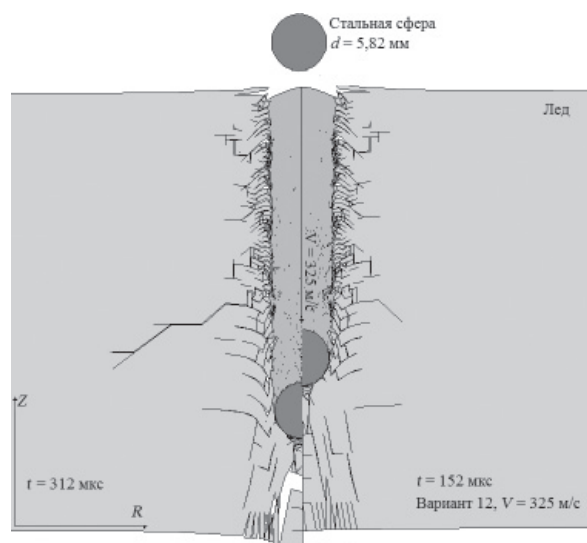


Рис. 7. Расчитанные конфигурации «сферический ударник – ледяной блок» для моментов времени 312 мкс (слева) и 152 мкс (справа).

чальный диаметр ударника. Диаметр образовавшегося во льду кратера был почти в 3 раза больше, чем диаметр ударника.

Далее предпринята попытка смоделировать процесс соударения компактного ударника со льдом с целью детального изучения процесса разрушения льда. Физическая постановка задачи о внедрении ударника в поликристаллический лед формулируется как контактное взаимодействие сферического ударника с ледяным цилиндром. Диаметр сферы $d = 5,82$ мм. Материал ударника — сталь ШХ-15. Преграда — ледяной цилиндр (диаметр 60 мм, высота 45 мм). Серия вычислительных экспериментов состояла из 12 вариантов, в каждом последующем начальная скорость удара V_0 увеличивалась на 25 м/с. Диапазон изменения начальной скорости варьировался от 50 до 325 м/с. На контактной границе ударника и преграды задано условие скольжения. Расчеты проведены в осесимметричном случае при помощи специально разработанной в Томском госуниверситете программы для ЭВМ (10).

Детальный анализ процесса внедрения сферического ударника в лед позволил выявить следующие закономерности (рис. 7). Первые очаги разрушения начинают формироваться во льду в зоне контакта «ударник – мишень» уже на первой микросекунде. Отмечено уплотнение льда в этой области. В процессе внедрения зона разрушений распространяется в осевом направлении от лицевой поверхности к тыльной. Очаги разрушения зарождались в виде косых трещин под углом 45° к оси симметрии. Практически во всех вариантах на оси симметрии очаги разрушения сливались в магистральную трещину, длина которой составила 20 мм. Выявлено, что сферический ударник большую часть процесса внедрялся в ослабленный растягивающими напряжениями лед. В последних вариантах картина разрушения льда несколько меняется, в нем образовывается «пробка» и уже две магистральные трещины.

Семейство кривых на рис. 8 иллюстрирует зависимость глубины внедрения сферического ударника от времени. Выявлено, что с ростом начальной скорости удара увеличивается время внедрения ударника, причем в двух последних вариантах

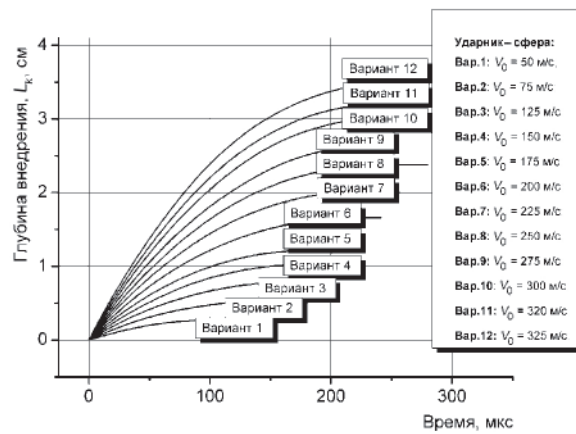


Рис. 8. Временные зависимости глубины внедрения сферы.

оно было примерно одинаковым. Увеличивается угол наклона между осью абсцисс и касательной в точке начала координат. Зависимость глубины внедрения ударника от времени вполне можно аппроксимировать степенной функцией.

На рис. 9 показаны графические зависимости поврежденности льда от времени. Параметр поврежденности для количественной оценки поврежденности материала впервые предложен в (Глазырин, 2008). Выявлено, что в первых трех вариантах развитие разрушений во льду протекало вплоть до 60 мкс. Почти на всех кривых поврежденности обнаружена «ступенька», наибольшая высота которой была зафиксирована в последних двух вариантах.

Проведенные расчеты, представленные в табл. 2, позволили сформулировать следующие выводы. Процесс внедрения проходил без разрушения материала ударника. Характер временной зависимости скорости ударника был близок к линейному. Время процесса внедрения сферического ударника составило около 300 мкс. Глубина внедрения ударника постоянно увеличивалась и в трех последних вариантах превысила радиус ледяной преграды. Процесс развития разрушений во льду отмечен в

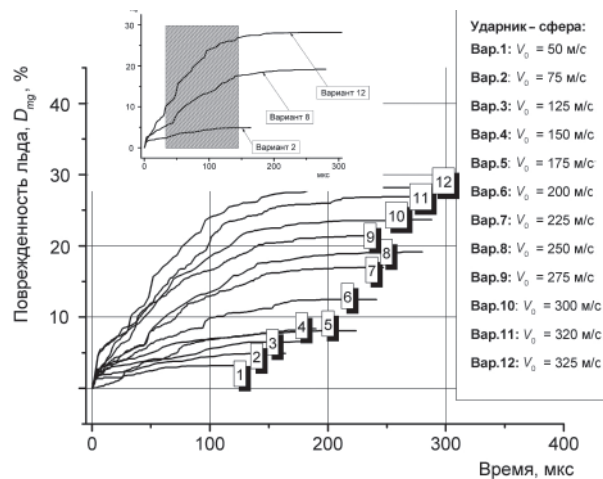


Рис. 9. Временная зависимость поврежденности льда.

Таблица 2

Результаты процесса внедрения компактных ударников в лед

Номер варианта	V_0 , м/с	t_k , мкс	L_k , мм	D_{mg} , %	Откол	
					лицевой	тыльный
1	50	118	2,8	3,20	–	–
2	75	139	5,4	4,91	–	–
3	100	185	8,0	6,55	–	–
4	125	200	10,4	8,0	–	–
5	150	216	12,9	8,35	–	–
6	175	241	16,6	12,47	–	–
7	200	255	20,3	16,98	–	–
8	225	272	23,8	19,15	–	–
9	250	281	26,7	21,37	–	–
10	275	295	30,5	23,67	–	–
11	300	301	32,7	26,86	+	+
12	325	313	35,9	28,10	+	+

основном на начальных стадиях процесса внедрения. В двух последних вариантах зафиксированы лицевой и тыльный отколы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные комплексные теоретико-экспериментальные исследования по динамическому нагружению льда позволили сделать следующие выводы. В настоящее время адекватные физико-математические модели поведения льда все еще разрабатываются. Основная сложность, скорее всего, связана с отсутствием надежных экспериментальных данных о процессах разрушения и сложной внутренней структуре этого древнейшего природного материала. На базе НИИ прикладной математики и механики организована мобильная лаборатория «Взрывное разрушение природных материалов», основной целью которой является экспресс-анализ разрушения льда при динамическом нагружении. При подрыве эмульсионного ВВ во льду образуется майна, по форме близкая к окружности. Проведены натурные испытания по подрыву эмульсионного ВВ в воде под заснеженным и бесснежным ледяными покровами. Численно смоделирован первый натурный эксперимент, и детально воспроизведен процесс разрушения льда. Лед описывается однофазной упруго-пластической, пористой средой с учетом свойств прочности, ударно-волновых явлений и совместного образования отрывных и сдвиговых разрушений. Действие продуктов детонации задается политропой Ландау–Станюковича. Проведены лабораторные эксперименты по соударению сферического ударника с ледяными цилиндрами. Изучен процесс соударения сферического ударника с ледяной преградой в дозвуковом диапазоне начальных скоростей, и выявлены основные закономерности процесса разрушения.

Авторы выражают благодарность главному инженеру ОАО «КузбассСпецВзрыв» А.Н. Садохину за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-08-00509а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 383 с.

Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Крылов С.В., Повереннов Е.Ю. Численное моделирование удара и проникания в мерзлый грунт, покрытый снегом // Проблемы прочности и пластичности. 2014. Т. 76. № 3. С. 235–242.

Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю. Разрушение льда при ударном и взрывном нагружении // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13. Спец. Вып. Ч. 1. С. 425–432.

Горельский В.А., Коняев А.А., Толкачев В.Ф. Моделирование глубины проникания ударников в пресный лед при температуре -25°C // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Полярная механика-2013». Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. С. 21–22.

Орлов М.Ю., Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Садохин А.Н., Богомолов Г.Н. Комплексное теоретико-экспериментальное исследование поведения поликристаллического льда при динамических нагрузках. Ч. 1. Эксперименты по ударно-взрывному нагружению пресноводного льда. Расчет процесса взрывного нагружения системы «Лед – ВВ – Вода» // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2013. Вып. 2 (13). С. 98–112.

Орлова Ю.Н. Комплексное теоретико-экспериментальное исследование поведения льда при ударных и взрывных нагрузках: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2014. 155 с.

Орлов Ю.Н., Глазырин В.П., Орлов М.Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010610911 от 28.01.2010 «Удар-ОС1. Ударно-волновое нагружение конструкций. Осесимметричная задача».

Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / Под редакцией А.В. Герасимова, Томск.: Изд-во ТГУ, 2007. 572 с.

Физика взрыва / Науч. ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, перераб. М.: Физматлит, 2002. Т. 1. 832 с.

Физика и механика льда / Под ред. П. Трюде. М.: Мир, 1983. 352 с.

Carney K.S., Benson D. J., DuBois P., Lee R. A phenomenological high strain rate model with failure for ice // International Journal of Solids and Structures. 2006. Vol. 43. P. 7820–7839.

ORLOV M. YU., ORLOV YU. N.

COMPLEX THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF DYNAMIC LOADING OF POLYCRYSTALLINE ICE

The research of dynamic loading of ice are presented. Physical and mathematical model of the behavior of ice under shock loads explosive and a numerical method for calculating the stress-strain state ice have been developed. Full-scale experiments on the destruction of the annual river ice explosive charge in water was conducted. Laboratory experiment on impact of the spherical impactor with ice barriers is made. The task of the penetration of the spherical steel impactor into ice was solved.

Keywords: ice, experiment, explosion, calculation, lane, deformation, destruction.