

УДК 539.3

DOI 10.17223/19988621/38/10

Ю.Н. Орлова, М.Ю. Орлов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ ЛЬДА¹

Представлены результаты комплексных теоретико-экспериментальных исследований по взрывному нагружению льда. Описана физико-математическая модель деформирования и разрушения льда при взрывных нагрузках. Приведены результаты натурных испытаний по взрывному нагружению речного льда эмульсионным зарядом взрывчатого вещества (ВВ). Проведены параметрические исследования разрушения льда в зависимости от глубины закладки ВВ. Получены рекомендации по более эффективному разрушению льда с учетом влияния слоя воды.

Ключевые слова: лед, модель, метод, расчет, эксперимент, взрыв, взрывчатое вещество, деформация, разрушение.

Актуальность исследований поведения льда при взрывных нагрузках в настоящее время не вызывает сомнений. Российская Федерация входит в пятерку «ледовых» стран, поэтому существует необходимость в развитии транспортных связей и проектировании портов в замерзающих морях Крайнего Севера, а также увеличении добычи природных ископаемых в районах вечной мерзлоты. Острой проблемой все еще стоит образование весенних заторов на сибирских реках, длина которых достигает более 150 километров. Основная сложность исследований определена в прошлом веке в работах Мальгрема, Канна, Маэно, Богородского и заключается в том, что такой древнейший природный материал, как лед (сегодня известно более 15 его разновидностей), мало изучен в условиях динамического нагружения [1]. Это объясняется 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.

В России нет такой государственной поддержки «ледовых» исследований, как, в США, где совместно с военно-морскими силами возобновлена программа «SCISEX», в рамках которой идет сбор научных данных с помощью новейших надводных и подводных средств. В Англии протестирован Зонд «Penetrator», способный внедряться в толстые массивы льда без повреждения высокоточного оборудования, установленного внутри. Разработка опытного образца была бы невозможна без знания прочностных свойств льда [2].

В НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета постоянно ведутся поисковые научные исследования процесса динамического нагружения льда: разработана физико-математическая модель деформирования и разрушения льда при ударных и взрывных нагрузках, численный метод расчета его напряженно-деформированного и термодинамического состояния с учетом разрушения на фрагменты, обобщены теоретические и экспериментальные результаты. По инициативе сотрудников лаборатории прочности неоднократно

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (код проекта 13-08-00509а).

были организованы экспедиции с целью проведения натурных испытаний по взрывному нагружению льда и других природных материалов. На территории Западно-Сибирского федерального округа проведено более 10 экспедиций и подорвано более 10 000 кг взрывчатки в тротиловом эквиваленте. Целью данной работы явилось теоретико-экспериментальное исследование поведения льда при взрывных нагрузках с целью получения новых знаний о его поведении при данных условиях.

Экспериментальное исследование взрывного разрушения льда эмульсионным ВВ

В апреле 2015 г. проведены натурные испытания по подрыву пресноводного льда штатным эмульсионным ВВ Эмуласт АС-30 ФП. Начальная плотность $1,34 \text{ г/см}^3$, скорость детонации 4700 м/с. Масса заряда ВВ – 4 кг. Эксперимент проведен совместно с ОАО «КузбассСпецВзрыв» и МЧС РФ по ТО в рамках ежегодных противопоаводковых мероприятий. Объект исследования – заснеженный ледяной покров. Первичный осмотр экспериментальной площадки показал, что лед имел сэндвич-структуру: снег (55 см) + шуга (20 см) + монолитный лед (50 см). Экспериментальная площадка выбрана почти в середине реки. Визуально установлено, что ледяной покров был ровным. Течение воды незначительное. В радиусе 500 м обнаружен торос, а полыньи и разводьев не было. Температура воздуха -1°C . Накануне эксперимента шел мокрый снег. Согласно метеоданным, зима была относительно теплая, аномально низкой температуры (-45°C) отмечено не было.

Ниже представлены результаты последней экспедиции, в результате которой подорвано более 1500 кг в тротиловом эквиваленте. Первые фотографии получены через 5 минут после подрыва ВВ со спасательного катера. Исследовано 6 лунок до и после взрыва. В первые две лунки помещали по два заряда ВВ в полиэтиленовой оболочке, а в остальные – по одному. На рис. 1, а зафиксировано состояние ледяного покрова до подрыва и некоторые компоненты ВВ. На рис. 1, б, в показана лунка в заснеженном ледяном покрове с погруженным в воду зарядом ВВ. Рис. 1, г иллюстрирует состояние ледяного покрова после подрыва первой лунки. Видно, что во льду сформировалась майна, по форме близкая к окружности. Диаметр составил около 3,5 м. При последующем детальном осмотре кромка льда оказалась довольно развитой.

Физико-математическая модель поведения льда при взрывном нагружении

Описание поведения льда при динамических нагрузках проводится с позиции феноменологической макроскопической теории механики сплошных сред на основе фундаментальных законов сохранения. Лед моделировался упругопластической пористой сжимаемой средой с учетом свойств прочности, ударно-волновых явлений, а также совместного образования разрушений по типу отрыва и сдвига. Упругопластическое течение описывается уравнениями Прандтля – Рейса при условии текучести Мизеса. Уравнение состояния выбрано в форме Уолша.

Уравнение состояния льда принято в виде

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

где $B = 8.4 \text{ ГПа}$, $\rho_0 = 0.92 \text{ г/см}^3$.

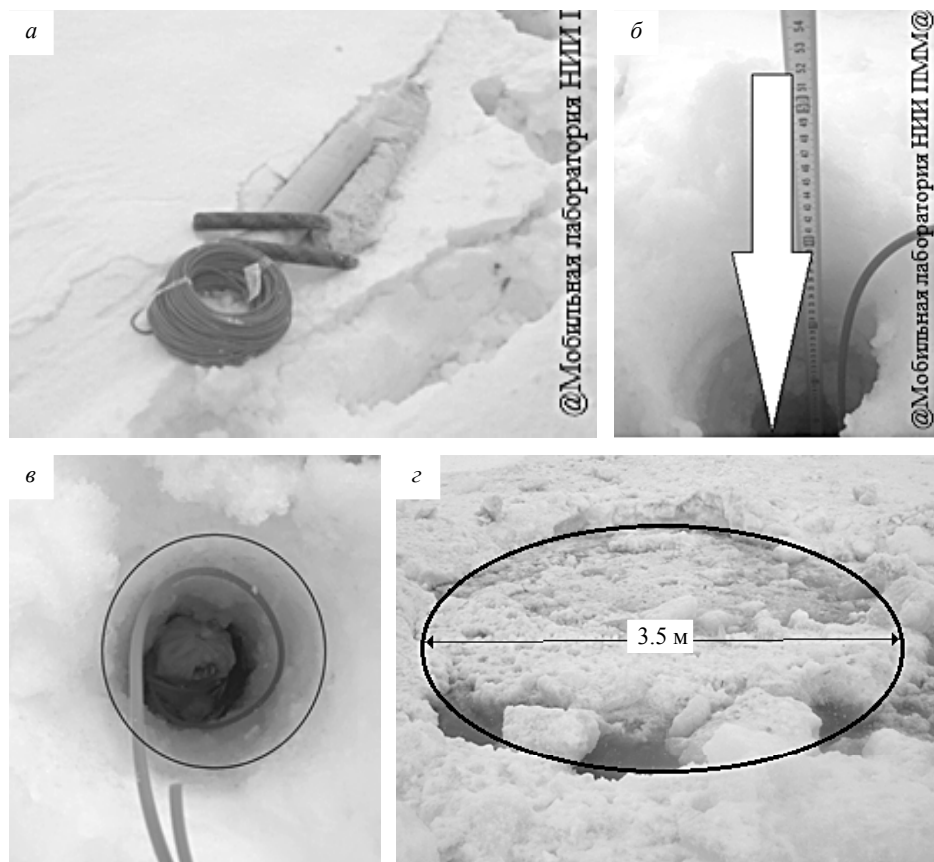


Рис. 1. Натурные испытания по подрыву заснеженного ледяного покрова: *а* – подготовка к эксперименту, ВВ и шнур ДШЭ; *б* – лунка для закладки ВВ диаметром 14 см; *в* – заряд взрывчатки Эмуласт АС-30 ФП при погружении в воду; *г* – взрывная майна после подрыва двух зарядов ВВ массой 8 кг

Уравнение состояние воды принято в виде полинома:

$$P(\rho) = 0.0225(\rho/\rho_0 - 1) + 0.085(\rho/\rho_0 - 1)^2.$$

Действие взрывного нагружения задается в приближении модели мгновенной детонации заряда ВВ. Уравнение состояния продуктов детонации (ПД) выбрано в виде политропы Ландау–Станюковича [3]:

$$P = A\rho^3.$$

Известно, что разрушение материалов при действии динамического нагружения может происходить по отрывному или сдвиговому механизму. Это наблюдается в конструкционных, композиционных и геологических материалах. Экспериментальные данные показали, что лед не является исключением [4]. Детерминированная модель разрушения предусматривает реализацию обоих механизмов разрушения. Считается, что при достижении главным растягивающим напряжением значения откольной прочности лед разрушается по типу отрыва. Разрушения по типу сдвига происходят при достижении удельной работой сдвиговых пластических деформаций некоторого предельного значения [5].

Численный метод расчета динамического нагружения льда

В качестве основного инструмента исследований использован модифицированный лагранжев метод, расчетная часть которого дополнена механизмами расщепления расчетных узлов и разрушения расчетных элементов. Оригинальность метода заключается в новом способе выделения поверхностей разрыва сплошности материалов, который не накладывает серьезных ограничений на решение современных динамических многоконтактных задач МДТТ. Последние нововведения заключаются в алгоритме расчета свободных и контактных поверхностей, позволяющем описывать более гладкую поверхность между продуктами детонации и льдом при взрывном нагружении [5].

Для двумерного плоского и осесимметричного случая разработан пользовательский многофункциональный программный комплекс решения динамических многоконтактных задач МДТТ, позволяющий в интерактивном режиме подготавливать начальные данные, включая автоматическое разбиение расчетной области, осуществлять расчет в консольном режиме, а также проводить графическую и табличную обработку полученных результатов. Программная реализация метода взрывного нагружения льда осуществлена при помощи специально разработанного нового решателя [6].

Достоверность результатов численного моделирования установлена путем решения ряда тестовых задач, сравнением с известным аналитическим решением и экспериментальными результатами. Отдельные эксперименты специально проведены в ЦНИИ им. А.Н. Крылова. Некоторые эксперименты проведены на уникальном баллистическом стенде с высокоточными приборами регистрации в НИИ прикладной математики и механики. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными не более 10 % [7].

Исследование процесса взрывного нагружения льда на воде

Ниже представлены результаты численных исследований взрывного нагружения льда на воде. Практическая значимость состоит в необходимости более эффективного разрушения толстого (2 м и более) слоя льда при взрыве. Лед такой толщины нередко образуется на сибирских реках зимой в результате экстремально низких температур (-40°C и ниже). Цель исследований заключается в выявлении влияния глубины закладки заряда ВВ на процесс разрушения льда на водной подложке.

Объект исследования – это массивный ледяной цилиндр размерами в сечении 500×250 см. Глубина закладки ВВ варьировалась в диапазоне от 22 до 221 см. В качестве ВВ использован безоболочечный заряд тринитротолуола (ТНТ): начальная плотность $\rho_0 = 1.6$ г/см³, скорость детонации 6900 м/с. Масса заряда была 4.8 кг, размеры в сечении 21×23 см. На контактной границе «Лед – ВВ», «Лед – Вода», а также кромках льда задано условие скольжения. Расчетная область автоматически разбивалась «конвертом» на 10 000 триангуляционных элементов. Серия вычислительных экспериментов состояла из 8 вариантов (таблица) и проведена в двумерной постановке с учетом осевой симметрии. Расчеты проведены с использованием предложенного алгоритма расчета свободных и контактных поверхностей. Физико-механические характеристики льда следующие: начальная плотность 0.92 г/см³, объемная скорость звука $C_0 = 3020$ м/с, модуль сдвига $G = 0.32$ ГПа, предел текучести $\sigma_T = 2.2 \cdot 10^{-3}$ ГПа, откольная прочность

$\sigma_k = 3 \cdot 10^{-3}$ ГПа, удельная работа сдвиговых пластических деформаций $A_p^* = 5$ кДж/кг и эквивалентная пластическая деформация $\varepsilon_{eqp} = 1$.

Для детального изучения процесса разрушения льда на воде продуктами детонации в 8 вариантах было сделано следующее. На всех стадиях процесса разрушения вплоть до 4 мс проанализированы картины разрушения льда, а именно зафиксированы время и место зарождения первых очагов разрушения, направление их дальнейшего распространения относительно эпицентра взрыва. Отдельно рассмотрен процесс образования магистральных трещин. Построены графики временных зависимостей скорости свободной поверхности льда, поврежденности и скорости изменения поврежденности льда, а также гидростатического давления и девиаторных напряжений в контрольных точках.

На рис. 2 показаны рассчитанные конфигурации системы «Лед – ВВ – Вода» для вариантов 2 и 5 соответственно. Рис. 2, а, б дают детальную информацию о картинах разрушения льда на 4 мс после подрыва ВВ.

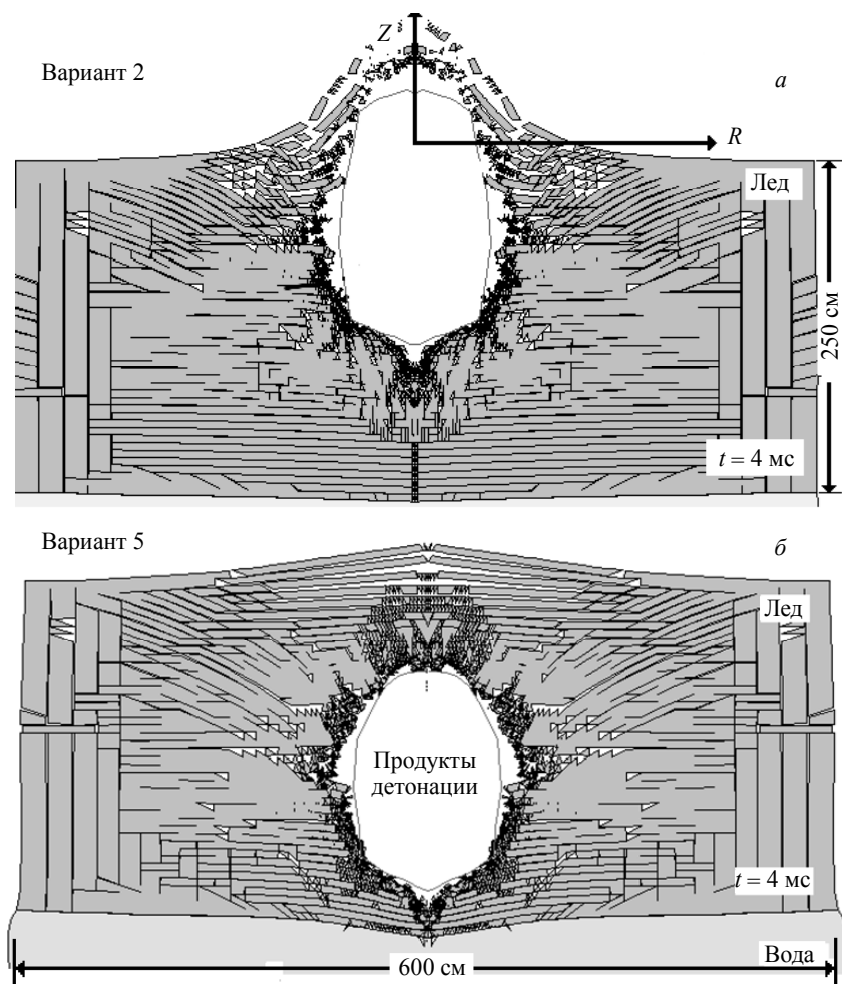


Рис. 2. Рассчитанные конфигурации системы «Лед – Вода – ВВ»

Расчетным путем установлено, что независимо от глубины закладки ВВ, очаги разрушения формируются во льду на первых микросекундах процесса в области контакта «Лед – ВВ». Под действием продуктов детонации зона разрушений распространяется в радиальном и осевом направлениях от эпицентра взрыва к кромке льда. На стадии предразрушения было отмечено незначительное пластическое деформирование льда. Формируются многочисленные магистральные трещины, ориентированные под различным углом к оси симметрии. Разрушение льда на фракции сопровождалось выплеском отдельных кусков наружу через взрывную майну. Установлено, что после 2 мс картины разрушения льда практически не менялись. Анализ эволюции разрушения льда показал, что в четвертом варианте магистральная трещина разделяла лед на две одинаковые части.

На рис. 3 приведены графические зависимости поврежденности льда от времени. Параметр поврежденности впервые был предложен в работе [8]. Видно, что основной объем повреждений во льду сформировался в течение первой миллисекунды. Кривые поврежденности от 0 до 300 мкс близки друг к другу. В некоторых вариантах кривые также практически совпадали на отдельных участках (например, в варианте 1 и 7 после 2 мс). В варианте 8 на кривых проявились «ступеньки», которые объясняются зарождением зон разрушения в области контакта «Лед – ПД» и вблизи свободной границы «Лед – Вода». Минимальный объем повреждений, равный 26.96 %, зафиксирован в варианте 8, а максимальный, равный 38.3 %, в варианте 4. Получено, что только в последнем варианте объем разрушений был меньше 30 %.

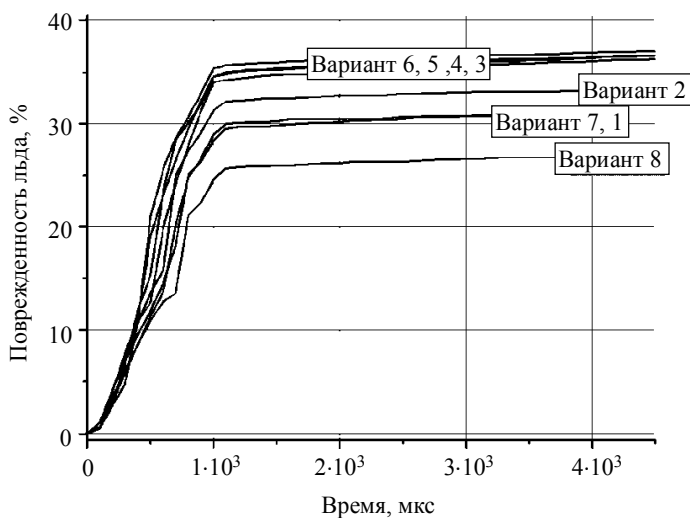


Рис. 3. Графическая зависимость поврежденности льда от времени

Во льду также было вычислено гидростатическое давление и девиаторные напряжения для восьми вариантов расчетов. Контрольная точка расположена практически в середине льда на расстоянии 88 см от боковой поверхности. Пиковые давления отмечены в моменты времени 700 мкс. С 700-й по 900-ю мкс идет убывание, а после 1000 мкс давления становятся нулевыми. Максимальное давление,

равное 0.042 ГПа, зафиксировано в варианте 6. Минимальное давление отмечено в варианте 8 и составило 0.0215 ГПа (рис. 4).

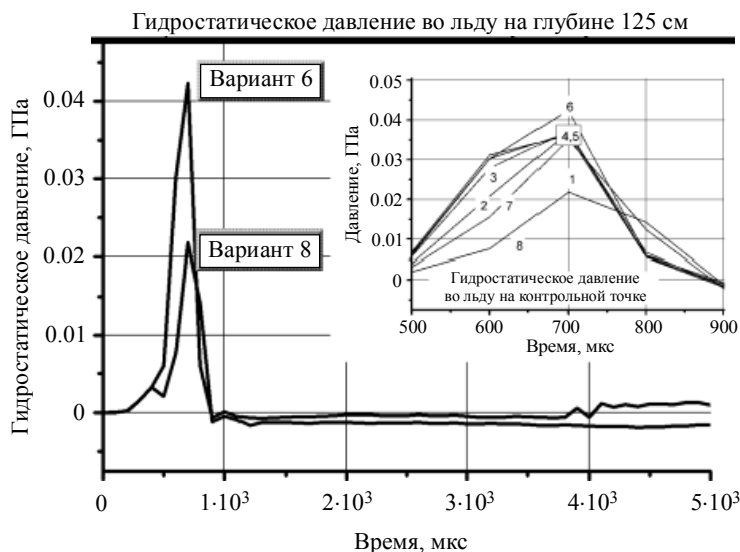


Рис. 4. Результаты расчетов процесса взрывного нагружения льда

Для выявления влияния массы заряда ВВ на процесс разрушения льда проводились дополнительные расчеты. В дополнительном варианте расчетов масса ВВ была увеличена на 50 % и составила 7.2 кг, при этом глубина закладки была такая же, как в варианте 5. Результаты расчетов суммированы даны в таблице.

Результаты расчетов процесса взрывного нагружения льда на воде

Вариант №	Глубина закладки ВВ, см	Поврежденность льда, %	Диаметр майны во льду, см	Скорость свободной поверхности, м/с
1	22	30.76	110	614
2	45	33.22	130	282
3	73	36.82	135	163
4	102	38.30	137	105
5	130	36.86/41.70	140/156	77/89
6	153	37.25	135	53
7	193	30.94	128	41
8	221	26.96	150	32

Примечания: 1. Данные получены в момент времени 4 мс. 2. В знаменателе приведены значения для варианта расчетов с массой ВВ $m = 7.2$ кг.

Из таблицы видно, что объем разрушений льда не превышал 40 %. При этом наличие большого количества очагов и зон разрушения во льду позволяет утверждать, что исследуемый образец значительно поврежден. С увеличением глубины закладки ВВ до 153 см (вариант 6) отмечен рост объема поврежденности льда, а в

вариантах 7, 8 отмечено снижение объема поврежденности льда. Установлено, что максимальный диаметр майны во льду зафиксирован в варианте 8 (в данном варианте ВВ в нижней части соприкасалось с водой). Постоянное увеличение диаметра майны зафиксировано до глубины 130 см (вариант 5). В вариантах 6, 7 отмечено уменьшение диаметра, а в варианте 8 – его максимальное значение. Скорость свободной поверхности уменьшалась с ростом глубины закладки ВВ. Увеличение массы ВВ приводило к увеличению диаметра майны, объема поврежденного льда и скорости свободной поверхности.

Проведенные исследования позволяют рекомендовать для более эффективного разрушения льда в данных условиях закладывать ВВ в середине слоя преграды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 383 с.
2. Инженеры испытали зонд пенетратор для Европы [Электронный ресурс] // Наука и техника. Электронные данные, 2013. URL: <http://lenta.ru/news/2013/07/15/penetratortest> (дата обращения 15.07.2014)
3. Физика взрыва: монография: в 2 т. / науч. ред. Л.П. Орленко. 3-е изд., перераб. М.: Физматлит, 2002. Т. 1. 832 с.
4. 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. V. 43. P. 7820–7839.
5. Орлова Ю.Н. Комплексное теоретико-экспериментальное исследование поведения льда при ударных и взрывных нагрузках: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2014. С. 26.
6. Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю., Орлова Ю.Н. Взрывное нагружение конструкций. Осесимметричная задача. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010615392 от 20.08.2010 г.
7. Горельский В.А., Коняев А.А., Толкачев В.Ф. Моделирование глубины проникания ударников в пресный лед при температуре до -25°C // Сборник материалов Всероссийской конференции «Полярная механика». 2012. С. 21–22.
8. Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю. Разрушение льда при ударном и взрывном нагружении // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13. № 1. Спец. выпуск. С. 425–432.

Статья поступила 15.07.2015 г.

Orlova Yu.N., Orlov M.Yu. THE STUDY OF THE PROCESS OF EXPLOSIVE LOADING OF ICE

DOI 10.17223/19988621/38/10

Nowadays, researches of the behavior of certain natural materials are relevant. This is due to the development of northern territories, extraction of natural resources in the Far North, etc. Ice is an understudied natural material. The modern concept of ice failure is just beginning to develop.

The work presents results of parametric studies on dynamic loading of ice, as well as results of field experiments on explosive loading of ice consisting of snow, slush, and ice. It was found that a ice blast lane with a cross section size of 350 cm is formed after the explosion of the explosive substance in water under ice.

The behavior of ice under explosive loading is described from the standpoint of the phenomenological macroscopic theory of continuum mechanics based on fundamental laws of conservation. The ice is modeled by a single-phase, elastic-plastic, and compressible medium, with allowance for strength properties, shock-wave phenomena, and joint formation of separated and shear damages.

The behavior of a massive ice cylinder upon undermining a bulk explosive at different depths is investigated. The diameter of explosive lanes, the speed of the free surface, ice damages, as

well as hydrostatic pressure and deviatoric stresses at the control points have calculated. For a more effective destruction, it is recommended to lay explosives in the middle of the ice cylinder.

Keywords: ice, model, method, calculation, experiment, explosion, explosive, deformation, destruction.

ORLOVA Yulia Nikolaevna (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: orlovaun@mail.ru

ORLOV Maxim Yurievich (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: orloff_m@mail.ru

REFERENCES

1. Bogorodskiy V.V., Gavrilov V.P. *Led. Fizicheskie svoystva. Sovremennyye metody glyatsiologii*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1980. 383 p. (in Russian)
2. Inzheneriy ispytali zond penetrator dlya Evropy [Elektronnyy resurs]. *Nauka i tekhnika*. Elektronnyye dannye, 2013. URL: <http://lenta.ru/news/2013/07/15/penetratortest> (data obrashcheniya 15.07.2014) (in Russian)
3. *Fizika vzryva* / nauch. red. L.P. Orlenko. Moskow, Fizmatlit Publ., 2002, vol. 1. 832 p. (in Russian)
4. 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, pp. 7820–7839.
5. Orlova Yu.N. *Kompleksnoe teoretiko-eksperimental'noe issledovanie povedeniya l'da pri udarnykh i vzryvnykh nagruzkakh*: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Tomsk, 2014, pp. 26. (in Russian)
6. Glazyrin V.P., Orlov Yu.N., Orlov M.Yu., Orlova Yu.N. *Vzryvnoe nagruzhenie konstruktsiy. Osesimmetrichnaya zadacha*. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2010615392 ot 20.08.2010 g. (in Russian)
7. Gorel'skiy V.A., Konyaev A.A., Tolkachev V.F. Modelirovanie glubiny pronikaniya udarnikov v presnyy led pri temperature do -25°C . *Sbornik materialov Vserossiyskoy konferentsii «Polyarnaya mekhanika»*, 2012, pp. 21–22. (in Russian)
8. Glazyrin V.P., Orlov Yu.N., Orlov M.Yu. Razrushenie l'da pri udarnom i vzryvnom nagruzhении. *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2008, vol. 13, no. 1. Spets. vypusk, pp. 425–432. (in Russian)