

УДК 539.3

**М. Ю. Орлов, В. П. Глазырин, Ю. Н. Орлов,
А. Н. Садохин, Г. Н. Богомолов**

**КОМПЛЕКСНОЕ ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО
ЛЬДА ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ.
ЧАСТЬ 1. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО УДАРНО-ВЗРЫВНОМУ
НАГРУЖЕНИЮ ПРЕСНОВОДНОГО ЛЬДА. РАСЧЕТ
ПРОЦЕССА ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ СИСТЕМЫ
«ЛЕД—ВВ—ВОДА»**

Изучено поведение поликристаллического льда при ударных и взрывных нагрузках. Представлены новые экспериментальные и численные результаты о процессах его деформирования и разрушения при динамическом нагружении. Решен ряд практически значимых задач.

Ключевые слова: модель, метод, пресноводный лед, удар, взрыв, расчет, деформация, разрушение.

**Maksim Y. Orlov, Victor P. Glazyrin, Yuriy N. Orlov,
Alexey N. Sadohin, Gennadiy N. Bogomolov**
**COMPREHENSIVE THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF POLYCRYSTALLINE
ICE BEHAVIOR UNDER DYNAMIC LOADS. PART 1. EXPERIMENTS ON SHOCK-
EXPLOSIVE LOADING OF FRESHWATER ICE. CALCULATION OF THE PROCESS OF EX-
PLOSIVE LOADING SYSTEM «ICE — HE — WATER»**
(National research Tomsk state University, Tomsk)

Freshwater ice behaviour under shock and explosive loads has been investigated. The new experimental and numerical results about the processes of its deformation and failure under

Орлов Максим Юрьевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, г. Томск), e-mail: orloff_m@mail.ru.

Глазырин Виктор Порфирьевич — доктор физико-математических наук, зав. лаб. № 21 (Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, г. Томск), e-mail: orloff_m@mail.ru.

Орлов Юрий Николаевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, г. Томск), e-mail: orloff_yu@sibmail.com.

Садохин Алексей Николаевич — кандидат технических наук, главный инженер (ООО «КузбассСпецВзрыв», г. Кемерово), e-mail: kuzbassv@mail.ru.

Богомолов Геннадий Николаевич — инженер (Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, г. Томск), e-mail: bogomol@mail2000.ru.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ 13-08-90719, 13-08-00509.

© Орлов М. Ю., Глазырин В. П., Орлов Ю. Н., Садохин А. Н., Богомолов Г. Н., 2013

dynamic loading are presented in the paper. The number of practical tasks have been solved.

Key words: Model, method, freshwater ice, shock, explosion, calculation, deformation, failure.

Введение

Актуальность исследований поведения льда при ударно-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 увеличение добычи природных ископаемых в районах вечной мерзлоты. Острой проблемой все еще является образование весенних заторов на сибирских реках, длина которых достигает более 150 километров.

Исследования имеют военные приложения, примером служит 15 по счету пуск баллистической межконтинентальной ракеты «Булава» с подводного крейсера тактического назначения «Юрий Долгорукий», который вначале был отложен по причине сложной ледовой ситуации в Белом море осенью 2010 года. Известно, что некоторые астероиды могут полностью состоять из льда, поэтому существует вероятность их столкновения с космическими аппаратами. Тема столкновения астероида с Землей была даже экранизирована в Голливуде.

Следует отметить, что в нашей стране нет государственной поддержки ледовых исследований, как, например, в США, где совместно с военно-морскими силами возобновлена программа «SCICEX», в рамках которой идет сбор научных данных с помощью новейших надводных и подводных средств. В Англии был протестирован Зонд «Penetrator», способный внедряться в толстые массивы льда без повреждения высокоточного оборудования, установленного внутри. Разработка образца была бы невозможна без знания прочностных свойств льда, которые необходимы на стадии оптимизации его конструктивно-компоновочной формы.

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. Это объясняется сложной внутренней структурой, особенностями кристаллической решетки, аномальными пластическими свойствами, многократными фазовыми переходами в процессе деформирования и т. д. С точки зрения разрушения поликристаллический лед вообще может не иметь аналогов.

В данном аспекте математическое моделирование выступает эффективным теоретическим инструментом, позволяющим без больших материальных и временных затрат выявлять основные механизмы и закономерности процессов ударного и взрывного нагружения поликристаллического льда при различных начальных условиях.

Краткий аналитический обзор по теме исследования

Ежегодно по ледовой тематике выходит более 1400 статей (Данные Всемирной сети Интернет), однако работ по моделированию его ударно-взрывного нагружению значительно меньше. Это подтверждается работой юбилейного X Всероссийского Съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, где из тысячи представленных докладов по ледовой тематике было заявлено не более десятка. В 2012 под эгидой СО РАН в ИГ им. М. А. Лаврентьева прошла Всероссийская научная конференция «Полярная механика», на которой были представлены новейшие разработки научно-технических коллективов в области современной механики льда.

Таким образом, по состоянию на середину 2012 года достоверно известно, что изучением основных механизмов и закономерностей льда при высокоскоростном деформировании занимаются различные коллективы ученых в следующих научных организациях нашей страны: ФГУП «ЦНИИ им. А. Н. Крылова», ААНИИ, ВНИИ им. Б. Е. Веденева (Санкт-Петербург), ИПМ им. А. Ю. Ишлинского (Москва), НИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского (Н. Новгород), РФЯЦ-ВНИИ ЭФ (Саров), ИГ им. М. А. Лаврентьева, ИГД им. Н. А. Чалакала, ИТПМ СО РАН им. С. А. Христиановича (Новосибирск), НИ ТГУ, НИ ТПУ (Томск), ИВМ СО РАН (Красноярск), ИММ ДВО РАН (Комсомольск-на-Амуре), ЯГУ (Якутск), ДВФУ (Владивосток) и др.

За рубежом поисковые научные исследования по изучению поведения льда при динамических нагрузках проводятся во многих научных центрах, в том числе: Columbia University, University of California, Mississippi State University, NASA, Harvard University, Cambridge, Los Alamos National Laboratory, Clarkson University, Purdue University (США), Chevron Resources, Canadian Hydraulics Centre, National Research Council of Canada, Institute for Ocean Technology, Memorial University of Newfoundland (Канада), Norwegian University of Science and Technology (NTNU) (Норвегия), Institute for Snow and Avalanche Research (Швейцария), Cranfield University (Великобритания), SICOMP (Sweden), Dalian University of Technology (Китай), Nagoya University (Япония), Universite de Lyon (Франция), National University of Singapore (Сингапур), Technical University of Catalonia (Испания), Indian Institute of Science (Индия) и т. д.

Анализ научно-технической и патентной литературы указывает на крайне небольшое число исследовательских работ по данной теме. Из их числа следует выделить экспериментальные работы по изучению процесса соударения ледовых ударников с дюралюминиевыми и полимерными композитными преградами для нужд авиакосмической отрасли [5, 6]. Работы выполнены на высоком научном уровне и содержат новые экспериментальные данные, которые могут использоваться при апробации разрабатываемых моделей поведения льда. В ряде зарубежных работ исследован процесс высокоскоростного деформирования ударников (до 7000 м/с) со сверхтолстым льдом [7]. Толщина моделируемого

льда приравнивалась к толщине льда небесных тел, под которым находится вода в жидкой фазе. В работе представлена феноменологическая модель поведения льда при динамических нагрузках, которая в настоящее время является наиболее распространенной [8]. Следует отметить работы по разрушению ледового покрова подводными судами [9].

Анализ научно-технической литературы указывает на то, что в настоящее время актуальны новые адекватные модели и методы расчета динамического нагружения льда, при помощи которых возможно детально исследовать поведение этого древнейшего природного материала в труднодоступной для физического эксперимента области.

Физико-математическая модель льда и метод расчета его ударно-взрывного нагружения

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, а также совместного образования отрывных и сдвиговых разрушений. Упруго-пластическое течение задается уравнениями Прандтля – Рейса при условии текучести Мизеса. Уравнение состояния выбрано в форме Уолша, основным достоинством которого 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 в виде политропы Ландау-Станюковича [1].

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, не накладывающем серьезных ограничений на решение современных динамических многоконтактных задач МДТТ. В процессе счета допускается появление новых свободных поверхностей, в том числе разделяющих взаимодействующие тела на отдельные фрагменты [2].

Получен ряд оригинальных научных результатов, в том числе детально изучена динамика деформирования и разрушения толстых льдов при взрывном нагружении. Установлено, что увеличение массы заряда ВВ в воде подо льдом приводит к образованию на начальной стадии процесса двух очагов разрушения, которые затем сливаются в один. Увеличение заглубления в воду заряда ВВ приводит к значительному снижению степени разрушения ледовой пластины и снижению по гиперболической зависимости максимального давления во льду и скорости свободной поверхности льда [3].

Для двумерного плоского и осесимметричного случая разработан пользовательский многофункциональный программный комплекс решения динамических многоконтактных задач МДТТ для случая осевой и плоской симметрии, 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. (Св-ва о государственной регистрации программ для ЭВМ 2010610912 от 21.01.2010 г. и № 2010610911 от 28.01.2010 г.) [4].

Тестовые расчеты

Прежде чем приступить к интерпретации результатов математического моделирования в прогностических целях необходимо решить вопрос о достоверности получаемых результатов. Для этого проводят внутренние, качественные и количественные тесты, которые направлены как на проверку заложенной модели среды, так и метода их расчета.

Достоверность результатов численного моделирования установлена путем решения ряда тестовых задач, результаты которых сравнивались с известным аналитическим решением и экспериментальными данными. Решены задачи о распаде разрыва, об ударе цилиндра по жесткой стенке, о пробитии однородных и слоистых преград. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превысило 10 %.

Впервые в качестве количественного теста была решена задача о нормальном ударе ледяного цилиндра по тонкой дюралюминиевой пластине [6]. Ударник – ледяной цилиндр диаметром 20 и высотой 25 мм. Преграда – тонкая дюралюминиевая пластина размерами (200×1,2) мм. С целью сравнения расчетных и экспериментальных данных были воспроизведены два французских эксперимента YMP-01 и YMPV-05, в которых начальная скорость цилиндров была равной 62,4 и 125,9 м/с. Расчеты проведены в осесимметричной постановке при помощи численного метода [7].

На рис. 1а, б показана хронограмма процесса соударения цилиндра с дюралюминиевой пластиной в эксперименте YMP-01. Установлено, что первые очаги разрушения в зоне контакта «ударник – мишень» и начинают распространяться к тыльной поверхности цилиндра. Процесс разрушения сопровождается растеканием ударника в радиальном направлении и формированием прогиба пластины в осевом направлении вплоть до 160 мкс. Компьютерная визуализация доказывает хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. Рис.1в иллюстрирует прогиб пластины в результате пластической деформации после удара цилиндра в эксперименте YMPV-05. Нетрудно заметить, что своей максимальной величины остаточный прогиб R_d достигал в зоне непосредственного контакта «ударник – мишень». Согласно экспериментальным и расчетным данным материал преграды не разрушался.

Рис. 1 (в) иллюстрирует графическую зависимость остаточного прогиба пластины в зависимости от времени. Видно, что формирование прогиба в пластине происходило почти весь процесс взаимодействия.

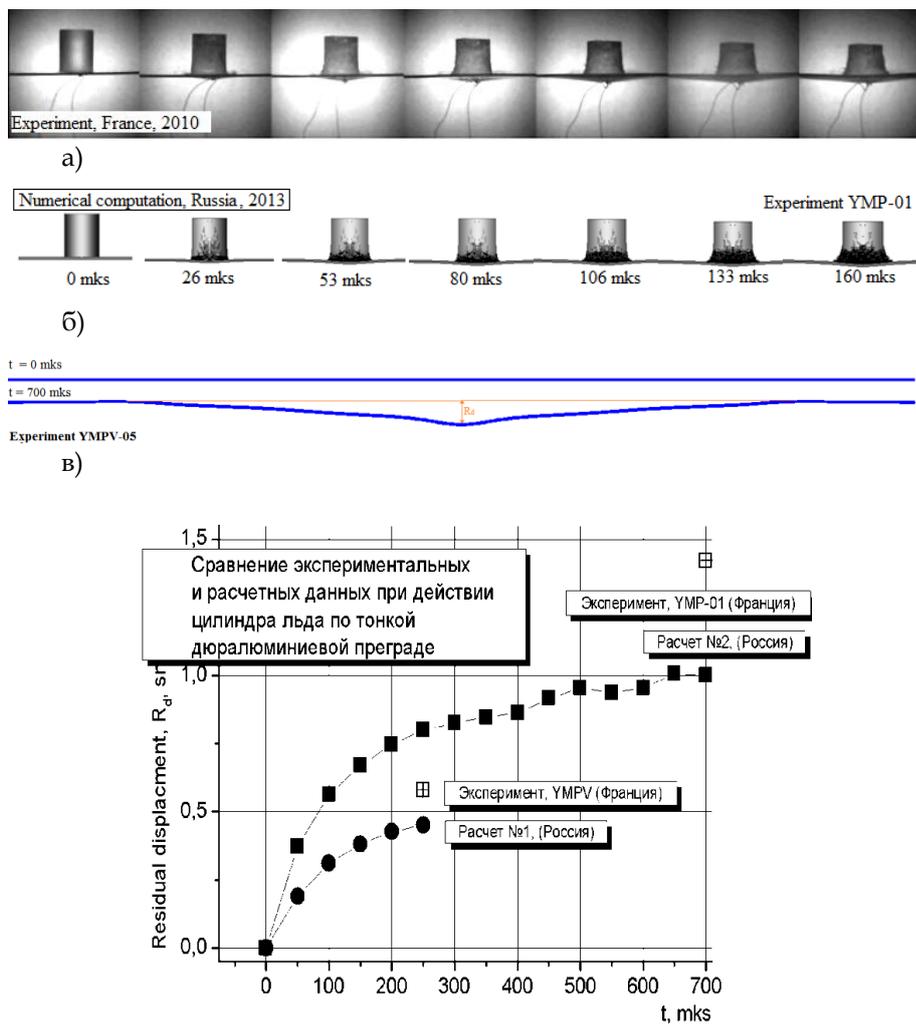


Рис. 1. Сравнение результатов физического и вычислительного экспериментов

Установлено, что остаточный прогиб пластины R_d в экспериментах YMP-01 и YMPV-05 был равным 14,2 и 5,78 мм соответственно. В расчетах R_d был равным 10,1 и 4,9 мм. Такое расхождение объясняется различием сплавов AU4G и Д16, используемых в физическом и вычислительном экспериментах.

Физико-механические свойства льда

В вычислительном эксперименте рассматривался поликристаллический лед без фазовых переходов с усредненными физико-механическими характеристиками из общедоступных источников (рис. 2 б). Действие гравитационных сил на лед не учитывалось, т. к. они существенно меньше сил ударного взаимодействия. Предмет исследований – осесимметричное 2D напряженно-деформированное и термодинамическое состояние льда с учетом эволюции его деформационных картин и областей разрушения.

Основные физико-механические характеристики льда были следующие: константы уравнения состояния $K_1 = 8,4$ ГПа, $K_2 = 16,8$ ГПа, $K_3 = 8,4$ ГПа, 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, $A_p = 0,5$ кДж/кг, $\epsilon_{eq} = 2,0$ эквивалентная пластическая деформация.

Уравнение состояния льда принято в виде:

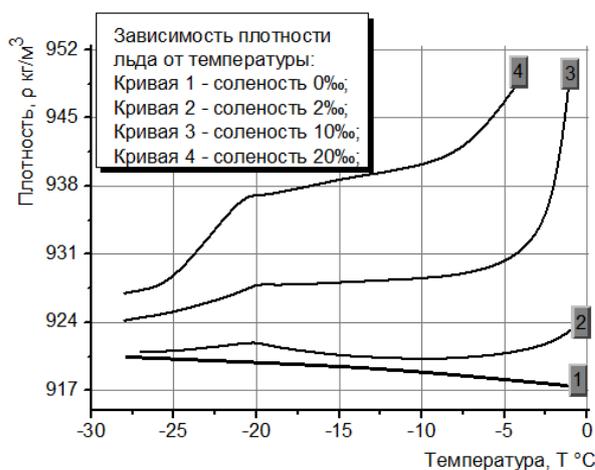
$$P(\rho) = B(\rho/\rho_0 - 1)(\rho/\rho_0)^2,$$

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

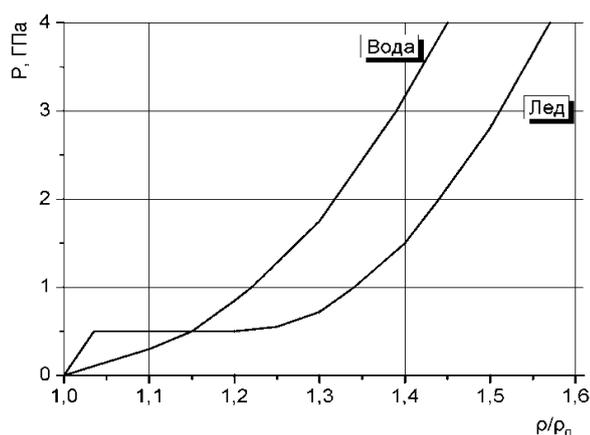
Уравнение состояния воды в виде полинома:

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

На рис. 2 приведена графическая зависимость плотности льда от температуры для различной солёности. Видно, что при нулевой солёности кривая легко аппроксимируется линейной функцией. Ударная адиабата воды близка к графику степенной функции, причем после достижения плотностью значения 1,35 кривые становятся параллельными.



a)



б)

Рис. 2. График зависимости плотности льда от температуры, ударная адиабата воды и льда

Экспериментальные исследования процесса ударного и взрывного нагружения пресноводного льда

Ниже представлены результаты физических экспериментов по ударному и взрывному нагружению пресноводного льда зимой 2013 года.

Для проведения физического эксперимента были подготовлены шесть цилиндров льда, которые изготавливались путем заморозки пресной воды в естественных условиях при температуре -14 C° в течение более 3 суток. Объектами исследования являлись цилиндры с разной высотой и диаметром (рис. 3). 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 фиксировалась глубина внедрения ударника и диаметр кратера. Отметим, что в процессе взаимодействия ударник не разрушался. Отметим, что кратер имел форму усеченного конуса, вершина которого располагалась ближе к тыльной поверхности. В процессе кратерообразования наблюдался лицевой откол. При проведении экспериментов один из образцов был разрушен в результате неточного попадания. После удара во льду присутствовали кольцевые трещины отрыва, распространяющиеся от центра к тыльным боковым поверхностям. Объем разрушенного льда был незначительным.

Результаты экспериментов представлены в табл. 1. Из таблицы видно, что глубина кратера в некоторых случаях почти в 1,8 раз превышает диаметр ударника. При этом диаметр кратера в 3 и более раз превышает диаметр ударника. Максимальная глубина кратера и его диаметр зафиксированы в эксперименте № 5.



а) б)
Рис. 3. Ледяные образцы до (а) и после удара (б)

Таблица 1

Результаты физических экспериментов

№ Образца/эксперимента	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	6,4	14,0
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	6,1	18,0

В результате аналитического обзора, проведенного авторами, экспериментальных работ по изучению взрывного нагружения льда зарядом ВВ в открытых источниках обнаружено не было. Ниже впервые представлены результаты натурального эксперимента по взрывному нагружению пресноводного льда безоболочечным зарядом ВВ.

Совместно с ООО «Кузбасспечвзрыв» проводились эксперименты по взрывному нагружению однолетнего льда зарядом взрывчатого вещества (ВВ). Натурные эксперименты проведены в апреле 2013 года в рамках ежегодных противопаводковых мероприятий. Взрыв осуществлялся в воде из-под льда безоболочечным зарядом ВВ марки Эмуласт АС-30-ФП-90. Заглубление составило 0 ± 2 см. Масса ВВ была 4 кг, длина 70 см. Толщина льда – 80 см. Диаметр отверстия для закладки ВВ получился равным $d_0 = 16$ см. На рис. 3 (в), (г) приведены результаты натурального эксперимента на р. Томь. Получено, что после взрыва ВВ диаметр майны был приблизительно равным 200 см.

Численное исследование процесса взрывного нагружения толстого льда

Далее проведена серия вычислительных экспериментов по взрывному нагружению пластины пресноводного льда, расположенного на воде. Толщина льда и водной подложки была по 250 см соответственно.

Серия вычислительных экспериментов состояла из 8 вариантов с различной глубиной закладки ВВ. В качестве ВВ использован безоболочечный заряд ТНТ массой 4 кг. Размеры в сечении составили (21×23) см, а схема расположения представлена на рис. 4. Расчетная область разбивалась «конвертом» на 17248 триангуляционных элементов. Целью исследований являлось изучение влияния глубины закладки ВВ на процесс деформирования и разрушения пресноводного льда, который располагался на воде.



Рис. 3. Эксперимент по взрыву речного льда: в – диаметр до взрыва ВВ, г – диаметр майны после взрыва ВВ

Расчетным путем установлено, что независимо от глубины закладки ВВ первые очаги разрушения формируются во льду на первых микросекундах в зоне контакта «ВВ–Лед». Под действием продуктов детонации зона разрушений начинает распространяться в радиальном и осевом направлениях к боковым поверхностям ледовой пластины. Видно, что процессу разрушения подвергался практически весь лед, которому предшествовало его пластическое деформирование. Выявлено, что во льду формируются магистральные трещины, которые расположены под различными углами к оси симметрии. В процессе счета взрывная майна во льду постепенно увеличивается, приобретая эллипсоидную форму, при этом достигая диаметра 110 см и более. Вследствие действия растягивающих напряжений в некоторых вариантах сформировались откольные тарелки, однако они были сильно разрушены.

Возможность иметь полную информацию о напряженно-деформированном и термодинамическом состоянии системы «Лед–ВВ–Вода» позволила построить графические зависимости гидростатического давления, скорости свободной поверхности льда и его повреждаемости от времени.

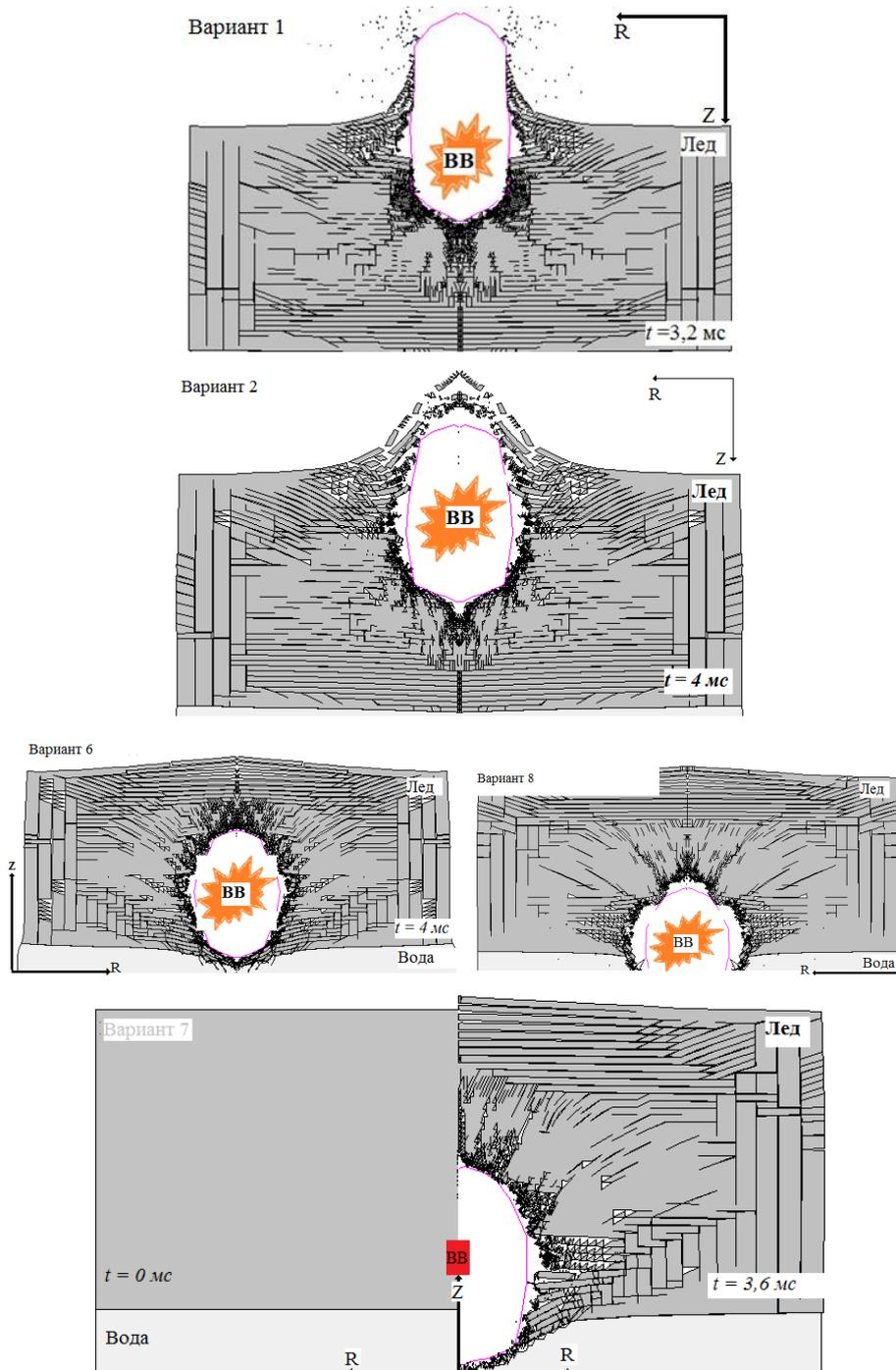


Рис. 4. Фрагменты рассчитанных конфигураций системы «Лед – Вода – ВВ»

На рис. 5а приведена зависимость гидростатического давления в воде подо льдом в контрольной точке. Контрольная точка располагалась на оси симметрии в воде на глубине 125 см. Видно, что кривая для варианта 1 расположена в отрицательной области давлений, а остальные кривые — в положительной. Практически на всех кривых присутствуют колебания. Установлено, что с увеличением глубины закладки ВВ наблюдается рост давления, который начинается из отрицательной области на первой миллисекунде. Максимальное давление зафиксировано в варианте 1. Выявлено, что в данной контрольной точке давления не были невысокими в течение всего процесса.

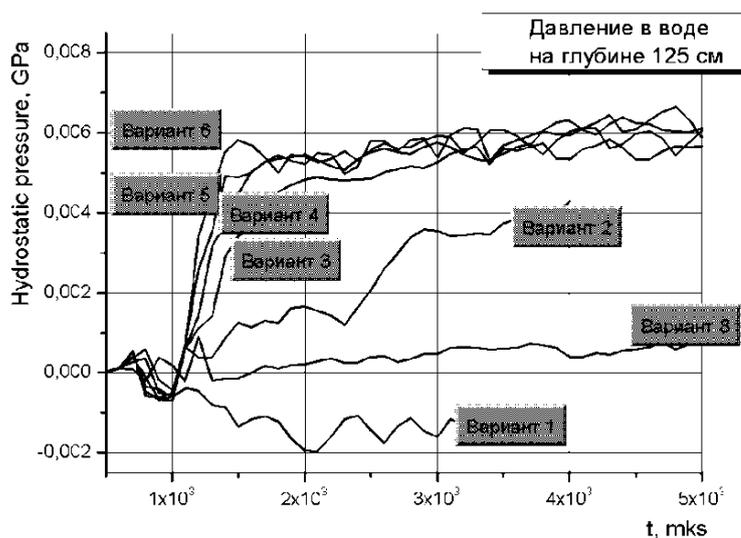


Рис. 5а. Зависимость давления от времени

На рис. 5б приведены профили скорости свободной поверхности льда от времени. Видно, что амплитуда ударной волны после выхода ее на свободную поверхность понижается в зависимости от глубины закладки ВВ. Время прихода ударной волны на свободную поверхность зафиксировано в интервале от 100 до 700 мкс. На некоторых кривых отмечены участки снижения скорости, после которых движение свободной поверхности происходит при постоянной скорости. Выявлено, что максимальная скорость была в варианте 1, а минимальная — в варианте 8.

На рис. 5в приведен график зависимости поврежденности льда от времени для всех вариантов расчета. Данный параметр был предложен и апробирован в работе [9]. Видно, что процесс накопления повреждений во льду происходил в течение первой миллисекунды. Расчетным путем получено, что в некоторых случаях кривые практически совпадали на определенных участках.

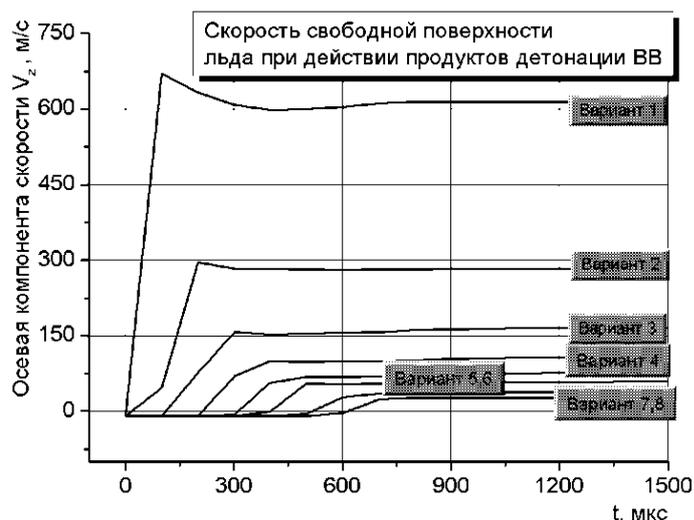


Рис. 5б. Зависимости скорости тыльной поверхности от времени

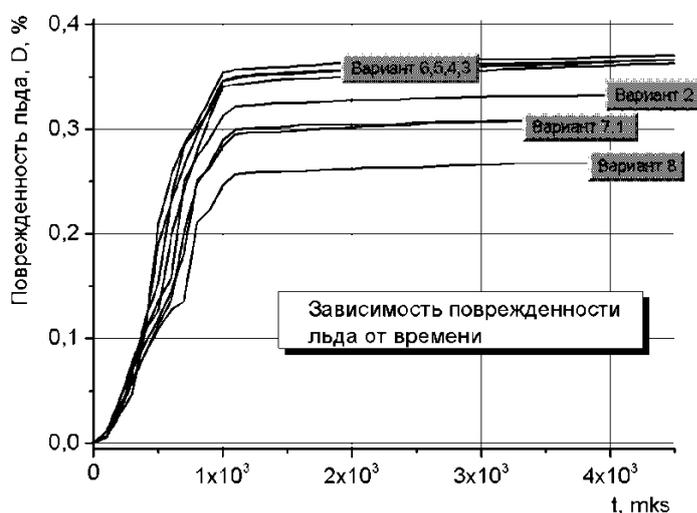


Рис. 5в. Зависимости поврежденности льда от времени

В варианте 8 появились «ступеньки», которые объясняются формированием зон разрушения в зоне контакта «Лед – ВВ» и вблизи тыльной поверхности. Минимальный объем повреждений зафиксирован в варианте 8, а максимальный – в варианте 4.

В табл. 2 приведены результаты расчетов процесса взрывного нагружения толстой ледовой пластины, расположенной на воде.

Таблица 2

Результаты вычислительных экспериментов

	Вариант №	Глубина закладки ВВ, [см]	Поврежденность льда, [%]	Диаметр майны во льду, [см]	Скорость свободной поверхности, [см]
1	Вариант 1	22	30,76	110	614
2	Вариант 2	45	33,22	130	282
3	Вариант 3	73	36,82	135	163
4	Вариант 4	102	38,30	137	105
5	Вариант 5	130	36,86	140	77
6	Вариант 6	153	37,25	135	53
7	Вариант 7	193	30,94	128	41
8	Вариант 8	221	26,96	150	32

Из таблицы видно, что объем разрушений льда не превысил 38 %. С увеличением глубины закладки ВВ до 153 см (вариант 6) отмечен рост поврежденности льда. В варианте 7,8 отмечено снижение объема поврежденности льда. Установлено, что максимальный диаметр майны во льду зафиксирован в варианте 8. Следует отметить, что расчетные данные были получены в момент времени 4 мс и при продолжении счета могут увеличиться. 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.

Проведенные исследования позволяют рекомендовать для наиболее эффективного разрушения льда в данных условиях закладывать ВВ в середине пластины.

Таким образом, разработанные средства математического моделирования позволяют выявлять основные механизмы и закономерности процесса деформирования и разрушения льда при различных начальных условиях. Полученные результаты могут быть полезны в различных сферах жизнедеятельности человека, связанных со льдом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика взрыва / Под ред. Станюковича. М: Мир, 1973. С. 704.
2. Глазырин В. П., Орлов Ю. Н., Орлов М. Ю. Разрушение льда при ударном и взрывном нагружении // Вычислительные технологии. 2008. Т.13. Ч.1. Спец. выпуск. С. 425–432.
3. Орлов Ю. Н. Исследование процессов высокоскоростного деформирования и разрушения комбинированных ударников: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2007. 34 с.
4. 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».
5. Asp L., Juntikka R. High velocity impact on NCF reinforced composites // Composites Science and Technology. Vol. 69, 9, 2009. P. 1478 – 1482.

6. *Combesure A, Chuzel-Marmot Y., Fabis J.* Experimental study of high-velocity impact and fracture of ice // *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 48. Issue 20. 2011. P. 2779–2790.
7. *Sherburn J., Horstemeyer M. F.* Hydrodynamic Modeling of Impact Craters in Ice // *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37. № 1. 2010. P. 37–46.
8. *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* Vol. 43 Issue 25. 2006. P. 7820–7839.
9. *Kozin V. M., Zemlyak V. L., Chizhumov S. D.* Influence ice conditions on the effectiveness of the resonans method of breaking ice cover by submarines // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2010, Vol.51, Number 3, Pages 398–404.

* * *