МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИИ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД И НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ (27–29 ноября 2013 г.)

III Всероссийская молодёжная научная конференция

Под редакцией М.Ю. Орлова

Томск
Издательский Дом Томского государственного университета
2014

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 539.3

КОМПЛЕКСНОЕ ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЛЬДА. ИТОГИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ ЗА 2013 г.

М.Ю. Орлов

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Исследовано поведение льда при ударно-взрывных нагрузках. Экспериментально изучен процесс взаимодействия сферического ударника с кожеляционным льдом, а также процесс взрывного нагружения безоболочечным зарядом ВВ ледяной пластины, расположенной на воде. Рассмотрен метод взрывного нагружения толстого льда на водной подложке. Результаты расчетов получены в виде текущих конфигураций системы «Лед−ВВ−Вода», а также графиков и таблиц.

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 стоит образование весенних заторов на сибирских реках, длина которых достигает более 150 километров. Исследования имеют военные приложения, примером служит 15-й 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 г. Известно, что некоторые астероиды могут полностью состоять изо льда, поэтому существует вероятность их столкновения с космическими аппаратами.

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 Великобритании протестирован Зонд «Penetrator», способный внедрятся в толстые массивы льда без повреждения высокоточного оборудования, установленного внутри. Разработка опытно образца была бы невозможна без знания прочностных свойств льда.

В НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета более 25 лет ведутся ПНИР, объектом изучения которых является поликристаллический лед. Создана физико-математическая модель поведения льда при динамических нагрузках, а также численный метод расчета его ударного и взрывного нагружения, способный на качественно высоком уровне воспроизводить основные особенности и механизмы процессов деформирования и разрушения.

В истекшем году проведены теоретико-экспериментальные исследования поведения этого древнейшего природного материала при динамических нагрузках.

Впервые совместно с ООО «КузбассСпецВзрыв» проведены натурные эксперименты по взрывному нагружению однолетнего пресноводного льда безоболочечным зарядом ВВ. Экспериментально изучен процесс взаимодействия компактного сферического ударника с кожеляционным льдом при низких начальных скоростях. Детально исследован процесс внедрения крупно-габаритного ударника с инертным наполнителем в лед на водной подложке и процесс его взрывного нагружения безоболочечным зарядом ВВ. Получены рекомендации по наиболее эффективному разрушению льда. Результаты исследований приведены в [1–5].

Краткий аналитический обзор по теме исследований

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 г. 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 механики льда. Следующую конференцию планируется провести в Санкт-Петербурге на базе ЦНИИ им. А.Н. Крылова в 2014 г.

Таким образом, по состоянию на конец 2013 г. 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), ДФУ (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, Cam-bridge, 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 Catalunia (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 [1, 2]. 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 [3]. 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 [4]. Следует отметить работы по разрушению ледового покрова подводными судами [5].

Физико-математическая модель деформирования и разрушения льда

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 состояние 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 [6]. Физико-механические характеристики взяты из общедоступной литературы. На рис. 1 показаны экспериментальные данные зависимости модуля сдвига и Юнга от температуры.

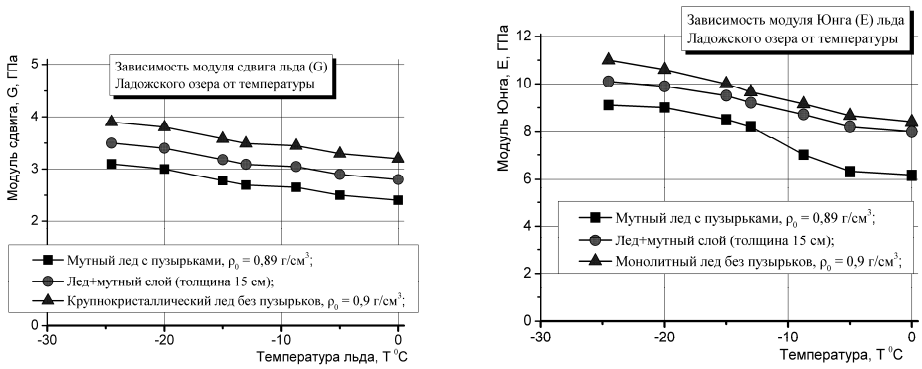


Рис. 1. Зависимость модуля сдвига и модуля Юнга от температуры

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 накладывающих серьезных ограничений на решение современных динамических многоконтактных задач МДТТ. В процессе счета допускается появление новых свободных поверхностей, в том числе разделяющие взаимодействующие тела на отдельные фрагменты [7].

Для двумерного плоского и осесимметричного случаев разработан пользовательский многофункциональный программный комплекс решения динамических многоконтактных задач МДТТ для случая осевой и плоской симметрии, позволяющей 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.) [9].

Экспериментальные исследования процесса динамического нагружения льда

Ниже представлены результаты физических экспериментов по ударному и взрывному нагружению пресноводного льда зимой 2013 г. Для проведения физического эксперимента были подготовлены шесть цилиндров льда, которые изготавливались путем заморозки пресной воды в естественных условиях при температуре – 14 º С в течение более 3 суток. Объектами исследования являлись цилиндры с разной высотой и диаметром (рис. 2). 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 гр. 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.

Рис. 2. Образцы льда до и после эксперимента

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 зафиксирована в эксперименте №5.

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 источ-

никах обнаружено не было. Ниже впервые представлены результаты натурного эксперимента по взрывному нагружению пресноводного льда безоболочечным зарядом ВВ.

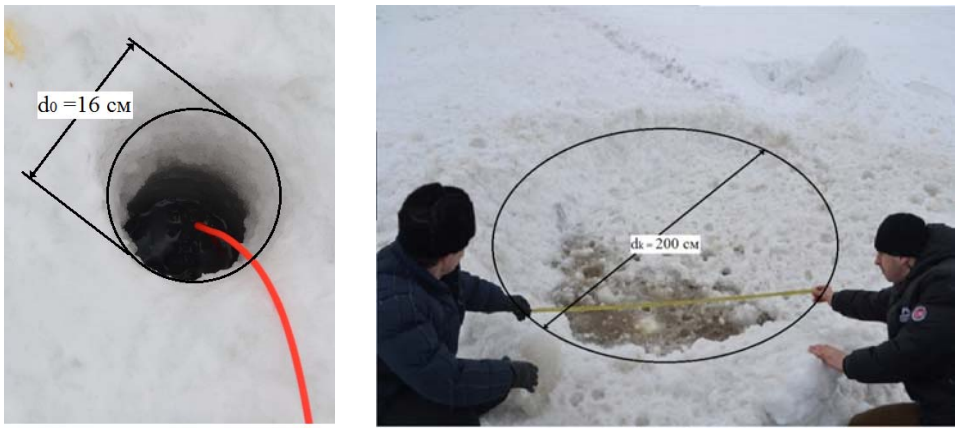


Рис. 3. Диаметр майны до и после взрыва ВВ.
На фото слева – М.Ю. Орлов, справа – В.В. Голубятников. *Фото* сделано Г.Н. Богомоловым

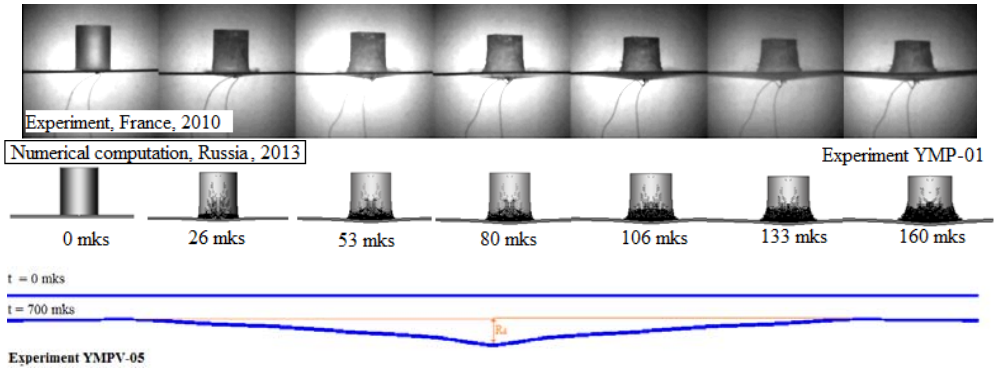
Совместно с ООО «Кузбасспецвзрыв» проводились эксперименты по взрывному нагружению однолетнего льда зарядом взрывчатого вещества (ВВ). Натурные эксперименты проведены в апреле 2013 г. в рамках ежегодных противопаводковых мероприятий. Взрыв осуществлялся воде из-под безоболочечным зарядом ВВ марки Эмуласт 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 получилось равным d_0 = 16 см. На рис. 3 приведены результаты натурного эксперимента на р. Томь. Установлено, что после взрыва ВВ диаметр майны был приблизительно равным 200 см.

Тестовые расчеты

В качестве количественного теста была решена задача о нормальном ударе ледяного цилиндра по тонкой дюралюминиевой пластине с различными скоростями [2]. 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 [3].

На рис. 4 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. 5, *б* иллюстрирует пластическую деформацию алюминиевой пластины после удара цилиндра в эксперименте YMPV-05. Не трудно 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.



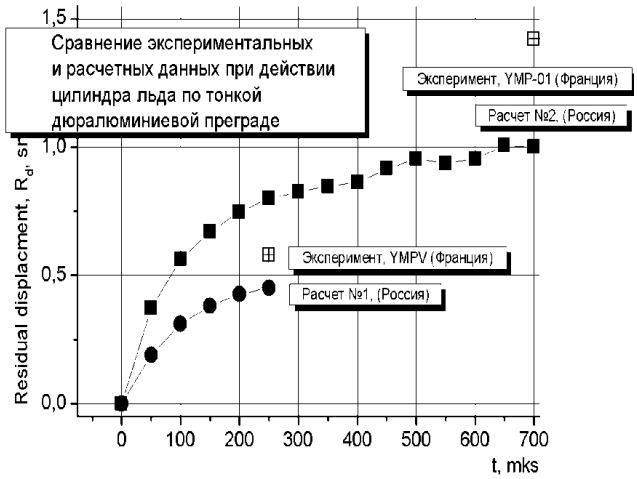


Рис. 4. Результаты физического и вычислительного экспериментов

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.

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 4,8 кг. Размеры в сечении составили (21×23) см, а схема расположения представлена на рис. 5. Расчетная область разбивалась «конвертом» на 17248 триангуляционных элементов. Целью исследований являлось изучение влияния глубины закладки ВВ на процесс деформирования и разрушения пресноводного льда расположенного на воде.

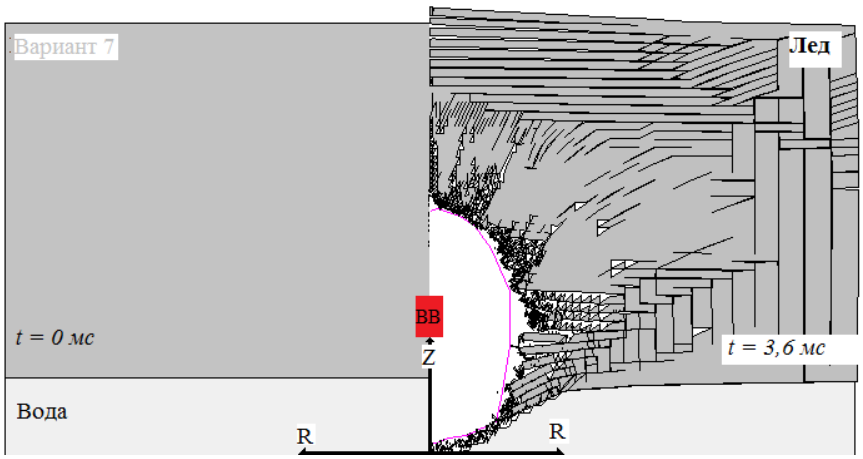


Рис. 5. Фрагменты рассчитанных конфигураций системы «Лед – Вода – ВВ»

Расчетным путем установлено, что независимо от глубины закладки ВВ, первые очаги разрушения формируется во льду на первых микросекундах в зоне контакта «ВВ – Лед». Под действием продуктов детонации зона разрушений начинается распространяться в радиальном и осевом направлениях к боковым поверхностям ледовой пластины. Видно, что процессу разрушению 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 и достигая диаметра 110 см и более. Вследствие действия растягивающих напряжений в некоторых вариантах сформировались откольные тарелки, однако они были сильно разрушены.

На рис. 6 показана 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 давление не были невысокими в течение всего процесса.

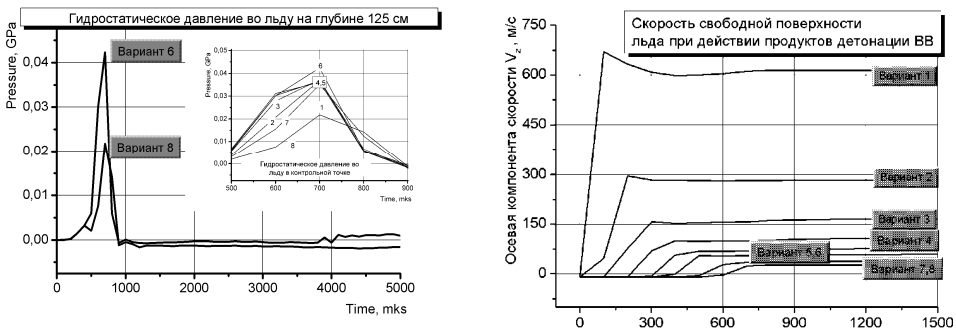


Рис. 6. Зависимость давления и скорости от времени

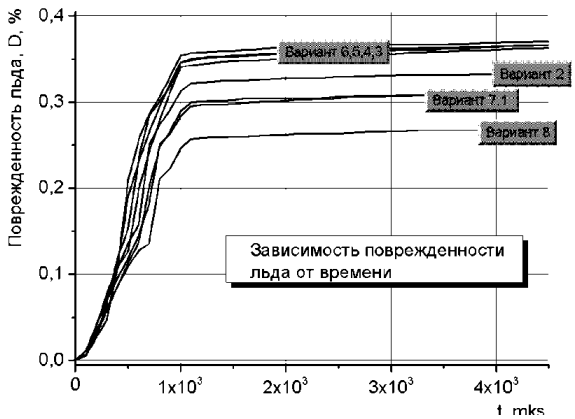


Рис. 7. Зависимость повреждённости льда от времени

На рис. 6 также приведены профили скорости 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.

Таблица 2. **Результаты вычислительных экспериментов**

Вариант №	Глубина закладки ВВ, см	Повреждённость льда, %	Диаметр майны во льду, см	Скорость свободной поверхности, см
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	140	77
6	153	37,25	135	53
7	193	30,94	128	41
8	221	26,96	150	32

На рис. 7 приведен график зависимости повреждённости 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. 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.

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

Автор благодарит главного инженера ОАО «КузбассСпецВзрыв» А.Н. Садохина за возможность получения экспериментальных данных, а также Г.Н. Богомолова и В.В. Голубятникова за помощь в проведении исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Asp L.E., Juntikka R.* High velocity impact on NCF reinforced composites // Composites Science and Technology 69. 2009. P. 1478–1482.

2. *Combescure A., Chuzel-Marmot Y., Fabis J.* Experimental study of high-velocity impact and fracture of ice // International Journal of Solids and Structures 48. 2011. P. 2779–2790.

3. *Sherburn A., Horstemeyer M.F.* Hydrodynamic modeling of impact craters in ice // International Journal of Impact Engineering 37. 2010. P. 27–36.

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 43/ 2006. P. 7820–7839.

5. *Земляк В.Л., Баурин Н.О., Курбацкий Д.А.* Лаборатория ледотехники // Вестн. Приамур. гос. ун-та им. Шолом-Алейхема. 2013. № 1 (12). С. 68–77.

6. *Физика* взрыва // под ред. Станюковича. М.: Мир, 1973. С. 704.

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

8. *Орлов Ю.Н.* Исследование процессов высокоскоростного деформирования и разрушения комбинированных ударников: автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук. Томск, 2007. 34 с.

9. *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».

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУЙ С ПОВЕРХНОСТЬЮ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Е.А. Маслов

Решена плоская нестационарная задача сопряженного конвективно-кондуктивного теплопереноса при термомеханическом разрушении конструкционного материала под воздействием высокотемпературной гетерогенной струи вязкого сжимаемого газа, натекающей по направлению нормали к поверхности неподвижной пластины. Представлены типичные поля скоростей и температурные распределения, описывающие основные закономерности исследуемого процесса. Проведено сравнение температурного поля пластины с данными эксперимента и показано их удовлетворительное соответствие.

HYDRODYNAMICS AND HEAT-AND-MASS TRANSFER AN INTERACTION OF HETEROGENEOUS STREAMS WITH A SURFACE OF THE VARIOUS FORM

E.A. Maslov

2D nonstationary problem on thermo-mechanical fracture of a construction material plate under the action of hightemperature heterogeneous jet of viscous gas flowing in normal direction to a surface has been solved. Typical velocity and temperature fields are presented which describe the basic governing laws of investigated process. Comparison of the simulation and experimental results shows a satisfactory agreement.

Оценка работоспособности конструкционных материалов (КМ) в условиях перфорации под действием высокотемпературных гетерогенных струй экспериментальным путем практически невозможна в связи с многофакторным характером физических и химических процессов и очень широкими диапазонами изменения основных